

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO

**Estudo da Perícia em
Petrografia Sedimentar
e sua Importância para a
Engenharia de Conhecimento**

por

MARA ABEL

Tese submetida à avaliação, como requisito
parcial para a obtenção do grau de doutor
em Ciência da Computação

Prof. Dr. John Arthur Campbell
Prof. Dr. José Mauro Volkmer Castilho (in memoriam)

Orientadores

Porto Alegre, julho de 2001.

CIP - CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

Abel, Mara

Estudo da perícia em Petrografia Sedimentar e sua importância para a Engenharia de Conhecimento / por Mara Abel. - Porto Alegre: PPGC da UFRGS, 2001.

243 p. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Computação, Porto Alegre, BR-RS, 2001. Orientadores: Campbell, John Arthur e Castilho, José Mauro Volkmer (in memoriam).

1. Perícia 2. Aquisição de Conhecimento 3. Modelagem de conhecimento 4. Geologia. I. Campbell, John Arthur; II. Castilho, José Mauro Volkmer. III. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitora: Profa. Wrana Panizzi

Pró-Reitor de Ensino: Prof. José Carlos Ferraz Hennemann

Pró-Reitor Adjunto de Pós-Graduação: Prof. Philippe Olivier Alexandre Navaux

Diretor do Instituto de Informática: Prof. Philippe Olivier Alexandre Navaux

Coordenador do PPGC: Prof. Carlos Alberto Heuser

Bibliotecária-Chefe do Instituto de Informática: Beatriz Regina Bastos Haro

*Ao Eliseo, Gisele, Fabiana, Juliano, Laura e Luis Alvaro,
e todos esses estudantes que nos lembram no dia a dia
porque uma pesquisa de doutorado é tão importante.*

*Ao meu pai, por ter me impregnado com esse vício pelos
livros.*

Agradecimentos

Agradeço ao CNPq, à FAPERGS e à FINEP, que em diferentes momentos garantiram os recursos deste projeto. Ao Instituto de Informática pela infra-estrutura necessária à pesquisa.

Aos estudantes do curso de Geologia e do Pós-graduação em Estratigrafia do Instituto de Geociências; aos Geólogos da Divisão de Reservatórios do Centro de Pesquisa da Petrobrás, por terem participado do experimento descrito neste trabalho.

Ao Prof. José M. V. Castilho, menos pela orientação desse projeto de doutorado, do que pela fé inabalável no sucesso das minhas idéias. Só por isso eu o perdôo de não ter cumprido sua promessa de acompanhar esse projeto até o final, deixando que a morte o levasse antes da hora. Enfim, ele devia estar certo, senão ninguém jamais leria essas palavras.

Ao Eliseo Reátegui, pelas contribuições ao modelo de representação de conhecimento e pela sugestão de utilizar raciocínio baseado em casos. Ao Wilson, Rosane Galhiardi, Cristina Paludo, Maique Pereira Agnes, Juliano Zanardo e Laura Mastella, bolsistas desse projeto, pela trabalho nas diversas fases de desenvolvimento do Sistema PetroGrapher. À bibliotecária Ida Rossi e às bolsistas Fabiana Benedetti e Laura Mastella, pela revisão de formato deste texto. À Profa. Dra. Ana Cristina Bicharra pela análise do texto preliminar desta tese e pela estimulante discussão científica que dela decorreu. Espero ter oportunidade de repeti-la.

Agradeço especialmente ao Luis Alvaro de Lima Silva, que transformou minhas idéias em código de programa, criticou-as, aperfeiçoou-as, divulgou-as e transformou-se na garantia de que o produto seria de qualidade. Não consigo imaginar como seria esse trabalho sem ele, mas tenho certeza de que suas idéias estão impregnadas em todas as páginas.

Ao geólogo, Prof. Luis Fernando De Ros, o especialista deste projeto. Ao aceitar envolver-se em um projeto de aquisição e modelagem de conhecimento, abriu mais do que a própria mente, mas o coração, ao expor sua forma de pensar e raciocinar na tarefa que realiza com brilho. Um exemplo de cientista a ser seguido, orgulho-me de pensar que sua conduta profissional está parcialmente materializada no sistema deste projeto.

Ao Prof. John Arthur Campbell, da University College of London, meu orientador, pelo engajamento tardio num projeto incerto. Principalmente, agradeço pela torrente inesgotável de idéias, pelo rigor científico, pela conduta acadêmica, pela curiosidade científica e pelo exemplo inesquecível de professor, pesquisador e orientador. Posso assegurar que ele representa um exemplo a ser perseguido com persistência na minha vida acadêmica.

Aos meus colegas do Instituto de Informática que deram minhas aulas, foram as minhas reuniões, participaram no meu lugar das comissões de que seria parte e sustentaram o dia-a-dia dessa instituição enquanto estive dedicando meu tempo à pesquisa. Prometo assumir minha parte do alicerce a partir de agora.

Ao Luis Henrique, meu esposo, pelas discussões científicas e as inúmeras contribuições, sugestões e críticas a esse trabalho, e também pela paciente revisão do texto final. A ele e meus filhos, Pedro e Ana, agradeço por toda a compreensão com as minhas ausências.

Agradeço, finalmente, a Deus, por essa oportunidade particular de ter o conhecer como profissão. De ter as ferramentas, a habilidade, a capacidade e a oportunidade de dedicar meu tempo a compreender melhor este pedaço do mundo e explicá-lo às gerações que me seguem.

Sumário

Lista de Figuras	11
Lista de Tabelas.....	15
Resumo	17
Abstract.....	19
1 Introdução.....	21
1.1 Objetivo e questões de pesquisa	22
2 Definindo conhecimento	25
2.1 Classificação do conhecimento	26
2.1.1 Níveis de conhecimento.....	27
2.1.2 Categorias de conhecimento	27
2.1.3 Racionalização de conhecimento	28
2.1.4 Conceitos complementares.....	30
2.2 Sumário do capítulo 2	31
3 Descrição do domínio da Petrografia Sedimentar.....	33
3.1 Sistemas simbólicos para interpretação geológica	40
3.2 Abordagens não-simbólicas para interpretação geológica.....	44
3.3 Sumário do capítulo 3	48
4 A Perícia.....	51
4.1 Abordagem do contexto social.....	53
4.2 Abordagem do especialista X novato.....	56
4.3 Abordagem cognitiva	57
4.3.1 Quantidade de conhecimento.....	58
4.3.2 Organização e indexação do conhecimento	58
4.3.3 Empacotamento e Automatização	60
4.3.4 Estratégias de Solução de Problemas e Automonitoração	61
4.3.5 Capacidade analítica.....	62
4.3.6 Habilidade Criativa	62
4.3.7 Habilidade prática	63
4.4 A automatização da perícia	63
4.5 Sumário do capítulo 4	65
5 Engenharia de conhecimento	69
5.1 A Noção de nível do conhecimento de Newell.....	69
5.1.1 Modelo do domínio e ontologias	71
5.1.2 Modelo da tarefa	74
5.1.3 Métodos de solução de problemas	75
5.1.4 A Modelagem de conhecimento no nível do conhecimento.....	76
5.2 Extração de modelos por aprendizagem de máquina	78
5.2.1 Raciocínio baseado em casos.....	79
5.2.2 Redes neurais.....	80
5.2.3 Redes bayesianas.....	82
5.3 Métodos de eliciação de conhecimento	82
5.3.1 Entrevistas	83

5.3.2	Análise de protocolos	84
5.3.3	Classificação de termos.....	86
5.3.4	Focalizando contextos ou cenários	86
5.3.5	Observação	86
5.3.6	Recuperação de eventos.....	87
5.3.7	Grafos de conhecimento	87
5.4	Projeto de sistemas baseados em conhecimento	89
5.5	Metodologia Common KADS.....	90
5.5.1	O Conjunto de modelos	90
5.5.2	Modelo do conhecimento.....	92
5.5.2.1	Conhecimento do domínio.....	92
5.5.2.2	Conhecimento de inferência	93
5.5.2.3	Conhecimento de Tarefa.....	96
5.6	Sumário do capítulo 5	97
6	Investigação da perícia em Petrografia Sedimentar	99
6.1	Estudo exploratório: a aquisição de conhecimento.....	102
6.1.2	Eliciação da ontologia do domínio.....	102
6.1.2.1	Imersão na literatura	103
6.1.2.2	Análise de protocolos.....	103
6.1.2.3	Métodos estruturados.....	104
6.1.3	Aquisição de conhecimento orientada por casos e grafos de conhecimento.	106
6.2	Análise da perícia	110
6.2.1	Construção do instrumento de investigação.....	111
6.2.2	Comparação com o domínio da Fitopatologia.....	124
6.2.3	Análise dos resultados	128
6.2.4	Etapas do método de aquisição de conhecimento	128
6.3	Sumário do capítulo 6	132
7	A perícia em Petrografia Sedimentar	135
7.1	O aprendizado.....	135
7.2	O conhecimento declarativo do especialista em petrografia	141
7.3	A inferência no domínio da Petrografia	145
7.4	Sumário do capítulo 7	152
8	Construção do modelo do domínio	155
8.1	O Conhecimento do domínio da aplicação.....	157
8.1.1	Conceitos do domínio da aplicação	157
8.1.2	Relações.....	158
8.1.3	Grafos de conhecimento	158
8.1.4	Triângulos.....	161
8.2	Conhecimento de inferência da aplicação.....	164
8.2.1	A interpretação de ambiente diagenético	166
8.2.2	A classificação composicional baseada em diagramas triangulares	169
8.3	Conhecimento da tarefa da aplicação.....	169
8.4	Suposições e competência do modelo de inferência	172
8.4.1	Suposições sobre o modelo do conhecimento	172
8.4.2	Suposições sobre o modelo do usuário	174
8.4.3	Competência da tarefa.....	174
8.5	Validação do modelo de conhecimento da aplicação	174

8.6 Sumário do capítulo 8	175
9 Conclusão	177
9.1 Conclusões deste trabalho.....	178
9.1.1 Sobre os aspectos cognitivos associados à perícia em Petrografia Sedimentar	178
9.1.2 Diferenças entre especialistas e novatos.....	179
9.1.3 Sobre os métodos de aquisição de conhecimento	180
9.1.4 Sobre os modelos de representação de conhecimento	182
9.2 Contribuições ao estado da arte	183
9.3 Sugestões para pesquisa futura	184
Anexo 1 Instrumento do experimento para análise cognitiva da perícia em Petrografia Sedimentar	187
Anexo 2 Exemplos de textos coletados no experimento para análise cognitiva	191
Anexo 3 Exemplo de grafo de conhecimento	195
Anexo 4 O Modelo do conhecimento para Petrografia Sedimentar	205
Anexo 5 Validação qualitativa dos modelos.....	225
Bibliografia.....	231

Lista de Figuras

FIGURA 2.1- A Espiral do conhecimento (NONAKA e TAKEUCHI, 1997).	30
FIGURA 3.1 - Informações utilizadas para a avaliação da qualidade e dificuldade da extração de petróleo de um reservatório.....	33
FIGURA 3.2 - Trecho de um testemunho de rocha extraídos de um poço de exploração de petróleo, utilizado para análise macroscópica.	35
FIGURA 3.3 - Imagem de uma seção delgada de rocha sedimentar clástica, do tipo arenito, ao microscópio ótico de luz polarizada.....	35
FIGURA 3.4 - O processo de contagem de pontos em uma seção delgada é realizado ao longo de linhas eqüidistantes sobre a amostra. O mineral identificado no cruzamento das linhas é adicionado ao total daquele constituinte particular.....	36
FIGURA 3.5 - Trecho da descrição microscópica de uma amostra de rocha da Formação Urucutuca, do Campo de Lagoa Parda da Bacia Espírito Santo, já transformado em percentual.....	37
FIGURA 3.6 - Trecho da descrição microscópica quantitativa de uma amostra de rocha da Formação Urucutuca, do Campo de Lagoa Parda da Bacia Espírito Santo, obtida a partir da contagem de pontos sobre a seção delgada.	38
FIGURA 3.7 - Classificação composicional e interpretação de uma amostra de rocha da Formação Urucutuca, do Campo de Lagoa Parda da Bacia Espírito Santo, obtida a partir da descrição e contagem dos constituintes presentes na amostra.	39
FIGURA 3.8 - Agrupamento de conceitos para compor objetos significantes em outra dimensão do problema.	41
FIGURA 3.9 - Um atributo <i>AI</i> qualquer implica uma solução <i>SI</i> , com valor <i>a</i> , em algum coeficiente de influência <i>CI</i> . A mesma implicação não existe para <i>SI</i> com valor <i>b</i>	47
FIGURA 4.1 - Representação aproximada da curva de aprendizado de indivíduos submetidos a treinamento comparada com a de especialistas.....	54
FIGURA 4.2 - Desempenho comparativo entre especialistas e não especialistas em um determinado domínio.	55
FIGURA 5.1 – O nível do conhecimento e o nível simbólico são modelos do comportamento, ou seja, da interação observada entre o agente e o ambiente.	70
FIGURA 5.2 - Raciocínio baseado em casos. A modelagem convencional de conhecimento exige a construção de um <i>modelo</i> do domínio a partir de um estudo e compreensão dos problemas da aplicação. Um	

sistema baseado em casos utiliza a descrição dos próprios problemas - <i>casos</i> - para a busca da solução.....	79
FIGURA 5.3 – Mapeamento de implicações do domínio para uma árvore E-OU e desta para uma rede neural.....	81
FIGURA 5.4 - Grafo de conhecimento representando como as evidências são combinadas para sugerir um diagnóstico clínico.....	88
FIGURA 5.5 - Suíte de modelos da metodologia Common KADS.....	91
FIGURA 5.6 - Estrutura de inferência que descreve o método de Classificação Heurística.....	95
FIGURA 6.1 – Árvore de decisão modificada do projeto Geoxpert, os nodos nem sempre discriminam caminhos, mas aumentam a probabilidade da interpretação.....	100
FIGURA 6.2 - Hierarquia dos conceitos do domínio da Petrografia Sedimentar, baseada nos relacionamentos de generalização e particionamento.....	105
FIGURA 6.3 - Grafo de conhecimento mostrando o relacionamento entre feições da rocha e a interpretação de um depósito sedimentar.....	108
FIGURA 6.4 - Evidências dos grafos de conhecimento consistem de informações mais estruturadas e complexas do que aquelas descritas na ontologia construída com a abordagem de casos.....	109
FIGURA 6.5 - Definição de um nó de evidência de um grafo de conhecimento de acordo com os termos definidos na ontologia do domínio.....	109
FIGURA 6.6 – Relação entre os níveis da perícia e quantidade de informação retida na memória de longa duração, medida através da quantidade de palavras utilizadas e da quantidade de palavras significativas no domínio utilizadas.....	116
FIGURA 6.7 – Relação entre os níveis da perícia e quantidade de informação interpretadas, medida pelo número de ocorrências, retidas na memória de longa duração, medida através da quantidade de expressões de interpretação utilizadas. A linha rotulada representa a média para cada uma das classes da amostra (especialistas (E), intermediários (I) e novatos (N)).....	117
FIGURA 6.8 – Relação entre os níveis da perícia e quantidade de informação extraída de uma lâmina de rocha (medida pelo número de ocorrências) descrita durante a exposição da rocha. As linhas representam as médias de palavras (linha superior) e de palavras significativas (linha inferior) para cada uma das classes da amostra (especialistas (E), intermediários (I) e novatos (N)).....	118

FIGURA 6.9 – Relação entre os níveis da perícia e uso de feições interpretadas para descrição de rochas. A linha rotulada representa a média para cada uma das classes da amostra (especialistas (E), intermediários (I) e novatos (N)). O eixo vertical representa o número de feições interpretadas descritas.	119
FIGURA 6.10 – Relação entre os níveis da perícia e uso de feições interpretadas para descrição de rochas utilizando a memória de curta duração. A linha rotulada representa a média para cada uma das classes da amostra (especialistas (E), intermediários (I) e novatos (N)). O eixo vertical representa o número de feições interpretadas descritas para a Lâmina 1 (a) e 2 (b).	120
FIGURA 6.11 – Relação entre os níveis da perícia e uso de feições interpretadas para descrição de rochas utilizando a memória de curta duração num problema fora do domínio da perícia. Em destaque, um especialista em Petrologia Metamórfica, que foi classificado neste trabalho como novato.	121
FIGURA 6.12 – Interface do especialista para criação e definição de grafos de conhecimento.	130
FIGURA 6.13 - Interface do especialista para detalhamento dos pacotes visuais que compõem o grafo de conhecimento.	131
FIGURA 7.1 - Evolução esquemática das estruturas de representação de conhecimento no processo de aprendizado de um geólogo.	136
FIGURA 7.2 - O sistema perceptual irá examinar o novo estímulo, como as texturas de rochas mostradas em (a), (b) e (c), e irá tentar casá-las contra os pacotes visuais armazenados na mente. Se nenhuma correlação razoável for possível para os aspectos vistos na rocha, um novo pacote será criado para representar o estímulo.	139
FIGURA 7.3 - Uma representação parcial da estrutura de representação do conceito <i>arenito</i> eliciado de um especialista. As características do conceito estão representadas como frames e slots contendo os atributos e todos os seus possíveis valores.	142
FIGURA 7.4 - Hierarquia de objetos do domínio do conhecimento em Petrografia Sedimentar construído pelos relacionamentos de partição e generalização.	143
FIGURA 7.5 - Os pacotes visuais associam um significado sobre a interpretação da rocha ao padrão da feição visualizada na rocha. Este significado irá ajudar a construir a interpretação final da amostra analisada.	144

FIGURA 7.6 - A seqüência de exame sobre a lâmina delgada de rocha segue uma trajetória semi-sistemática (1-4), algumas vezes desviada por feições particulares que chamam a atenção do geólogo. Quando (a) é identificado, o geólogo procura conscientemente por (b).....	147
FIGURA 7.7 - Rede de inferência mostrando um breve processo de inferência regressivo. O geólogo vê uma feição (a) na lâmina que recupera um pacote visual particular. Esse pacote dispara alguma hipótese sobre a origem da rocha, baseada num esquema que descreva aquela feição. Para comprovar a hipótese, o geólogo irá procurar na lâmina por outra feição (b) que irá suportar a hipótese. O esquema que associa os pacotes visuais com a interpretação geológica é mostrado em (c)..	148
FIGURA 7.8 - Estrutura de inferência do PSM Interpretação de Ambientes Diagenéticos.....	149
FIGURA 7.9 . Especificação de controle do PSM Interpretação de Ambientes Diagenéticos.....	150
FIGURA 8.1 Modelo do conhecimento para Petrografia Sedimentar.....	159
FIGURA 8.2 - Relações de implicação entre pacotes visuais e interpretações representadas em grafos de conhecimento.....	160
FIGURA 8.3 - Morfologia dos grafos de conhecimento da base de conhecimento de Petrografia Sedimentar.....	162
FIGURA 8.4 – Modelo das relações de implicação entre os conceitos Totais e Classificação representadas em triângulos de classificação.....	163
FIGURA 8.5 - Triângulo de classificação composicional de arenitos segundo McBride.....	164
FIGURA 8.6 - Estrutura de inferência para o reconhecimento de pacotes visuais.....	165
FIGURA 8.7 - Estrutura de inferência da interpretação de ambiente diagenético dirigido por grafos de inferência.....	167
FIGURA 8.8 - Estrutura de inferência para o tratamento de incerteza por valores alternativos e pesos associados a pacotes visuais.....	168
FIGURA 8.9 - Estrutura de inferência para classificação composicional das amostras de rocha baseada em diagramas triangulares.....	170
FIGURA 8.10 - Descrição da tarefa de interpretação de ambiente diagenético.....	171
FIGURA 8.11 - Descrição da tarefa de classificação composicional de rochas sedimentares clásticas.....	172
FIGURA 9.1 – A comparação do modelo declarativo com os casos coletados evidencia as relações causais do domínio. Estas, por sua vez, podem apontar novos conceitos ou atributos a serem inseridos no modelo.	182

Lista de Tabelas

TABELA 2.1 – Níveis de racionalização do conhecimento	29
TABELA 5.1 – Comparação da análise de sistemas para construir software convencional e da análise de conhecimento para desenvolver Sistemas Especialistas (GARDNER et al., 1998).	77
TABELA 5.2 – Correspondência entre representação de implicações lógicas e redes neurais.	81
TABELA 5.2 – Significado das primitivas de inferência utilizadas nesse trabalho (SCHREIBER et al., 1999) e (GARDNER et al., 1998)	94
TABELA 6.1- Classificação dos geólogos participantes do experimento quanto ao nível da perícia.	113
TABELA 6.2 - Distribuição dos critérios de classificação utilizados por especialistas, intermediários e novatos. Os campos sombreados marcam critérios baseados na interpretação de feições.....	123
TABELA 6.3 - Classificação dos agrônomos participantes do experimento quanto ao nível da perícia.	125
TABELA 6.4 – Critérios utilizados por especialistas e não-especialistas para classificação de informação no domínio. Os campos sombreados indicam o uso de feições interpretadas para classificação.	127

Resumo

Perícia é a capacidade de aplicar habilidades intelectuais para resolver problemas em domínios estratégicos, com um desempenho e qualidade de solução superior à média dos profissionais da área. Ampliar a compreensão do que é a perícia fornece suporte e justificativas para a proposição de novos recursos para aquisição e modelagem de conhecimento na área da Engenharia de Conhecimento.

Esta tese apresenta os resultados de um estudo sobre a perícia em Geologia, em especial numa aplicação em Petrografia Sedimentar. A tarefa em questão é especialmente significativa porque, ao contrário das tarefas típicas, cujo estudo tem levado ao desenvolvimento de diversas metodologias de aquisição de conhecimento, essa tarefa aplica primariamente raciocínio baseado na análise de imagens e, secundariamente, busca e métodos analíticos para interpretar os objetos da perícia (no caso, rochas-reservatório de petróleo).

O objetivo deste projeto de tese é a identificação dos recursos cognitivos aplicados por especialistas na solução de problemas, que são essencialmente de reconhecimento visual e a representação do que é reconhecido. A interpretação dessas habilidades fornece fundamentos para a proposta de novos recursos para aquisição e modelagem, e posterior desenvolvimento de sistemas especialistas para interpretação de rochas. Também contribuem para o tratamento da perícia em outros campos que possuam o mesmo caráter de *reconhecimento visual* tal como a interpretação de rochas.

O estudo foi desenvolvido em duas fases. Na primeira, o conhecimento foi eliciado de um especialista em Petrografia Sedimentar e estruturado, utilizando técnicas tradicionais de aquisição de conhecimento. A segunda fase envolveu o desenvolvimento de um experimento com dezenove geólogos com diferentes níveis de perícia, para identificar os tipos de conhecimentos que suportam a perícia e quais os métodos de solução que são aplicados nos altos níveis da perícia.

O estudo das habilidades cognitivas demonstrou que especialistas em Petrografia sedimentar desenvolvem uma grande variedade de formas mentais e hierarquias que diferem daquelas normalmente descritas na literatura da área. Especialistas retêm ainda um grande conjunto de abstrações simbólicas de imagens, denominados aqui de *pacotes visuais*. Os pacotes visuais possuem importante papel na indexação das estruturas mentais e na condução do processo de inferência. As representações são tipicamente associadas com seus próprios métodos de solução de problemas adequados à complexidade da tarefa de caracterização de reservatórios. A aplicação desses recursos faz parte do conjunto de conhecimentos tácitos dos especialistas.

A associação de grafos de conhecimento e a análise de casos mostrou-se, neste trabalho, um método adequado para a externalizar e adquirir o conhecimento declarativo e as relações causais, as quais não são evidenciadas com as técnicas de aquisição de conhecimento tradicionais. Métodos de solução de problemas, por sua vez, foram eliciados com o auxílio das bibliotecas de solução de problemas disponíveis na literatura e grafos de conhecimento.

O modelo de representação, aqui proposto, expressa o conhecimento em dois níveis: o nível da externalização, compatível com o conhecimento de um intermediário em Petrografia Sedimentar, e o nível da inferência, que modela o conhecimento tácito do especialista. Esta tese apresenta de forma inédita o conceito de *pacote visual* como uma primitiva de representação e um conjunto de métodos de solução de problemas adequados à interpretação de rochas.

Palavras-chave: Conhecimento visual, perícia, aquisição de conhecimento, modelagem de conhecimento, Geologia.

TITLE : "THE STUDY OF EXPERTISE IN SEDIMENTARY PETROGRAPHY AND ITS SIGNIFICANCE FOR KNOWLEDGE ENGINEERING"

Abstract

Expertise is the ability to apply intellectual skills and knowledge in solving problems in knowledge-intensive domains, with a superior performance and quality of the solution. Extending the understanding of what expertise is, provides support and justification for any proposals of new approaches for knowledge acquisition and modelling in the field that is called Knowledge Engineering.

This thesis presents the results of a detailed study of the nature of expertise in geological domains, particularly in a Sedimentary Petrography application. The task in focus is of special interest because, unlike typical tasks whose study has led to various methodologies for knowledge acquisition, it demands primarily visual recognition and only secondarily utilizes search and analytical methods to describe and interpret the objects of the expertise (in this case, petroleum reservoir rocks).

The goal of the thesis project is the identification of the cognitive skills applied by experts in solving problems that are essentially about visual recognition and the representation of what is recognized. Interpretation of these skills offers a foundation for any new approaches to knowledge acquisition and modelling, and for further development of expert systems for rock interpretation and for treatment of expertise in other fields that have the same primary *visual recognition* character as rock interpretation.

The project was carried out in two phases. In the first one, the knowledge was elicited from an expert in Sedimentary Petrography and structured using traditional knowledge acquisition tools. The second phase involved the development of an experiment in cognitive psychology with nineteen geologists at different levels of expertise, to delineate the types of knowledge and the possible problem-solving methods that occur in high-quality geological interpretation.

The study of expert skills in the geological domain has demonstrated that experts develop a wide variety of representations and hierarchies - which, moreover, differ from what is found in the domain literature. Experts also retain a very large number of symbolic abstractions of images. In the thesis these are called visual chunks. They hold links with the internal hierarchical arrangement of knowledge, and play an important role in guiding the inference process. The representations are typically associated with their own problem-solving methods, which are especially suited to the complex task of geological reservoir characterisation. These cognitive resources integrate the collection of tacit expert knowledge in sedimentary geology.

An association of knowledge graphs and case analysis has turned out to be an effective tool in helping to externalise and acquire the declarative knowledge and causal relations of the domain, which were not evident in elicitation sessions conducted on a traditional knowledge-acquisition basis. In addition, problem-solving methods were effectively elicited with the help of the available problem-solving method libraries and the knowledge graphs.

The domain model, in this work, expresses the knowledge over two levels: the externalisation level, which describes the concepts in the at an intermediate (between novice and expert)

stage of expertise; and the expertise level, which models the tacit knowledge of the expert. The thesis introduces the concept of visual chunk as a primitive for representation, and a set of original problem-solving methods appropriate for sedimentary rock interpretation.

Keywords: visual knowledge, expertise, knowledge acquisition, knowledge modelling, Geology.

1 Introdução

Este trabalho apresenta uma análise cognitiva da perícia e as técnicas de aquisição de conhecimento adequadas para domínios complexos, cuja solução de problemas aplica conhecimento de diferentes tipos e complexamente estruturado, e onde o raciocínio baseia-se principalmente na análise de imagens e, apenas secundariamente, nas técnicas tradicionais de busca. O domínio em foco é o estudo de rochas sedimentares para determinar a qualidade de reservatórios de petróleo, realizado através da Petrografia Sedimentar.

A Petrografia Sedimentar estuda amostras de rochas extraídas de testemunhos de poços ou áreas de exploração de petróleo, com a finalidade de determinar, a partir da análise de uma pequena porção, as propriedades de um reservatório de petróleo. Essas informações irão determinar o potencial econômico do reservatório e as técnicas de exploração aplicáveis. A análise das amostras é realizada por meio da descrição minuciosa das feições da rocha observadas através de um microscópio ótico de luz polarizada ou em amostras de mão. A interpretação das feições é feita utilizando tipicamente raciocínio baseado em imagens (*ou raciocínio imagístico*, segundo (YIP e ZHAO, 1996)). É uma tarefa cuja solução aplica um componente significativo de conhecimento tácito.

As características do domínio da Petrografia Sedimentar - conhecimento complexamente estruturado e raciocínio baseado em imagens - são comuns à Geologia como um todo e também a outros domínios naturais, como a Medicina (diagnóstico por análise de tomografias e radiografias, análises clínicas laboratoriais), Biologia (Citologia) e Agronomia (Fitopatologia) e também compartilham características típicas de aplicações empresariais. As dificuldades inerentes à solução de problemas nesses domínios determinam que o desempenho desejado na execução das tarefas de interpretação seja atingido apenas por especialistas com mais de 10 anos de experiência na área. Os resultados e propostas obtidos a partir do estudo da Petrografia Sedimentar podem ser aplicados no desenvolvimento de aplicações em outros domínios complexos, como os citados acima, onde a decisão é tomada a partir da análise de estímulos visuais.

A perícia, ou a *capacidade de aplicar habilidades intelectuais para resolver problemas em domínios estratégicos, com um desempenho e qualidade de solução superior à média dos profissionais da área*, tem sido objeto de estudo desde o início do século. A crescente motivação para compreender quais são as características cognitivas que diferenciam os especialistas pode ser explicada por um conjunto de fatores:

- há poucos especialistas disponíveis no mercado de trabalho principalmente devido ao longo tempo aplicado na sua formação (veja Seção 4.1 Abordagem do contexto social);
- o investimento num longo treinamento *per si* não é garantia para se obter a competências desejadas, além de que as técnicas de ensino-aprendizagem e os conteúdos ainda não são completamente conhecidos (ver Seção 4.2 Abordagem do especialista X novato);
- o destaque dos especialistas em relação a outros profissionais só ocorre em domínios ditos *intensivos em conhecimento*, onde o valor agregado à solução de problemas tende a ser muito alto;
- a tendência mais atual da Engenharia de Conhecimento, que suporta o desenvolvimento de Sistemas Especialistas, busca cada vez mais subsídios nas

formas particulares de solução de problemas humanas para propor soluções por computador, como exemplificado pela construção de ontologias e métodos de solução de problemas (GÓMEZ-PÉREZ e BENJAMINS, 1999);

- as atividades profissionais de alto valor agregado tendem a ser, cada vez mais, intensivas em conhecimento e a compreensão dos aspectos cognitivos utilizados pelo *trabalhador de conhecimento*, como definido por (BOFF, 2000) na seleção e uso de conhecimento permite garantir um suporte melhor para essas atividades;
- a utilização de conhecimento deixou de ser uma prerrogativa individual para tornar-se uma atividade institucional, objeto de estudo da *Gestão de Conhecimento* (LIEBOWITZ e WILCOX, 1997; NONAKA e TAKEUCHI, 1997; SPEK e SPIJKERVET, 1997; STEWART, 1998). As propostas para independência, preservação, armazenamento e compartilhamento de conhecimento nas instituições compartilham da mesma necessidade de compreensão do mecanismo humano de utilização do conhecimento.

O objetivo geral desse trabalho é propor técnicas de aquisição e modelagem de conhecimento adequadas para o desenvolvimento de aplicações baseadas em conhecimento que suportem as tarefas de interpretação em domínios complexos. As técnicas são propostas a partir da identificação dos fatores cognitivos que determinam a perícia em Petrografia Sedimentar, também identificados em outros domínios que aplicam raciocínio baseado em imagens.

O estudo foi desenvolvido a partir do processo de aquisição de conhecimento e análise cognitiva de um especialista reconhecido em diagênese de rochas siliciclásticas ¹. O comportamento cognitivo desse especialista foi posteriormente comparado ao de outros geólogos com diferentes níveis de perícia em Petrografia Sedimentar, buscando determinar os fatores que contribuem efetivamente para a perícia nesse domínio. Uma vez evidenciados os tipos de conhecimento que determinam a perícia, foram propostas técnicas de aquisição de conhecimento e modelagem adequadas à captura e representação desse conhecimento, objetivando o desenvolvimento de Sistemas Especialistas. O comportamento cognitivo reconhecido nesse domínio foi comparado ao de outros domínios complexos, particularmente à Fitopatologia e, de modo mais geral, à Medicina.

Os dados sobre Petrografia Sedimentar aqui apresentados foram obtidos com a aplicação de métodos de aquisição de conhecimento da Engenharia de Conhecimento descritos em (ABEL, REATEGUI e CASTILHO, 1996), e num conjunto de experimentos de laboratório conduzidos com 19 geólogos com níveis de perícia em Petrografia Sedimentar variando entre novatos e especialistas.

1.1 Objetivo e questões de pesquisa

Para a compreensão do contexto deste trabalho, é necessário estabelecer inicialmente quais foram as questões de pesquisa que nortearam o desenvolvimento do projeto e as restrições que foram impostas a partir delas. Essas considerações são descritas a seguir.

O domínio foi estudado do ponto de vista da modelagem no *nível do conhecimento* (NEWELL, 1982; VELDE, 1993), ou seja, buscou-se uma forma de conhecer e modelar

¹ Rochas siliciclásticas são rochas sedimentares formadas basicamente de quartzo e que se constituem em todo o mundo nos maiores e melhores reservatórios de petróleo conhecidos.

tanto o domínio, como a aplicação e a forma de solução *sem considerações de implementação*. O estudo passou pela compreensão dos aspectos cognitivos (humanos) da perícia, de modo a equacionar as necessidades de conhecimento e solução de problemas. Esses aspectos foram estudados especialmente no domínio da Petrografia Sedimentar, porém os resultados foram confrontados e avaliados em outros domínios intensivos em conhecimento.

Muito dos aspectos cognitivos reconhecidos não foram passíveis nem mesmo de uma completa compreensão. Outros foram equacionados mas não modelados, especialmente os que se referem aos aspectos de busca no raciocínio dirigido por imagens, devido às limitações das primitivas de modelagem disponíveis. Uma parte significativa da aplicação foi então, finalmente, modelada e posteriormente traduzida para o nível simbólico.

O objetivo final desta pesquisa é ampliar a compreensão da perícia e propor técnicas de aquisição e modelagem de conhecimento para domínios complexos que utilizem raciocínio baseado em imagens para a construção de Sistemas Especialistas. Esse objetivo geral pode ser subdividido na busca de solução de um conjunto limitado de problemas que podem ser resumidos pelas seguintes questões de pesquisa:

- O que é exatamente o componente visual do conhecimento geológico e qual o papel dele no desempenho superior alcançado por especialistas?
- É possível extrair do especialista e representar em computador o conhecimento necessário à interpretação de rochas, considerando que esse conhecimento tem um forte componente visual?
- Quais as técnicas mais adequadas para a aquisição desse conhecimento?
- Qual a melhor forma de representação desse conhecimento? Simbólica ou por imagens?
- Como raciocinar sobre conhecimento que incorpora o componente visual?
- Qual a ferramenta computacional mais adequada para suportar a aquisição e processamento de conhecimento do especialista nos domínios em estudo?

As contribuições desse trabalho se fazem, portanto: (i) nos estudos cognitivos que permitem vislumbrar uma melhor compreensão da perícia em domínios complexos que demandam raciocínio baseado em imagens; e (ii) na aquisição de conhecimento, através de técnicas para aquisição e modelagem de conhecimento.

Este texto se organiza em 9 capítulos. No capítulo 1 são apresentados os objetivos da pesquisa, sua importância no estado da arte em Ciência da Computação e a contribuição esperada em outras áreas como Ciência da Cognição, Educação, Administração e Geologia. No Capítulo 2 são definidos alguns conceitos introdutórios ao estudo da perícia e Engenharia de Conhecimento, que serão intensivamente utilizados nos demais capítulos. No Capítulo 3, é descrito o domínio de aplicação e as ferramentas e dificuldades para implantação de sistemas de conhecimento neste domínio. O Capítulo 4 apresenta o estado da arte sobre o tema da perícia em Ciência da Cognição, discutindo as teorias atuais mais importantes. O Capítulo 5 apresenta o estado da arte em Engenharia de Conhecimento, com ênfase em métodos de aquisição e modelos de representação de conhecimento. O Capítulo 6 inicia a apresentação dos resultados deste trabalho, através da apresentação e avaliação das técnicas de aquisição de conhecimento e da investigação comparativa da perícia em Petrografia Sedimentar. O Capítulo 8 formaliza os resultados através da caracterização da perícia neste domínio, como

compreendida pelos resultados deste trabalho. O Capítulo 8 apresenta os modelos de representação de conhecimento no domínio, com a contribuição original de formas de representação dos componentes visuais da perícia e novos métodos de solução e problemas aplicados a domínios que utilizam raciocínio baseado em imagens. O Capítulo 9 descreve as conclusões e contribuições deste trabalho.

2 Definindo conhecimento

A compreensão dos mecanismos da perícia está intimamente ligada ao entendimento da forma de obtenção e utilização do conhecimento. O conhecimento é enfim o objeto da perícia, cujo domínio e habilidade de aplicação determina o desempenho superior de especialistas num mundo de profissionais de desempenho insuficiente. É também o objeto da Engenharia de Conhecimento que busca capturá-lo para construir Sistemas Especialistas. A compreensão de seu significado, ainda controverso, auxilia na elaboração de meios de reproduzir o desempenho do especialista em computador.

O termo *conhecimento*, de extenso uso coloquial, foi formalmente definido por estudiosos da Psicologia e da Ciência da Cognição na busca de melhor compreender o comportamento humano. Na visão empirista², “os conhecimentos consistem essencialmente em informações tiradas do meio (experiência adquirida) sob forma de cópias do real e de respostas figurativas ou motoras aos estímulos sensoriais, sem organização interna ou autônoma” (PIAGET, 1973). Essa visão enfatiza conhecimento como um modelo ou uma *versão* adquirida do mundo real e mantida internamente pelo ser humano.

A definição empirista, basicamente sensória, não contempla, no entanto os conceitos obtidos a partir de raciocínios abstratos ou filosóficos sobre os aspectos do mundo percebidos e armazenados. O conhecimento assim obtido constitui-se na maior parte do conhecimento retido pela mente humana, uma vez que mesmo informações extraídas do meio passam por um *filtro* da cognição e são interpretadas antes de serem armazenadas. A interpretação pode corresponder à realidade em qualquer grau, ou mesmo em nenhum.

O próprio Piaget (PIAGET, 1967), no entanto, entendeu que a aquisição de conhecimento consiste da incorporação de objetos externos aos esquemas de comportamento, passando a fazer parte destes como um processo de assimilação. Porém essa incorporação constitui-se de um equilíbrio dinâmico entre o universo e o pensamento, permitindo a reformulação dos esquemas internos a partir de estímulos do meio. A noção proposta por Piaget reconhece que o conhecimento é gerado por assimilação de conceitos do mundo que são posteriormente estendidos por mecanismos próprios da mente.

Mais modernamente, Anderson (ANDERSON, 1975) enfatizou os aspectos de desenvolvimento interno do conhecimento quando o definiu como um padrão de estados internos (que pode ser um padrão neural nos animais ou eletrônico em computadores) cada um dos quais correspondendo a algum estado do universo. O conhecimento pode ou não corresponder ao padrão externo, pode nem ao menos lembrar os estados externos, ser inato ou aprendido, consciente ou inconsciente. Os estados não representam exatamente a realidade, mas guardam uma interpretação ou uma resposta a ela.

A visão tradicional da Psicologia a respeito de conhecimento preocupa-se principalmente com o homem e a forma como ele se relaciona com o mundo ao seu redor. Essa visão deu suporte ao desenvolvimento da Inteligência Artificial, na medida em que disponibilizou modelos para compreensão da inteligência humana. Por outro lado, a capacidade de modelar e simular o comportamento humano através de um meio

² Empirismo: doutrina segundo a qual todo o conhecimento tem sua origem no domínio sensorial, na experiência.

artificial propiciado pela Inteligência Artificial teve como efeito melhorar a compreensão da Psicologia em relação aos mecanismos da inteligência humana. Na nova visão provocada pela Inteligência Artificial e Sistemas Especialistas, o termo conhecimento passou a ser definido com uma conotação mais ampla.

Para Hayes-Roth e colegas, conhecimento “consiste em (1) descrições simbólicas que caracterizam os relacionamentos empíricos e definicionais num domínio e (2) os procedimentos para manipulação dessas descrições” (HAYES-ROTH, WATERMAN e LENAT, 1983).

Essa visão de conhecimento pode ser compreendida como possuindo duas partes:

- um componente *descritivo* que se ocupa em representar os objetos (ou as *coisas*) do mundo, seu significado e como esses objetos se relacionam entre si;
- um componente *dinâmico* que *sabe* como essas descrições podem ser utilizadas.

Aceitar que o componente dinâmico do conhecimento seja composto apenas por procedimentos de manipulação de descrições, como afirma Hayes-Roth, parece ser um suporte insuficiente para o desempenho alcançado por especialistas humanos. Afinal, um especialista mostra-se capaz de reter um volume de conhecimentos, selecionar entre aqueles qual é relevante para o problema em questão, decidir como deve ser aplicado, monitorar sua aplicação, mudando eventualmente de estratégia e, finalmente, verificar se o resultado obtido foi satisfatório. Esse processo é dirigido pelo objetivo a ser alcançado, ou seja, a que problema, tarefa ou aplicação o conhecimento deve servir. O conceito de conhecimento deve incluir, portanto, a capacidade de reconhecimento dos problemas do mundo, com as possíveis estratégias que podem ser aplicadas em sua solução.

Essa elaboração leva, finalmente, a uma definição satisfatória do termo conhecimento tanto do ponto de vista cognitivo como de Inteligência Artificial. Conhecimento deve ser compreendido como *a informação sobre o domínio e a forma como essa informação é utilizada para resolver problemas*.

Um exemplo que permite a melhor compreensão dessa definição é descrito por Sternberg ao discorrer sobre os aspectos cognitivos da perícia (STERNBERG, 1997).

Suponha duas pessoas que estejam estudando Francês. O primeiro estudante assume como estratégia memorizar inteiramente um dicionário (o componente descritivo) e uma gramática (a forma como as descrições são utilizadas) da Língua Francesa. O segundo estudante opta por morar na França por quinze anos, comunicando-se em francês com as outras pessoas, sem no entanto nunca utilizar um dicionário ou uma gramática. Ao final do período, qual pessoa estaria mais apta (ou seja, teria mais conhecimento) a comunicar-se em francês? A experiência indica que o segundo estudante estaria mais apto a fazer uso da língua. Embora o primeiro estudante tenha armazenado uma grande quantidade de informação, essa informação é inerte, uma vez que não está associada ao contexto em que deve ser aplicada e a forma de aplicação. O conhecimento só existe quando ele é operacional.

2.1 Classificação do conhecimento

Modelar conhecimento não é mais concebido, atualmente, como uma escolha de uma forma de representação rica mas homogênea, capaz de representar todo o conhecimento que um especialista utiliza para solução de problemas. Diversas formas de

conhecimento foram identificadas e exigem formas de representação distintas. As dificuldades de se representar os diferentes tipos de conhecimento típicos de domínios complexos permeiam todo este trabalho, sendo interessante identificar previamente as diferentes classes de conhecimento discutidas ao longo do texto.

O conhecimento aplicado a qualquer domínio, assim como o corpo de conhecimento que constitui o senso comum que nos dirige, pode ser classificado segundo diferentes critérios que facilitam sua organização. Alguns desses serão descritos a seguir.

2.1.1 Níveis de conhecimento

(HARMON e SAWYER, 1990) classificam o nível de profundidade em que um determinado domínio é compreendido.

- Conhecimento superficial. Descrição de objetos do domínio; informações que se referem a problemas imediatos e à solução associada.
- Conhecimento do domínio. Apresentação da forma de resolver problemas num determinado domínio, na forma de descrições, heurísticas ou procedimentos, muitos deles sem base teórica.
- Conhecimento profundo. Estrutura interna e causal (relações de causa e efeito) dos objetos do domínio e suas interações. É o conhecimento teórico do domínio que pode ser aplicado a diferentes tarefas e em mais de uma situação utilizando mecanismos de transferência e analogia. Este tipo de conhecimento é de difícil aquisição e trata computacional.

Para exemplificar a classificação, examinemos os níveis atingidos por um estudante tradicional de Francês (ou seja, que aprenda pelas técnicas convencionais e não as descritas no item anterior). Inicialmente, o estudante será capaz de reconhecer um conjunto de questões ou frases simples e aplicá-las no contexto adequado: *-Bonjour, comment allez vous? Je vais bien, merci.* Ele possui *conhecimento superficial* do domínio e, se o conjunto for grande o suficiente, o estudante poderá se comunicar na maioria das situações do dia-a-dia.

Num segundo momento, o estudante domina a gramática da língua e reconhece as estruturas que devem ser respeitadas nas construções das frases. Ele não apenas utiliza as frases que aprendeu, mas é capaz de criar suas próprias frases e expressões sem ferir o idioma. Possui *conhecimento do domínio*.

Finalmente, o estudante decide aprofundar-se no estudo da Língua Francesa. Ele não só amplia seu vocabulário e domina as regras de gramática, mas compreende as raízes da língua, a origem de diversos termos, seu significado e aplicações precisos. Não necessariamente, esse estudante irá se comunicar melhor possuindo *conhecimento profundo* do Francês do que o fazia no segundo estágio, mas certamente terá um conhecimento com maior possibilidade de aplicação em outros domínios utilizando mecanismos como analogia (por exemplo, no aprendizado de algum outro idioma).

2.1.2 Categorias de conhecimento

(TURBAN, 1992) refere-se aos *tipos* de informações que constroem o corpo do conhecimento desempenhando diferentes papéis:

- Conhecimento declarativo. Representação descritiva do domínio, que apresenta os fatos do mundo, o *quê* as coisas são e como elas se associam. Descreve como os objetos são e como se relacionam no mundo, através dos atributos e relacionamentos entre objetos. É um conhecimento superficial.
- Conhecimento procedural. Descreve a forma *como* as coisas trabalham sob diferentes tipos de circunstâncias, descrita na forma de instruções passo a passo. Pode fornecer uma aplicação imediata para o conhecimento declarativo.
- Conhecimento semântico. Refere-se às estruturas cognitivas dos objetos e à forma como eles são armazenados em memória. Inclui informação sobre: palavras e outros símbolos; significado dos símbolos e regras associadas; relacionamentos entre símbolos como sinônimos e antônimos, e formas de manipulação dos símbolos e conceitos. É um conhecimento profundo.
- Conhecimento episódico: Descreve a ocorrência passada de problemas e suas soluções associadas, sendo armazenado de forma classificada e indexada, na memória de longa duração, que é onde são preservadas as informações depois de selecionadas e organizadas pela mente humana.
- Metaconhecimento: Conhecimento sobre o conhecimento, ou seja, as leis básicas que regem o mundo e a forma como os demais tipos de conhecimento podem ser aplicados. É um conhecimento profundo.

No exemplo do estudante de Francês, o conhecimento declarativo descreveria os vocábulos conhecidos do estudante agrupados em frases, ou mesmo as frases agrupadas através dos contextos onde se aplicam. O conhecimento procedural descreveria as regras para selecionar as frases e aplicá-las, além de descrever os roteiros a serem seguidos em determinados contextos (ser apresentado a alguém ou ir a um restaurante, por exemplo). O conhecimento semântico guarda o *dicionário* dos vocábulos aprendidos, com sua etimologia e significado. O conhecimento episódico refere-se a instâncias reais de diálogos ou textos onde palavras e frases foram utilizadas com sucesso, podendo ser potencialmente reutilizadas com pequenas adaptações. O metaconhecimento define a forma geral como os vocábulos, frases e diálogos devem ser selecionados e aplicados, além de fornecer critérios para a verificação de resultado quando da aplicação dessas estruturas.

2.1.3 Racionalização de conhecimento

Um indivíduo pode possuir e utilizar conhecimento em diversos níveis de consciência (Tabela 2.1), de acordo com sua capacidade ou oportunidade de ter reconhecido e organizado mentalmente esse conhecimento. Assim, o conhecimento que pode ser expresso em palavras e números representa apenas a ponta do *iceberg*, do conjunto do conhecimento como um todo. Segundo Polanyi (POLANYI, 1974) “*podemos saber mais do que podemos dizer*”, o que se reflete na capacidade de explicitar e transmitir esse conhecimento.

- Conhecimento tácito: É pessoal, não formalizado internamente, específico ao contexto e difícil de ser formulado e comunicado.
- Conhecimento explícito ou codificado. Refere-se ao conhecimento conscientemente organizado e transmissível em linguagem formal e sistemática.

TABELA 2.1 – Níveis de racionalização do conhecimento

Conhecimento Tácito	Conhecimento Explícito
Subjetivo	Objetivo
Experiência (corpo)	Racionalidade (mente)
Simultâneo (aqui e agora)	Seqüencial (lá e então)
Analógico (prática)	Digital (teoria)

Para Nonaka e Takeuchi (NONAKA e TAKEUCHI, 1997), os conhecimentos tácito e explícito não são entidades totalmente separadas, e sim, mutuamente complementares. O pressuposto desses autores é de que o conhecimento humano é criado e expandido através da interação social entre o conhecimento tácito e o conhecimento explícito, ou seja, pela necessidade de transmitir um conhecimento adquirido ou compô-lo com o de outra pessoa. Chamam essa interação de *conversão do conhecimento* e observam que essa conversão é um processo social *entre* indivíduos, e não confinada dentro de um indivíduo.

Esses autores estabelecem quatro tipos de conversão do conhecimento que eles denominam de socialização, externalização, combinação e internalização (NONAKA e TAKEUCHI, 1997).

- **Socialização.** É um processo de compartilhamento de experiências e, a partir daí, da criação de conhecimento tácito, como modelos mentais ou habilidades técnicas compartilhadas. Sem alguma forma de experiência compartilhada é extremamente difícil para uma pessoa projetar-se no processo de raciocínio de outro indivíduo.
- **Externalização.** É a articulação de conhecimentos tácitos em conceitos explícitos e é provocado pelo diálogo ou pela reflexão coletiva. Pode utilizar-se de métodos não analíticos, tais como analogias e metáforas, quando as expressões verbais não forem suficientes para expressar os *insights*, vivências ou percepções dos indivíduos.
- **Combinação.** É sistematização de conceitos num sistema de conhecimento. Envolve a combinação de conjuntos diferentes de conhecimento explícito, originados de diferentes fontes e indivíduos.
- **Internalização.** É a incorporação de conhecimento explícito em conhecimento tácito, normalmente estimulado por alguma forma de treinamento. É intimamente relacionado ao “aprender fazendo”. Quando as experiências são internalizadas pelos indivíduos sob a forma de modelos mentais ou conhecimento técnico compartilhado, através da socialização, externalização e combinação, estas tornam-se ativos valiosos. Esse conhecimento tácito acumulado precisa ser compartilhado com outros membros da organização, iniciando assim uma espiral de criação de conhecimento apresentada na Figura 2.1.



FIGURA 2.1- A Espiral do conhecimento (NONAKA e TAKEUCHI, 1997).

2.1.4 Conceitos complementares

Complementando as definições anteriores, cabe ainda formalizar alguns conceitos adicionais na forma como serão considerados, no âmbito desse trabalho, dado, informação e domínio.

Dado. Representação simbólica de um objeto ou informação do domínio sem considerações de contexto, significado ou aplicação. Exemplo: *Louvre*.

Informação. Reconhecimento dos objetos do domínio, suas características, suas restrições e seus relacionamentos com os outros objetos, sem ater-se a *utilidade* dessa informação. Exemplo: *O Louvre é um museu de arte*.

Domínio. Qualquer conjunto relativamente circunscrito de atividades.

Naturalmente, essas definições simplificadas e classificações têm como finalidade equacionar o problema da compreensão do conhecimento, de modo a subsidiar e fornecer direções para o processamento de conhecimento num meio artificial. Não é parte do escopo deste trabalho considerar todas as nuances a respeito de como o ser humano percebe a realidade, as diversas formas como a organiza internamente e a aplica na solução de problemas.

Considerando a complexidade do tema, o componente descritivo do conhecimento, ou seja, como o ser humano identifica e organiza os conceitos no seu modelo mental, é o que se mostra melhor compreendido e descrito pelos estudiosos de Ciência da Cognição e também de Inteligência Artificial. O modelo dinâmico, que é a forma como esses conceitos e essa organização são selecionados e aplicados para a resolução de problemas, ainda permanece pobremente explicado. Parte dessa dificuldade é originada do conhecimento tácito aplicado na resolução de problemas de forma não

completamente consciente pelo especialista e que, portanto, não pode ser reconhecido pelos métodos usuais de aquisição de conhecimento.

É objeto deste trabalho identificar os tipos de conhecimentos envolvidos na execução de tarefas em Petrografia Sedimentar e discutir soluções que auxiliem no processo de explicitação do conhecimento tácito, para permitir a aquisição de conhecimento nesse domínio. O estudo da perícia e de seu objeto, o especialista, traz alguma luz sobre a forma como o ser humano adquire e aplica o conhecimento armazenado influenciando as abordagens mais recentes da Engenharia de Conhecimento.

2.2 Sumário do capítulo 2

- *Conhecimento* é a informação e a forma como essa informação é utilizada para resolver problemas;
- Conhecimento possui um componente *descritivo*, ou estático, e um componente *dinâmico*, que descreve como as descrições são aplicadas na solução de problemas;
- O conhecimento pode ser classificado segundo seu nível de profundidade em conhecimento *superficial*, *conhecimento do domínio* e *conhecimento profundo*.
- O conhecimento pode ser classificado de acordo com os tipos de informações que constroem o corpo do conhecimento em *conhecimento declarativo*, *procedural*, *semântico*, *episódico* e *metaconhecimento*.
- *Informação* é a descrição dos conceitos do domínio inserido no seu contexto, porém sem ater-se a utilidade dessa informação;
- *Dado* é uma representação simbólica de um conceito do domínio sem considerações de contexto;
- *Domínio* é qualquer conjunto circunscrito de atividade.

3 Descrição do domínio da Petrografia Sedimentar

A exploração de petróleo, assim como a guerra, é uma das atividades humanas em larga escala na qual a aquisição, a distribuição e o uso de conhecimento especialista são mais críticos para a tomada de decisão. No Brasil, o elevado custo da exploração marinha em grandes profundidades agrega um valor ainda maior ao conhecimento que suporta as decisões a respeito das áreas de perfuração. Algumas das questões cruciais a serem respondidas durante a pesquisa e produção de novos campos de petróleo são: Qual unidade de rocha-reservatório (descrição a seguir) buscar; que procedimentos utilizar para a perfuração; quais os critérios e parâmetros para avaliação da rocha e dos fluidos que ela contém; e quais métodos serão utilizados durante o desenvolvimento dos campos de petróleo. A enorme quantidade de dados e as múltiplas áreas de perícia que são essenciais para a exploração geram um volume enorme de conhecimento estratégico, que as empresas petrolíferas empenham-se em manter, administrar e utilizar da forma mais efetiva.

Na exploração³ de um novo campo petrolífero dois conjuntos de informações são de fundamental importância (Figura 3.1):

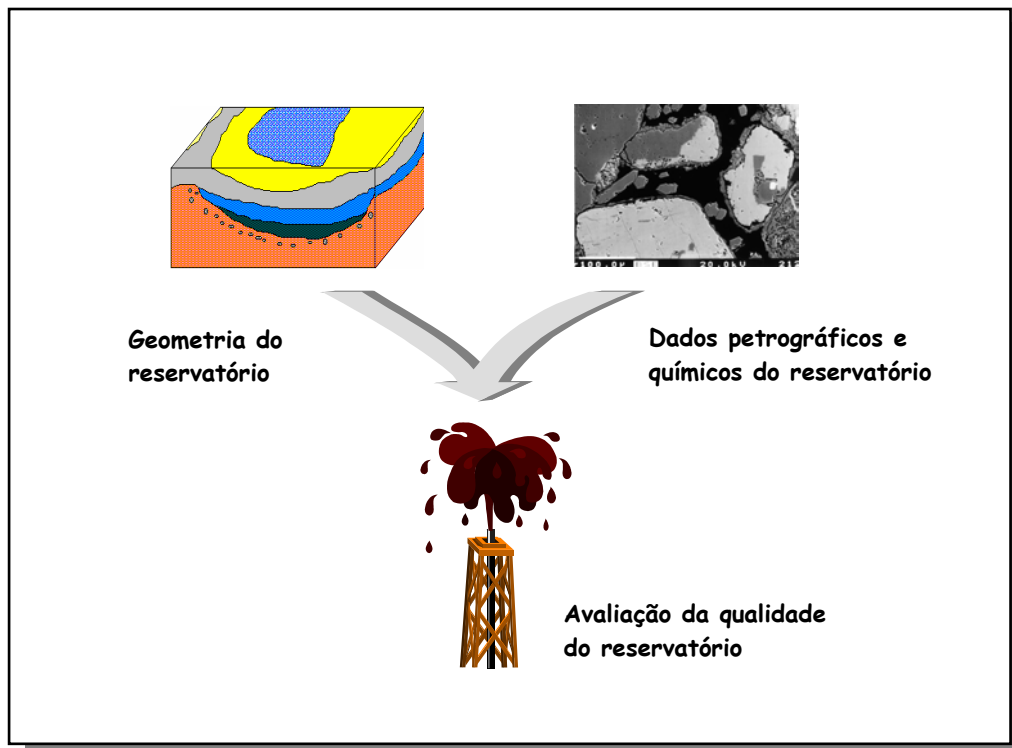


FIGURA 3.1 - Informações utilizadas para a avaliação da qualidade e dificuldade da extração de petróleo de um reservatório.

³ Exploração é o conjunto de métodos utilizados para pesquisar o potencial de um campo e determinar sua viabilidade econômica, enquanto *exploração* corresponde a extração do petróleo dos reservatórios.

O primeiro conjunto refere-se à *geometria* externa do reservatório de petróleo, ou seja, a extensão e forma da rocha que o contém, ou uma visualização do depósito em três dimensões. O conhecimento sobre a geometria dos depósitos é obtido através da investigação dos ambientes onde as rochas que compõem o reservatório foram geradas, desenvolvida através de estudos de perfis elétricos, testemunhos e principalmente através de prospecção sísmica. Ambientes do tipo fluvial, marinho ou desértico resultam em depósitos com formatos particulares, associados a processos específicos de deposição dos sedimentos. Esses dados de geometria são fundamentais para a cubagem, ou determinação da quantidade de petróleo do reservatório.

O segundo conjunto de informações descreve a rocha porosa que retém o petróleo, como se fosse uma esponja, chamada *rocha-reservatório*. A qualidade de um reservatório de petróleo é determinada pelas características originais dessa rocha - os minerais que a formam, o volume e forma dos poros (espaços que preservam fluidos dentro da rocha) as conexões entre esses poros - e os processos físico-químicos que possam ter modificado essas características. Essas informações são associadas aos dados petrofísicos (porosidade, permeabilidade) do reservatório e às características do próprio petróleo, sendo utilizadas para calcular a vazão – ou produtividade - dos poços produtores de petróleo, bem como para determinar as técnicas possíveis de extração.

As rochas-reservatório mais abundantes no mundo são as do tipo arenito, também chamadas rochas clásticas ou siliciclásticas. Essas rochas são formadas por grãos de areia transportados desde a erosão de uma rocha-fonte preexistente (constituintes detriticos) e também por minerais precipitados após a deposição, e ainda por espaços, ou poros, onde ficam contidos fluidos como água ou petróleo. O conjunto de processos físico-químicos que transformam os grãos soltos em uma rocha coesa é chamado de *diagênese*.

O estudo das rochas-reservatório é feito através da descrição sistemática de amostras de rochas extraídas de poços de exploração de petróleo, por meio da *Petrografia*. A Petrografia é uma atividade desenvolvida em laboratório, que integra os resultados de diferentes tipos de análises, que serão descritas a seguir.

Na *análise macroscópica*, as rochas são descritas em bruto, ou seja, a olho nu, a partir de amostras cilíndricas cortadas pela broca de perfuração, os *testemunhos* (Figura 3.2). A partir dessas amostras, são retiradas fatias de poucos centímetros, de onde são preparadas *seções* delgadas de 0.03 mm de espessura, que serão por sua vez analisadas com o uso de microscópios óticos de luz polarizada (Figura 3.3), gerando-se uma segunda descrição, a *análise microscópica*.

Na análise macroscópica, são descritas cerca de uma dezena de características visíveis a olho nu, como cor, estruturas, texturas, tamanho e orientação dos grãos ou presença de fósseis. Na análise microscópica, por sua vez, realizada com o auxílio de um microscópio ótico, são descritas com maior detalhe feições texturais e estruturais da rocha, com cerca de duas dezenas de características distintas. Além dessas, são também descritos individualmente cada um dos constituintes que formam a rocha, incluindo minerais, fósseis e poros. Perto de 50 diferentes constituintes podem ser reconhecidos e descritos em uma amostra de rocha, de um total de centenas de possíveis constituintes existentes em rochas clásticas. Os constituintes reconhecidos na análise microscópica de uma amostra de rocha são quantificados através do processo de contagem de pontos.



FIGURA 3.2 - Trecho de um testemunho de rocha extraídos de um poço de exploração de petróleo, utilizado para análise macroscópica.



FIGURA 3.3 - Imagem de uma seção delgada de rocha sedimentar clástica, do tipo arenito, ao microscópio ótico de luz polarizada.

Na contagem de pontos são quantificados os constituintes dispostos ao longo de linhas, a intervalos regulares, sobre a seção delgada (Figura 3.4). Essa análise permite obter a quantidade percentual de cada constituinte na amostra, que será posteriormente utilizada para sua classificação composicional. Além de avaliados quantitativamente, os constituintes são também descritos individualmente, em aspectos como forma, processos de alteração e arranjo entre os grãos detríticos (*fábrica*) e relações de ordem de formação entre os constituintes (*paragênese*).

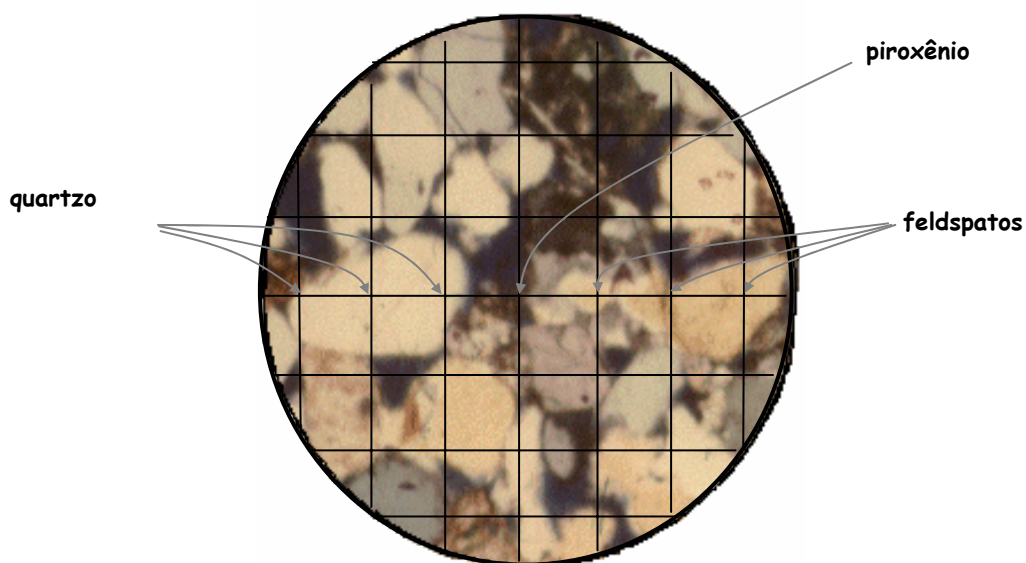


FIGURA 3.4 - O processo de contagem de pontos em uma seção delgada é realizado ao longo de linhas eqüidistantes sobre a amostra. O mineral identificado no cruzamento das linhas é adicionado ao total daquele constituinte particular.

A Figura 3.5 apresenta o relatório da descrição microscópica qualitativa e a Figura 3.6, o resultado da análise microscópica quantitativa de uma amostra de rocha obtido através da contagem de pontos. Além da análise macroscópica, análise microscópica qualitativa e da contagem de pontos, outras informações, como a análise petrofísica, análise química, fotografias ou anotações livres podem complementar a descrição petrográfica.

A composição mineral, os aspectos texturais, de fábrica, e de paragênese reconhecidos visualmente em uma amostra retratam as condições físico-químicas atuantes durante o processo de formação das rochas, dando pistas sobre a origem dos grãos, o ambiente deposicional e processos diagenéticos que as originaram, cuja identificação é o objetivo da tarefa dos geólogos ao realizar a descrição petrográfica. Essas características têm estreita correlação com a qualidade e homogeneidade de um reservatório de petróleo, permitindo fazer previsões sobre seu potencial econômico. Uma visão geral sobre descrição de rochas sedimentares pode ser obtida em (ADAMS, MACKENZIE e GUILFORD, 1995) e sobre a interpretação geológica destas rochas em (TUCKER, 1991) e (ZUFFA, 1985).

Um exemplo de classificação e interpretação de uma amostra de rocha produzidas por um especialista é apresentada na Figura 3.7.

Microscopy:**Texture:**

Grain size: modal class: medium sand. 8 % of gravel, 92% of sand, 0 % of mud.

Sorting: poorly-sorted

Grain shape: dominantly equant

Roundness: rounded to sub-angular

Sphericity: medium

Fabric: incipiently parallel-oriented

Packing : extremely loose

Packing index : P=19; Kahn (1956)

Contacts: dominantly point

Support: grain-supported to cement-supported

Detrital composition: (% table of quantitative petrography, annexed)

Quartz: dominantly monocrystalline, with slightly undulose extinction (plutonic/high grade metamorphic), some with strongly undulose extinction, and polycrystalline.

Feldspars: dominantly microcline, relatively fresh; perthite, orthoclase and plagioclase show extensive dissolution and kaolinization.

Rock fragments: dominantly granitic/gneissic quartzo-feldspathic plutonic; subordinate amounts of low grade metamorphic micaceous (phyllite/schist).

Accessories: essentially muscovite, intensely kaolinized and expanded, and heavy minerals (mostly opaques and garnet). Common pseudomatrix derived from the compaction of siliciclastic mud intraclasts, pervasively kaolinized and locally dissolved.

Absence of syndepositional detrital matrix.

Diagenetic Constituents

Thin and discontinuous quartz overgrowths, locally covered and corroded by calcite cement; some diagenetic quartz filling and healing fractures in quartz grains.

Abundant kaolin, as aggregates of booklets and vermicules, present as intergranular cement, replacing feldspar grains and filling partially feldspar dissolution pores, replacing and expanding mica flakes, and replacing clay pseudomatrix.

Common calcite as coarsely-crystalline mosaic (40-500 μm) cement filling intergranular pores, replacing partially detrital feldspars, corroding marginally quartz and dolomite cements, and locally replacing pseudomorphically kaolin. Staining indicates a very low Fe content.

Dolomite, as small and large rhombohedra (2-200 μm), filling partially intergranular pores, replacing and displacing partially kaolinized mica, and replacing microcrystalline siderite intraclasts. Staining indicates a ferroan dolomite/ankerite composition, with Fe content increasing to the edges of the crystals.

Coarsely crystalline to poikilotopic baryte (0.3-1 μm), filling intergranular pores and marginally replacing detrital grains, kaolin and calcite.

Microcrystalline anatase, replacing detrital heavy minerals and surrounding moldic pores, as residue of the dissolution of heavy mineral grains.

Bituminous residue filling partially large intergranular, moldic and oversized pores.

Porosity:

Macroporosity: Commonly intergranular, partially reduced mostly by calcite and kaolin cementation, and less by compaction, dolomite/ankerite and baryte cementation. Abundant secondary dissolution intragranular porosity derived from the partial dissolution of feldspar grains and plutonic rock fragments. Moldic and oversized pores from total dissolution of feldspar and heavy mineral grains. Some secondary intergranular porosity from the dissolution of clay pseudomatrix.

Microporosity common, mostly in kaolin aggregates.

Major framework composition: Q70.8F28L1.2. Original framework composition: Q55.9L43.1L1 (considering mostly detrital feldspar kaolinization/dissolution).

FIGURA 3.5 - Trecho da descrição microscópica de uma amostra de rocha da Formação Urucutuca, do Campo de Lagoa Parda da Bacia Espírito Santo, já transformado em percentual.⁴

⁴ Os dados estudados nesse projeto foram obtidos originalmente na Língua Inglesa e serão, portanto, descritos nesse formato ao longo deste texto.

Quantitative Petrography			
Component	%		
Total	100.0	Dolomite/Ankerite in mica	3.0
		Dolom./Anker. repl. sider. intracl.	1.3
Detrital Quartz	38.0	Anatase replacing grain	0.3
Quartz monocrystalline	27.7	Baryte	0.3
Quartz polycrystalline	3.7	Bitumen	0.3
Quartz in plutonic rock fragment	6.7	Macroporosity	23.0
Detrital Feldspar	15.0	Intergranular	10.0
Detrital K-feldspar	11.3	Intragranular in feldspar	7.3
Orthoclase	0.3	Intragranular in plutonic r.f.	2.0
Microcline	5.3	Intragranular in mica	1.0
Perthite	3.7	Dissolution of pseudomatrix	0.7
K-feldspar in plutonic r.f.	2.0	Moldic	1.0
Detrital Plagioclase	3.7	Oversized	1.0
Plagioclase monocrystalline	2.0	Microporosity	abundant
Plagioclase in plutonic r.f.	1.7	Intergranular volume	22.7
Plutonic r.f.	10.3	Grain volume	77.3
Total fine-crystalline lithics	0.7	Carbonate total	11.7
Micaceous metamorphic r.f.	0.7	Calcite total	7.0
Muscovite	0.3	Dolomite/Ankerite total	4.7
Opaques	0.3	Kaolin total	9.0
Other Heavy Minerals	0.3	Grain replacement/dissolution total	10.0
Diagenetics total	22.3	Granulometry	medium
Quartz overgrowth	0.3	Sorting	poor
Quartz fracture healing	0.3	Packing	19.0
Kaolin intergranular	2.0		
Kaolin in feldspar grain	2.3	QFL	53.7
Kaolin in mica	2.3	Q	70.8
Kaolin repl. pseudo matrix	2.3	F	28.0
Calcite coarse intergranular	6.3	L	1.2
Calcite coarse in feldspar	0.7	QFLo	68.0
Dolomite/Ankerite coarse intergr.	0.3	Qo	55.9
		Fo	43.1
		Lo	1.0

FIGURA 3.6 - Trecho da descrição microscópica quantitativa de uma amostra de rocha da Formação Urucutuca, do Campo de Lagoa Parda da Bacia Espírito Santo, obtida a partir da contagem de pontos sobre a seção delgada.

Apesar da nomenclatura de descrição sofisticada e de um certo consenso a respeito de quais informações são importantes de serem investigadas em uma amostra de rocha, não existe uma padronização no formato e do vocabulário das descrições petrográficas. As descrições são comumente feitas na forma de textos livres ou, no máximo, semi-estruturados, como os apresentados nas Figura 3.5 a 3.7, onde são enfatizados ou descritos de forma mais completa aqueles aspectos mais relacionados à pesquisa que está sendo realizada pelo petrógrafo.

Classification: coarse, granulose, poorly-sorted sandstone, kaolinic arkose (Folk, 1968).

Additional Data/Analyses:

Sample selected for microprobe analysis of the carbonates, scanning electron microscopy (SEM) and stable isotopes of the kaolin, and for optical and BSE photos .

Genetic Interpretations:

Depositional environment/process: texture suggests a tractive depositional process of high energy. Immature texture and original composition suggests a relatively proximal, first-cycle system with rapid transportation. Reworking and redeposition of finer-grained deposits.

Provenance implications: feldspathic original composition indicate a continental block provenance, that shall be shown also in Dickinson plots. Rock fragments composition suggest a dominantly plutonic/high grade metamorphic source area, with minor low grade metamorphic contribution. Rare fragmented glauconite peloids suggest reworking of shelf sediments, possibly by high energy turbidity currents, and deposition in a proximal channel turbidite system, which is suggested also by the texture and massive bedding structure. Mud intraclasts possibly reworked from slope deposits.

Diagenetic Sequence:

(order of processes/constituents; according criteria of paragenetic interpretation, explained in parenthesis).

(1) incipient compaction; generation of pseudomatrix by deformation of mud intraclasts, bending of mica flakes, local grain fracturing; (2) precipitation of quartz overgrowths and fracture healings; (3) pervasive dissolution of detrital feldspars kaolinization of feldspar, pseudomatrix and mica; dissolution of detrital heavy minerals and precipitation of microcrystalline anatase dissolution residue; (4) precipitation of dolomite/ankerite within kaolinized mica and intergranular pores; (5) precipitation of coarse calcite (engulfs and replaces previous phases); (7) limited dissolution, shown by the marginally dissolved borders of some carbonate crystals; (8) precipitation of coarse, replacive baryte (engulfs and replaces previous phases). Porosity reduced calcite, kaolin dolomite/ankerite and baryte cementation, and by moderate compaction (indicated by the packing proximity = 19, by the deformation of mica and generation of pseudomatrix), and enhanced extensively by feldspar dissolution.

Diagenetic environment/processes: early kaolinization and dissolution of feldspars, clay pseudomatrix and micas suggests a meteoric eodiagenetic (early, near-surface diagenetic) environment, which is surprising for the interpreted turbiditic depositional environment. Relatively early carbonate cements suggest return to marine porewaters influence. Baryte is apparently a mesogenetic (burial diagenetic) phase. The second phase of dissolution was generated possibly by aggressive mesogenetic solutions related to the maturation of organic matter, or to inorganic clay mineral reactions in adjacent shales.

FIGURA 3.7 - Classificação composicional e interpretação de uma amostra de rocha da Formação Urucutuca, do Campo de Lagoa Parda da Bacia Espírito Santo, obtida a partir da descrição e contagem dos constituintes presentes na amostra.

A padronização dos métodos, nomenclatura, formato da descrição e apresentação dos resultados das análises tem sido buscada há décadas, tanto por empresas de petróleo e de mineração que utilizam esses dados, como pelas universidades. A dificuldade de definir essa padronização deve-se tanto à complexidade da tarefa, como ao fato, demonstrado na seqüência deste trabalho, de que geólogos com diferentes níveis de experiência no domínio identificam e coletam informações petrográficas em diferentes níveis de abstração e com diferentes granularidades, para suportar seu processo de raciocínio.

Vencer essas dificuldades é um passo essencial para a definição de um padrão completo, independente e de larga aceitação que permita, por sua vez, construir sistemas de conhecimento que ofereçam suporte ao estudo de rochas-reservatório e sua avaliação econômica.

3.1 Sistemas simbólicos para interpretação geológica

A interpretação geológica corresponde ao reconhecimento dos produtos gerados por fenômenos naturais e a construção de uma teoria a respeito de como as forças naturais trabalharam para gerar esses produtos.

Embora não essencialmente, a maioria dos dados utilizados para interpretação correspondem a informações visuais, porém essas informações não são passíveis de descrições apenas baseadas em componentes geométricos, como cor, tamanho e forma. Muitos aspectos reconhecidos e utilizados pelo geólogo não possuem uma denominação formal e são aprendidos através apenas da experiência prática. O reconhecimento e utilização de feições sem denominação aceitos pela comunidade profissional é comum em domínios naturais, onde a construção de uma ontologia de larga aceitação progride de modo mais lento do que o desenvolvimento científico no domínio.

O projeto PROSPECTOR (DUDA et al., 1978; GASCHNIG, 1981; REBOH, 1981; CAMPBELL et al., 1982) é, com certeza a mais conhecida aplicação de Sistema Especialista no domínio da Geologia e influenciou todo o desenvolvimento da própria Engenharia de Conhecimento. O sistema foi desenvolvido para avaliar a possibilidade da existência de jazidas de minerais metálicos ou urânio, a partir de dados geológicos de campo (tipo de rocha, estruturas), laboratório (análise química de solos) e cartográficos.

A base de conhecimento do sistema PROSPECTOR foi construída com o conhecimento eliciado de 9 especialistas em modelos geoeconômicos de jazidas. O conhecimento foi adquirido através de extensas entrevistas com os especialistas, sendo a base de conhecimento construída de modo incremental.

A identificação de diferentes tipos, granularidades e papéis do conhecimento adquirido levou a codificação desse conhecimento em formalismos distintos, onde poderiam ser reconhecidos formatos primitivos dos conceitos e tipologia de domínio propostos pelas metodologias recentes da Engenharia de Conhecimento, descritos na Seção 5.1.1.- Modelo do Domínio e Ontologias. O conhecimento do sistema PROSPECTOR organiza-se em uma *base de conhecimento de propósito geral*, e uma *base de conhecimento de propósito específico* (REBOH, 1981).

- A *base de conhecimento de propósito específico* representa os modelos geológicos de ocorrência de cada um dos tipos de jazidas reconhecidas pelo sistema na forma de redes de inferência. As redes descrevem relações entre observações geológicas (ou evidências) e hipóteses de forma de ocorrência de jazidas, como por exemplo, o modelo de Cobre Pórfiro do Cerro de Pasco do Chile e o dos Sulfetos Maciços de Kuroko, na África. As relações são ainda rotuladas com o coeficiente de influência de uma determinada evidência sobre a hipótese e também pela probabilidade a priori da própria hipótese ser verdadeira (que pode ser visto como o *quanto um modelo de ocorrência de uma jazida é comum ou incomum de ser encontrado*). Esses coeficientes são tratados matematicamente segundo o método Bayesiano descrito em (DUDA, HART e NILSSON, 1976) e analisado posteriormente em (ABEL, M.

1986). Nesse método, tanto as feições *presentes* no problema influenciam na solução, como também a *ausência* de feições o fazem.

- A *base de conhecimento de propósito geral* representa a ontologia do domínio, na forma de um conjunto de conceitos, relacionamentos e restrições compartilhado por todos os modelos geológicos. Inclui a *taxonomia de domínio*, ou a hierarquia dos conceitos do domínio e seus sinônimos, como tipos de rochas, minerais e escala geológica. A taxonomia do domínio é representada como árvores, onde os nodos representam os conceitos do domínio e os arcos representam as relações entre esses conceitos. Fazem parte da base de conhecimento de propósito geral ainda as *declarações do domínio* ou agrupamentos de conceitos e arcos da taxonomia do domínio, os quais "*podem corresponder a nodos numa rede num 'nível mais alto', como as redes de inferência de propósito específico*" (REBOH, 1981 pag. 11). As declarações de domínio são representadas na base de conhecimento como redes semânticas particionadas, construídas a partir de conceitos definidos na taxonomia de domínio.

O desenvolvimento do Sistema PROSPECTOR, como outros projetos de Engenharia de Conhecimento em Geologia, evidenciou as necessidades de processamento de conhecimento que serão discutidas posteriormente em detalhe neste trabalho:

- o raciocínio é orientado por um conjunto de modelos construídos pela generalização de casos repetidamente resolvidos no domínio, que nesse caso, correspondem aos modelos geológicos de ocorrência de jazidas;
- uma taxonomia de conceitos de uso geral tem importante papel para a explicitação dos modelos geológicos, porém não desempenham papel central no processo de solução de problemas;
- os objetos que compõem a rede de inferência que suporta o raciocínio do sistema são construídos pelo "empacotamento" de conceitos e relações da taxonomia de domínio. Esses objetos não possuem nomes na taxonomia e são algumas vezes denominados por uma descrição extensiva de seus componentes (esquematizados na Figura 3.8), como "*um chaminé de riolito está presente*" ou "*hornblenda parcialmente alterada a biotita*" (REBOH, 1981). Correspondem a feições geológicas reconhecidas em campo e que são altamente significantes no processo de interpretação. Esses objetos são considerados pelos autores como unidades como unidades com identidade própria numa diferente dimensão de abstração, e especialmente associadas ao processo de solução de problemas.

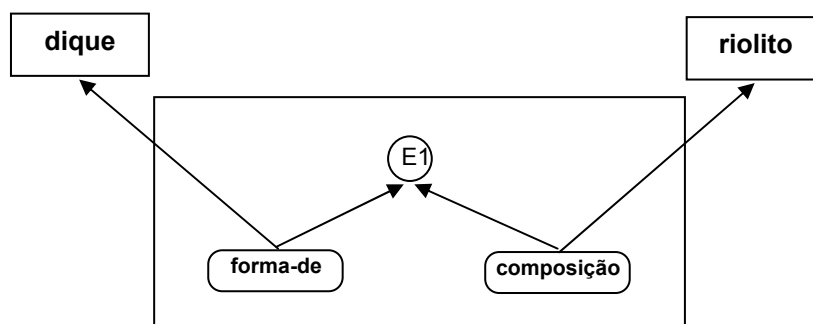


FIGURA 3.8 - Agrupamento de conceitos para compor objetos significativos em outra dimensão do problema.

O sistema PROSPECTOR alcançou o objetivo de deixar a fase de protótipo para efetivamente contribuir com interpretações geológicas para avaliação do potencial de jazidas. O desenvolvimento da base de conhecimento, no entanto, foi realizado de forma artesanal demandando anos de trabalho. Seu teste e execução consumiram excessivos recursos computacionais. A atualização e expansão do conhecimento mantido pelo sistema ficaram limitadas pela falta de modularização na base de conhecimento, de forma que o desenvolvimento incremental do sistema fosse feito de forma efetivamente independente. Uma melhor compreensão dos papéis dos tipos de conhecimento em cada uma das tarefas envolvidas na interpretação geológica seria o suporte adequado a essa modularização.

Outras aplicações de Sistemas Especialistas em interpretação geológica mostraram a importância da identificação e representação da ontologia do domínio como um conjunto de conceitos compartilhados, associada aos objetos que efetivamente dirigem a inferência.

Em XEOD, um sistema para determinar ambientes deposicionais clásticos (SCHULTZ et al., 1988), os autores sugerem que grande parte da "inteligência" aparente do sistema corresponde à utilização do jargão técnico. O significado de um termo inclui tanto seu contexto de uso (conhecimento inferencial) como seu relacionamento com os demais termos (conhecimento declarativo). Uma proposta de agrupamento de feições geológicas associadas a uma interpretação, no caso à identificação de uma *fácies deposicional*, também é feita nesse projeto, à exemplo do PROSPECTOR. *Fácies* (o termo tem origem em face, da Língua Italiana) correspondem a uma tentativa de formalização, em Geologia, de aspectos visuais repetidamente encontrados em certos ambientes deposicionais. Em XEOD, o sistema realiza um pré-processamento das feições, de forma a reconhecer os agrupamentos significantes e fornecê-los ao mecanismo de inferência para reconhecimento dos ambientes deposicionais.

O pré-processamento dos dados do problema buscando agrupar dados descritivos de modo a identificar feições visuais significativas é um recurso aplicado também no sistema DIPMETER ADVISOR (SMITH, 1984) e no sistema de Kuo e Startzman (KUO e STARTZMAN, 1987) ambos aplicados à interpretação de dados sísmicos de poços de exploração de petróleo.

Trabalhos tradicionais no domínio da Geologia evidenciaram a necessidade de tratamento diferenciado entre os aspectos passíveis de descrições e aqueles efetivamente utilizados pelo especialista. Esses aspectos são descritos pelos autores como possuindo "*granularidades*" ou "*níveis de abstração*" distintos. Nas aplicações reais, que demandaram bases de conhecimento de grande porte, tornou-se desde cedo clara a necessidade da separação do conhecimento declarativo, através da construção das taxonomias de domínio, e procedural, representado como regras ou redes de inferência. Essa necessidade inspirou os recursos mais recentes da Engenharia de Conhecimento, levando a proposta de diferentes classes de representações para os diferentes tipos de conhecimento e também a representação explícita do conhecimento inferencial através de estruturas de inferência (esses recursos serão discutidos em maior detalhe no Capítulo 5).

O tratamento de conhecimento em domínios complexos e ainda imaturos como a Geologia, tem considerado diferentes alternativas para produzir sistemas que auxiliem na solução de problemas de interpretação. Braunschweig and Brendal em (BRAUNSCHWEIG e BRENDAL, 1996) ressaltam que o processamento simbólico do conhecimento para exploração de petróleo passa pela identificação e formalização de

um vocabulário compartilhado porém dependente de domínio. À luz da Engenharia de Conhecimento atual, essa tarefa vem sendo resolvida através do desenvolvimento das ontologias, aqui exemplificada no trabalho de (MIKKELSEN , STABELL e SINDING-LARSEN, 1996). Mikkelsen e colaboradores propõem alternativas ao paradigma tradicional de Sistemas Especialistas que atingem conclusões de forma independente, propondo sistemas que apenas suportam a elaboração dessa conclusão pelo usuário, disponibilizando toda a informação ou mesmo conhecimento para auxiliar nessa elaboração. Os experimentos cognitivos utilizados para avaliar a qualidade da argumentação conduzida pelo sistema, ao orientar o usuário, forneceram subsídios para propor representações de conhecimento que justifiquem as conclusões de acordo com o nível de conhecimento do usuário.

A Petrografia, comparando com a Geologia como um todo, pode ser considerada um domínio mais maduro, com uma terminologia e métodos de análises mais formalizados. Ainda assim, as dificuldades para a aquisição e representação de conhecimento são significativas. O projeto SISYPHUS III (ERDMANN, 1998; GAINES, 1998; GAPP e PUPPE, 1998; JANSEN , SCHREIBER e WIELINGA, 1998; RICHARDS e MENZIES, 1998; SHAW e GAINES, 1998) apresenta um experimento para o desenvolvimento de uma base de conhecimento para classificação de rochas ígneas. Esse projeto faz parte dos assim chamados *Experimentos do Sisyphus* que objetivam comparar e avaliar diferentes métodos e técnicas utilizadas para construção de Sistemas Especialistas. Em sua fase III, volta-se especialmente à análise dos métodos de aquisição de conhecimento, técnicas de eliciação e seus resultados, tendo como domínio de análise a petrografia ígnea.

Gappa e Puppe em (GAPPA e PUPPE, 1998) identificam as dificuldades para adquirir e modelar conhecimento em petrografia no projeto Sisyphus III:

- a classificação de rochas depende fortemente da classificação dos minerais que existem na rocha, e identificar um mineral é um problema de classificação não-trivial em si mesmo;
- a identificação do mineral e a classificação da rocha não são problemas independentes entre si, quando o especialista suspeita ser um determinado tipo de rocha, ele busca pelos minerais que comprovem essa hipótese;
- os descritores utilizados por diferentes especialistas possuem diferentes níveis de detalhe;
- as feições descritas são grandemente interdependentes entre si;
- a utilização de técnicas de aquisição de conhecimento baseadas na transcrição de entrevistas não é passível de ser aplicada, uma vez que a identificação de minerais na rocha é fortemente dependente de imagens de microscópio;
- o reconhecimento das feições descritas na literatura é muito enigmático e não pode ser alcançado pela simples aplicação dos procedimentos de reconhecimento;
- os critérios utilizados para classificação são principalmente qualitativos e incertos, e não permitem medição direta (uma exceção foi o parâmetro densidade da rocha, medido através do deslocamento de água que a amostra causa);
- a verificação da base de conhecimento para classificação de rochas é dependente da correção na identificação de feições da rocha, a qual por sua vez não pode ser verificada.

Jansen, Schreiber and Wielinga em (JANSEN , SCHREIBER e WIELINGA, 1998 Section 7 - Discussion) descrevem outras características do domínio da Petrografia e dificuldades associadas:

- é um domínio rico, com terminologia padronizada, porém especialistas utilizam diferentes idiosincrasias e os procedimentos de classificação dependem da informação disponível, do objetivo e do nível de perícia da pessoa que realiza a classificação;
- a maior dificuldade refere-se à definição de uma estrutura representacional coerentemente particionada do domínio do conhecimento;
- domínios que envolvem atributos perceptuais e semi-quantitativos necessitam de ontologias separadas para os atributos e seus domínios de valores;
- a integração dessas ontologias para solução de problemas ainda é uma questão em estudo.

Como apresentado acima, o projeto SISYPHUS III descreve as principais dificuldades para a aquisição e construção de uma base de conhecimento em domínios onde o conhecimento tem um forte componente visual, como é tipicamente o caso da Petrografia. As dificuldades listadas foram também encontradas na interpretação diagenética de rochas-reservatório, que é a aplicação deste projeto, porém fatores adicionais tornam a aquisição de conhecimento ainda mais complexa.

A interpretação diagenética é construída, não apenas pela identificação independente de minerais e feições, mas sim pela *interação* desses minerais e feições na rocha, chamada de *relação paragenética*. A identificação mineralógica em rochas ígneas (como as do Projeto SISYPHUS) ou sedimentares (como as desse trabalho), embora não seja uma tarefa trivial, está razoavelmente estabelecida na literatura especializada e, como afirma (JANSEN, SCHREIBER e WIELINGA, 1998), fornece uma alternativa confiável à eliciação de conhecimento de especialistas. A identificação de relações paragenéticas em rochas sedimentares, no entanto, pertence às fronteiras da Ciência, não estando disponíveis guias ou regras reconhecidas para efetivar ou verificar a execução da tarefa. As dificuldades na aquisição do conhecimento que utiliza feições visuais são ampliadas pela inexistência de uma ontologia do domínio que permita obter uma descrição não-ambígua dos aspectos visuais utilizados na inferência.

3.2 Abordagens não-simbólicas para interpretação geológica

Certas atividades de prospecção geológica são altamente geradoras de dados, como a prospecção sísmica, análise química de solos ou rochas. Nesses domínios, a extensa coleção de casos permite a aplicação de técnicas de classificação que têm produzido resultados notáveis para interpretação geológica.

Redes neurais supervisionadas têm sido aplicadas principalmente para problemas de classificação e predição, como interpretação litológica e detecção de ruídos (dados sem significado geológico) em dados sísmicos brutos. Já as redes não-supervisionadas e conjuntos difusos têm sido utilizados na identificação automática de anomalias ou objetos em perfis sísmicos e também na segmentação de texturas sísmicas. Exemplos de aplicações desse tipo são descritos em (DE GROOT, 1996; GALLI , PONZI e RIVA, 1996) entre outros.

Uma tarefa mais complexa é a correlação de perfis de poços de forma a identificar a mesma unidade sedimentar (camada de rocha) em diferentes poços perfurados em uma área de prospecção. A correlação entre unidades permite definir o comportamento espacial de um reservatório, que é uma tarefa de extrema complexidade. Uma unidade sedimentar identificada num poço de prospecção pode apresentar heterogeneidades notáveis lateralmente, mudando a litologia, a forma, ou mesmo desaparecendo abruptamente. (BAYGÜN , LUTHI e BRYANT, 1996) propõem uma forma de correlação automática utilizando redes neurais. Uma rede multinível e alimentada adiante (*forward feed*) é treinada para reconhecer uma determinada unidade sedimentar representada por um padrão particular num perfil sísmico. O treinamento é realizado fornecendo um conjunto de perfis sísmicos que tanto apresentam como não apresentam aquela unidade, com a respectiva saída correta. Após o treinamento a rede produz uma saída 1, quando a unidade sedimentar está presente num perfil, e uma saída 0, quando não está presente, com poucas discrepâncias da realidade. Porém cada nova unidade a ser correlacionada exige um novo treinamento.

Conjuntos difusos igualmente têm sido utilizados para interpretação de perfis sísmicos. (BAYGÜN, LUTHI e BRYANT, 1996) apresenta uma aplicação de conjuntos difusos para reconhecer unidades sedimentares nos perfis. O número de unidades esperadas num perfil é fornecida pelo usuário, a partir do conhecimento geológico prévio sobre a região e o sistema busca reconhecer o padrão típico para cada unidade, de acordo com algum atributo de interesse (na aplicação, foi utilizado volume de lama na unidade).

O trabalho de (GARCIA , MACIEL e FERRAZ, 2000) apresenta um sistema híbrido para apoiar a interpretação de rochas carbonáticas. O sistema utiliza uma rede neural de três níveis, com retropropagação para identificação de fósseis em seções selecionadas pelo usuário em imagens de seções delgadas de rochas. O sistema realiza o tratamento da imagem e aplica métodos matemáticos para extração de contorno do objeto selecionado pelo usuário. Esse contorno será fornecido como entrada para a rede neural, que apontará uma ou mais das 41 classes treinadas pela base. O sistema oferece uma aproximação inicial das classes de bioclastos possíveis que, interativamente, serão refinadas através da integração com conhecimento representado simbolicamente.

A exemplo das aplicações citadas, técnicas de classificação são adequadas para o processamento de imagens e sinais onde:

- existe um volume de casos representativo do domínio de forma a permitir o aprendizado automático;
- os atributos utilizados para classificação são passíveis de medidas diretas sobre os dados, tais como atributos geométricos (cor, forma, tamanho, volume);
- existe um ou poucos atributos preferenciais que têm forte relação com a classe a ser identificada.

Essas características das aplicações limitam enormemente o uso de redes neurais ou métodos de classificação automática para interpretação geológica. Uma discussão complementar sobre a adequação das abordagens simbólica e conexionista para outras aplicações pode ser obtida em (HONAVAR, 1995).

Inicialmente, poucos métodos exploratórios em Geologia produzem bases de dados homogêneas e confiáveis em volume suficiente para permitir a aprendizagem automática. À exceção da exploração geofísica e geoquímica, domínios onde os métodos de classificação vêm sendo utilizados por mais de uma década, e da

interpretação de imagens produzidas por sensoriamento remoto e aerofotogeologia, poucas outras áreas fornecem bases de dados para treinamento.

Apesar dos intensos esforços aplicados por empresas de exploração de recursos minerais, poucas são as bases de dados petrográficos disponíveis. Para as poucas iniciativas, os problemas de definição de uma taxonomia compartilhada faz com que as descrições, quando armazenadas, guardem terminologias e formatos distintos. Como uma descrição é elaborada para um fim específico, mesmo duas descrições da mesma amostra de rochas podem conter informações diferentes. Os problemas práticos de homogeneizar as bases de informação tornam-se dessa forma maiores que os benefícios da aprendizagem automática podem trazer.

Mesmo nos casos em que é possível obter um volume de casos que permita a aplicação de uma técnica de classificação, como no caso de imagens de seções delgadas ao microscópio ótico, as técnicas de classificação esbarram num outro problema. Diferentes conjuntos de atributos são utilizados para reconhecer cada uma das classes. Na aplicação do ADDGEO, por exemplo, a morfologia foi aplicada para classificação de bioclastos. Porém um geólogo considera a morfologia do fóssil um atributo relevante apenas para a identificação de duas grandes classes de fósseis. Nas demais, o atributo é considerado irrelevante, ou relevante apenas se combinado a outras informações como estrutura interna da concha, dimensão do bioclasto, ou ainda atributos não passíveis de medidas diretas, como a idade ou ambiente provável da unidade sedimentar. A seleção dos atributos relevantes e a própria interpretação da rocha não são problemas independentes entre si, reafirmando as proposições de Gappa e Puppe descritas acima. A consideração de uma hipótese de interpretação interfere na seleção dos atributos para análise.

A seleção dos atributos significantes para um determinado problema é uma das características cognitivas fortemente desenvolvidas na perícia em Geologia. A forma de combinar esses atributos nos conjuntos que suportam a solução complementa ainda mais as habilidades do especialista e permite atingir uma alta qualidade de solução, ainda não igualada por Sistemas Especialistas. Essas habilidades são reconhecidas e exploradas nas seções subseqüentes deste trabalho.

No domínio da Petrografia Sedimentar de rochas siliciclásticas, as descrições de amostras de rochas são habitualmente realizadas através de textos fracamente estruturados, onde a seleção dos aspectos da rocha a serem descritos é motivada pelo objetivo da descrição. Essas descrições não são formalmente preservadas, vindo a fazer parte de relatórios, compondo resumos ou sendo mantidas pelo próprio petrógrafo. A análise sobre umas poucas dezenas de descrições, com a intenção de aplicar técnicas de classificação demonstrou:

- a variabilidade de valores dos atributos exigiria um volume de descrições da ordem de milhares de descrições completas para obter uma representatividade do domínio;
- os atributos descritos, quando tomados isoladamente, não eram discriminantes da solução;
- os atributos descritos, mesmo agrupados, não eram discriminantes da solução; ou seja, atributos efetivamente utilizados para interpretação foram omitidos (a princípio não-intencionalmente, mas porque não havia uma terminologia formal para descrever o aspecto visto na rocha);
- os atributos apontados pelo especialista como significantes para a solução, mudavam juntamente com a solução; ou seja, para uma mesma classe de solução,

diferentes valores dessa classe eram inferidos por diferentes atributos, como na Figura 3. 9.

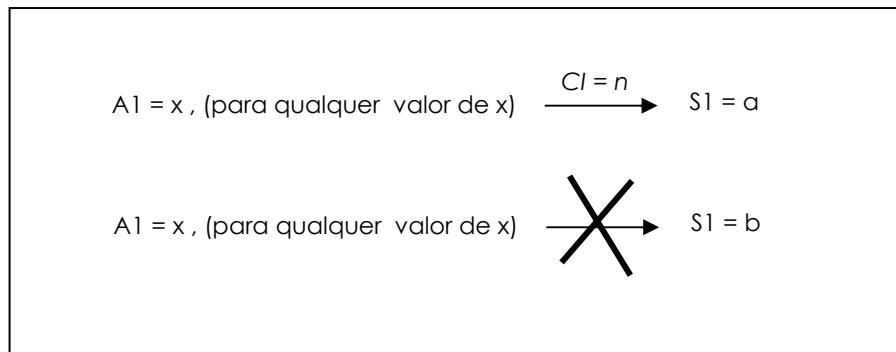


FIGURA 3.9 - Um atributo *AI* qualquer implica uma solução *SI*, com valor *a*, em algum coeficiente de influência *CI*. A mesma implicação não existe para *SI* com valor *b*.

As características da forma de solução de problemas em Petrografia foram exploradas neste trabalho, sendo investigadas as características cognitivas que as suportam ou produzem. A partir do resultado dessa análise, é proposta uma forma de aquisição e processamento de conhecimento que permitam tratar esse domínio computacionalmente. A abordagem utilizada foi realizar o tratamento *simbólico* da informação, em detrimento às técnicas de classificação baseadas em métodos numéricos ou métodos de processamento de imagens. A argumentação para essa decisão baseia-se nos aspectos descritos abaixo.

- Dificuldade em obter um conjunto com uma quantidade de descrições de amostras de rocha representativo do domínio. É possível obter-se um conjunto de pouco mais de uma centena de descrições quantitativas (com a quantidade percentual dos minerais presentes). Porém, a presença ou quantidade de minerais, embora utilizada para classificar a rocha tem pouca significância em termos de interpretação geológica, quando comparada aos aspectos texturais.
- Mesmo as descrições qualitativas obtidas não continham a descrição de todos os aspectos significantes para a solução do problema, sendo portanto, impossível evidenciar as correlações entre informações descritas e interpretações através de métodos numéricos.
- Não havia atributos descritos, isoladamente ou em conjunto, que fossem significantes *per si* (independentes de valor) para interpretação e que pudessem ser utilizados como objeto de uma técnica de classificação.
- A quantidade e complexidade dos aspectos visuais reconhecidos em uma amostra de rocha e a falta de uma metodologia de interpretação, colocam a tarefa de interpretação geológica, através de interpretação de imagens por computador, além do atual estado da arte. Alguns aspectos da interpretação, como o reconhecimento e medição de poros em reservatórios, definição da direção principal de linearidades em rochas ou identificação de contornos em fósseis ou grãos têm sido implementados com sucesso. Porém, tarefas simples, mas fundamentais para interpretação, como a identificação mineral ou classificação de texturas em uma rocha tem desafiado cientistas da computação.

- A disponibilidade de um especialista no domínio que apontou correlações importantes entre evidências e conclusões e identificou rapidamente aspectos irrelevantes do problema, os quais exigiriam grande esforço para serem extraídos através das técnicas de classificação.

A abordagem simbólica permitiu realizar um tratamento sobre a informação para transformar o conhecimento tácito (utilizado de forma não consciente para inferência) em explícito. Esse passo mostrou-se fundamental para construir a ontologia do domínio que possibilitará posteriormente a aplicação de técnicas de classificação sobre este domínio. A abordagem simbólica é a adequada também quando, como neste trabalho, tem-se por objetivo compreender melhor os mecanismos cognitivos da perícia, contribuindo não só para a construção de sistemas, mas com os métodos de treinamento dos profissionais do domínio.

3.3 Sumário do capítulo 3

O conhecimento de domínio tratado neste projeto compreende:

- Os conceitos do domínio e sua semântica, ou seja, quais conceitos são importantes para essa aplicação e qual o seu papel no domínio. Os conceitos do domínio referem-se especialmente à rocha, unidade, região e poço de onde provém a amostra, e aos constituintes detríticos, diagenéticos e fósseis que a formam.
- Quais as características desses conceitos e que gama de valores ou variações essas características podem assumir para ainda representarem objetos válidos do domínio. Aqui estão incluídos aspectos como texturas, estruturas e outros definidos pelas restrições impostas pela natureza na formação de uma rocha sedimentar clástica.
- Os relacionamentos entre os aspectos descritivos (minerais, texturas, estruturas) e os processos sedimentares que os geraram. Cada aspecto ou conjunto de aspectos reconhecido na rocha está associado a um processo que ocorreu durante a deposição ou diagênese do sedimento. A interpretação desses aspectos para reconstruir a história de formação da rocha, como um processo puramente investigativo, é o conhecimento de mais alto nível tratado neste projeto.
- Os métodos ou estratégias particulares de solução que são aplicados a cada uma das tarefas desse domínio. Esses métodos incluem procedimentos, algoritmos de classificação composicional de rochas e também métodos heurísticos que utilizam conhecimento incerto para propor uma interpretação possível para os aspectos descritos.

Entre as dificuldades mais significativas para lidar com esses diferentes tipos de conhecimento estão:

- A falta de um vocabulário completo e preciso de descrição do domínio.
- O fato de que alguns conceitos aplicados no processo de solução correspondem a feições perceptuais que não possuem denominação própria no vocabulário do domínio e exigem ontologias separadas para representação.

- Conceitos perceptuais não são passíveis de aquisição via entrevista ou protocolos verbais.
- A interpretação da rocha depende da identificação dos minerais e das texturas dessa rocha, que é um problema não trivial em si. Além dos dados serem de difícil coleta, a identificação do mineral é dependente da própria interpretação das rochas (a identificação de um mineral indica um determinado ambiente e a suposição do ambiente sugere um conjunto de minerais).
- Os critérios de interpretação são qualitativos e incertos.

Os Sistemas Especialistas para interpretação geológica implementados nas três últimas décadas apresentaram algumas características comuns que refletiram o tipos de conhecimento listados acima:

- abordagem simbólica para solução de problemas;
- modelagem de uma base de conhecimento de propósito geral com o fim de representar os conceitos compartilhados do domínio;
- base de conhecimento de propósito específico para modelar a tarefa;
- modelo de representação de objetos em dimensões diferentes, para tratar aspectos do problema que se referem ao objeto como um todo ou à alguma composição de seus detalhes;
- métodos particulares aplicados antes da inferência propriamente dita para reconhecer esses objetos;
- tratamento de incertezas associado a um ou mais métodos de inferência.

A aplicação de abordagens não simbólicas a problemas de interpretação geológica exige algumas características comuns da tarefa em foco:

- um volume de casos (problemas e soluções) representativos do domínio;
- os atributos utilizados para classificação devem ser passíveis de medidas diretas sobre os dados, sejam elas qualitativas ou quantitativas;
- devem existir um ou poucos atributos preferenciais que apresentem uma forte relação com as classes a serem identificadas.

As vantagens de utilizar uma abordagem simbólica para a Engenharia de Conhecimento no domínio da Petrografia Sedimentar inclui:

- a aquisição não é dependente da obtenção de um volume suficiente de casos representativos do domínio;
- a possibilidade de explicitar conceitos perceptuais do domínio e tratá-los em uma ontologia;
- a possibilidade de utilizar conhecimento compilado e organizado eliciado de um especialista do domínio;

- a possibilidade de modelar relacionamentos complexos de causa e efeito como são os utilizados para interpretação geológica;
- a possibilidade de modelar métodos particulares de solução de problemas adequados à tarefa de interpretação em questão;
- possibilidade de adquirir uma maior compreensão dos mecanismos da perícia de forma a contribuir com os métodos de treinamento de geólogos na tarefa de interpretação geológica.

4 A Perícia

Perícia (do inglês *expertise*) é a capacidade de aplicar habilidades intelectuais para resolver problemas em domínios estratégicos, com um desempenho e qualidade de solução superiores à média dos profissionais da área. Capturar essas habilidades, estreitamente relacionadas à aplicação do conhecimento, e reproduzi-las através de mecanismos próprios em computador tem sido o objetivo maior da Engenharia de Conhecimento.

O desenvolvimento da Engenharia de Conhecimento tem se dado através da crescente compreensão dos mecanismos da perícia acompanhado da proposta de modelos próprios para reproduzir o desempenho humano de solução de problemas nos Sistemas Especialistas. Nessa linha, foram desenvolvidos os trabalhos de (KOUBEK e SALVENDY, 1991; COOKE, 1992; REGOCZEI e HIRST, 1994; HOFFMAN , FELDOVICH e FORD, 1997; GARDNER et al., 1998). Abordagens já tradicionais, como raciocínio baseado em casos, resultaram da compreensão do mecanismo cognitivo de aprendizado e memória desenvolvido por Shank (SCHANK, 1982).

A compreensão dos mecanismos cognitivos da perícia coopera ainda para ampliar a eficácia do processo de transmissão dessas habilidades de um especialista para aprendizes e estudantes, ao propor novas técnicas de ensino e aprendizagem.

A perícia é resultado da aplicação eficiente de dois tipos distintos de habilidades: uma sensorial, que permite o reconhecimento de padrões externos ligados ao domínio do problema, e outra intelectual, que demanda processos de raciocínio nos mais altos níveis mentais. Assim, um músico reconhece padrões melódicos, um esportista possui uma percepção espacial superior do espaço que o rodeia, um matemático reconhece trechos de equações como átomos de informação, enquanto um médico ou um geólogo utilizam padrões visuais para disparar seus métodos de solução de problemas. Esses padrões selecionam os caminhos iniciais de um processo de raciocínio fundamentalmente abstrato que, em muitos casos, assemelha-se para os diferentes domínios do conhecimento.

O especialista utiliza os padrões externos reconhecidos no problema como “pistas” iniciais de um processo investigatório que aplica busca progressiva e regressiva combinadas, orientada por um modelo completo e detalhado do domínio. O modelo do domínio contém a representação do conhecimento necessário para a solução do problema e da própria compreensão das leis que regem o domínio. O conjunto dos mecanismos de representação de conhecimento - mais as formas combinadas de casamento de padrões, raciocínio dedutivo, indutivo e analógico, entre as principais identificadas - determinam as diferenças fundamentais entre novatos e especialistas. Essas diferenças apontam para os fatores indispensáveis para atingir níveis de perícia na solução de problemas e indicam a direção dos esforços de implementação de sistemas inteligentes.

Especialistas são objeto de interesse desde o século passado, onde eram melhor representados por artesãos hábeis no seu ofício. O estudo da perícia, visto hoje como uma habilidade intelectual para resolver problemas com desempenho superior, difundiu-se nos anos 60 impulsionado, entre outros fatores, pelo desenvolvimento dos primeiros Sistemas Especialistas. No esforço de reproduzir a perícia, fez-se necessário abrir a “caixa preta” da inteligência humana. Nessa época, a visão da Psicologia Comportamentalista sobre a inteligência começou a ser confrontada com as teorias cognitivistas de autores como Newell, Shaw e Simon (NEWELL , SHAW e SIMON,

1958). Ao contrário de considerar a mente humana como um monolito somente visível através das respostas a estímulos apresentados (visão comportamental), os psicólogos passaram a analisar os processos internos da mente e tentar modelá-los (visão cognitivista).

Essa fase foi marcada pela suposição de que a inteligência superior era resultado de uma maior capacidade em processar informações, como afirmavam os trabalhos de (STERNBERG, 1977) e (JENSEN, 1982). Essa visão foi popularizada através dos testes de QI (Quociente de Inteligência) nos anos 80, embora até hoje não tenha sido possível demonstrar uma relação positiva entre altos graus em testes de QI e um conseqüente desempenho superior nas artes, ciências ou profissões de alto nível técnico (ERICSSON e SMITH, 1991).

Os primeiros resultados positivos em identificar fatores cognitivos positivamente associados à perícia resultou dos estudos de um grupo russo liderado por De Groot (DE GROOT, 1965) e posteriormente ampliado por Chase e Simon (CHASE e SIMON, 1973). Em extensos experimentos realizados com jogadores de xadrez foi demonstrado que os campeões possuem uma memória excepcional para memorizar configurações de peças no tabuleiro, desde que essas peças estejam dispostas em alguma configuração possível de jogo. Em contraste, não foi determinada nenhuma diferença adicional em relação à memória geral, à forma de processar informação, ou ao nível de QI entre enxadristas especialistas e novatos.

Não obstante os avanços da Psicologia Cognitiva subseqüentes ao trabalho de De Groot, os fatores que determinam a perícia ainda não foram completamente desvendados, tampouco o que existe de comum entre peritos de qualquer domínio. Nessa tentativa, foram realizados estudos focando diferentes fatores. Algumas pesquisas buscaram demonstrar que especialistas possuem características inatas que podem ser identificadas desde a infância, porém não foram alcançados resultados conclusivos. Entre os estudos e resultados mais marcantes nas últimas décadas, podem ser apontados:

- Não existe uma relação entre características inatas ou herdadas, observadas desde a primeira infância e altos níveis de perícia (GUILFORD, 1967). Mesmo características fisiológicas como uma musculatura diferenciada ou o ouvido absoluto (ERICSSON e FAIVRE, 1988) pode ser desenvolvida sob treinamento.
- Não existe relação entre características individuais genéricas e inatas, como memória (KELLEY, 1964), capacidade de concentração, velocidade de reação, raciocínio lógico ou aspectos de personalidade (CATTEL, 1963), com desempenhos excepcionais (ERICSSON e SMITH, 1991).
- Existe uma relação positiva, no entanto, entre o desenvolvimento de algumas características cognitivas e o aperfeiçoamento da perícia. Essas características são particulares a cada domínio e podem ser evidenciadas nos testes com especialistas, intermediários e novatos, como nos experimentos com xadrez, Física, Medicina, Esporte, Dança, Música e Literatura descritos em (ERICSSON e SMITH, 1991).

O objetivo do estudo cognitivo da perícia é fornecer subsídios para a forma de treinamento que deve ser aplicada na formação de profissionais. Contribui ainda para apontar que conteúdos formam a base para a perícia, bem como quais métodos de ensino potencialmente permitem a assimilação mais eficiente desses conteúdos. Mais modernamente, como desenvolvido neste trabalho, a compreensão dos conteúdos e processos de inferência apontados nos estudos da perícia permite que estes sejam parcialmente emulados nos Sistemas Especialistas, permitindo a multiplicação de

recursos raros e de difícil formação. Finalmente, o objetivo maior que motiva a obsessiva investigação que o ser humano faz de si mesmo é o de compreender a fonte de sua supremacia no meio em que vive: a inteligência humana, superior e única nesse meio.

Os exemplos práticos de tarefas especialistas aqui estudados referem-se ao estudo de rochas sedimentares clásticas que servem como rochas-reservatório de petróleo no Brasil e em outros países produtores. A tarefa especialmente estudada refere-se à descrição de amostras de rochas e à forma como a informação assim obtida é utilizada pelo geólogo para atingir conclusões úteis a respeito da qualidade da rocha como reservatório de óleo ou gás. Uma visão geral sobre descrição de rochas sedimentares pode ser obtida em (ADAMS, MACKENZIE e GUILFORD, 1995) e sobre a interpretação geológica destas rochas em (TUCKER, 1991) e (ZUFFA, 1985). Esses exemplos, bem como os fatores determinantes da perícia são comparados com outros domínios intensivos em conhecimento descritos na literatura de Psicologia Cognitiva, especialmente os domínios da Física e da Medicina. Comparações menores são feitas com outras especialidades que demandam maiores habilidades mecânicas ou sensoriais do que intelectuais, como esportes, dança e música.

Do ponto de vista cognitivo, a Petrografia Sedimentar pode ser classificada como um domínio complexo, segundo descrição de (ERICSSON e SMITH, 1991), ou seja, são domínios intensivos em conhecimento e pouco estruturados. Domínios intensivos em conhecimento demandam, no processo de solução de problemas, grande quantidade de conhecimento prévio do resolvidor sobre o assunto, bem como uma profunda análise das informações relativas à tarefa, baseada em raciocínio analógico e processos abstratos de alto nível, para desencadear o processo de solução. Comparativamente, exigem menor habilidade sensorial, motora ou de memória, do que intelectual. Por sua vez, domínios pouco estruturados são domínios onde a forma de solução de problemas não pode ser formalizada através de uma representação matemática (como é o caso da Física), uma seqüência de passos ou um algoritmo (como na Engenharia). Normalmente são atividades ligadas às Ciências Naturais, onde a solução de problemas baseia-se grandemente em informações perceptuais e utiliza métodos fracos de solução como tentativa e erro e análise de meios e fins. A forma de solução em domínios complexos combina métodos como casamento de padrões perceptuais, porém suportados por sofisticadas estruturas de representação do conhecimento da aplicação. São os métodos aplicados por profissionais de Medicina, Biologia e Geologia, entre outros.

A forma de medir o desempenho de um especialista em solução de problemas depende de qual aspecto da perícia é relevante para a análise em questão. Este trabalho propõe que os níveis de perícia sejam avaliados de acordo com três diferentes abordagens: contexto social, especialista versus novato e características cognitivas, que serão descritas abaixo.

4.1 Abordagem do contexto social

O conjunto das habilidades individuais e cognitivas que identificam um especialista mostra-se diferente de domínio para domínio. Naturalmente, um especialista em dança ou esportes deve demonstrar maior coordenação motora do que um gênio musical, cuja habilidade é especialmente sensorial, ou um físico que necessita maior capacidade de raciocínio. Porém, especialistas num mesmo domínio também tendem a demonstrar habilidades e conhecimentos distintos, pessoalmente desenvolvidos, que são

reconhecidos como excepcionais pelo seu grupo (AGNEW, N. M. et al. 1994). Esse fato aponta para um componente social como determinante da perícia. Um especialista deve ser reconhecido por um grupo de pessoas razoavelmente grande que atua num determinado domínio, indicando que a perícia é socialmente reconhecida.

Do ponto de vista metodológico, além de ser reconhecido, é desejável que o desempenho de um especialista possa ser medido objetivamente através de parâmetros que indiquem sua perícia, mesmo que a métrica seja restrita a um contexto social. O tempo de treinamento é uma das características aplicadas neste estudo para identificação da perícia. Considerando as diferenças entre os domínios, um especialista pode ser definido como alguém que aplicou mais de 20.000 horas (cerca de 2.000 horas por ano durante 10 anos) em treinamento e solução de algum tipo especializado de problema (VANLEHN, 1989) (ERICSSON e SMITH, 1991) .

Embora aceito como um indicativo de perícia, esse parâmetro não é por si só identificador de um especialista, já que o treinamento é essencial, porém não é determinante da perícia. Estudos têm demonstrado que, submetidos a treinamento, indivíduos ampliam o desempenho monotonicamente em função da prática, seguindo uma curva assintótica até atingir um limite superior de performance. Porém, a partir desse ponto, o treinamento deixa de influenciar a melhoria de desempenho. Esse limite é superado para atingir os níveis considerados de um especialista apenas por indivíduos melhor dotados, que são minorias num contexto qualquer, como ilustrado na Figura 4.1. Embora existam controvérsias (ERICSSON e SMITH, 1991) a respeito do peso dos componentes individuais e de contexto no desenvolvimento da perícia, é aceito que a combinação de talento com oportunidades de desenvolvimento intelectual amplia a possibilidade de atingir níveis de perícia.

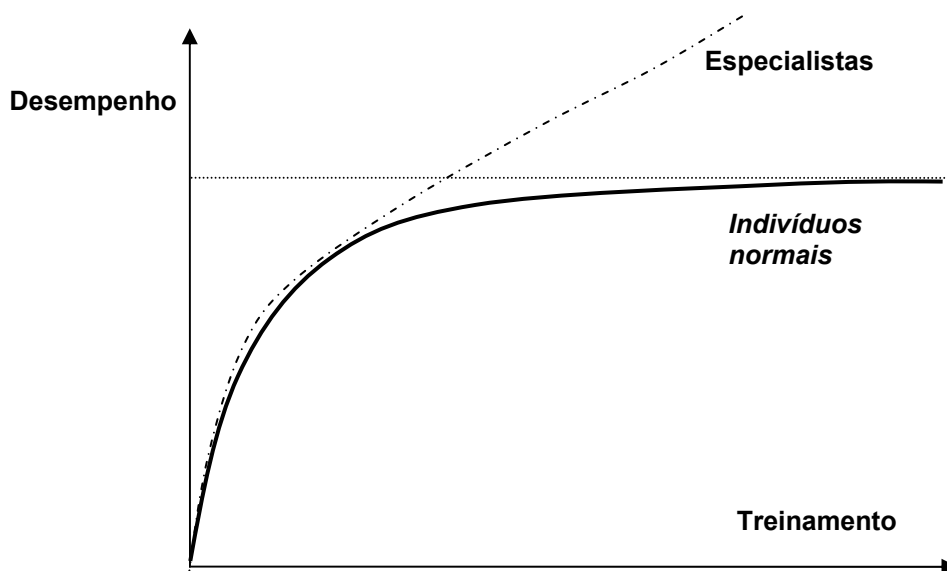


FIGURA 4.1 - Representação aproximada da curva de aprendizado de indivíduos submetidos a treinamento comparada com a de especialistas.

O raro estabelecimento dessa relação entre talento e oportunidade pode ser constatado ainda através de outra medida de desempenho comparativo que serve também como um indicador do tipo de domínio. De acordo com Turban (TURBAN, 1993), um especialista atinge uma desempenho de solução (número de problemas resolvidos por número de problemas apresentados) muito superior a de outros profissionais da área, algo em torno de três vezes maior que a média. Harmon e King (HARMON e KING, 1985) consideram que, para uma tarefa tipicamente intensiva em conhecimento, menos do que 10 por cento de todos os profissionais atingem uma desempenho maior do que 85 por cento dos problemas resolvidos com sucesso, contra um desempenho máximo de 30 por cento do restante dos profissionais Figura 4.2 (Extraído de (HARMON e KING, 1985)).

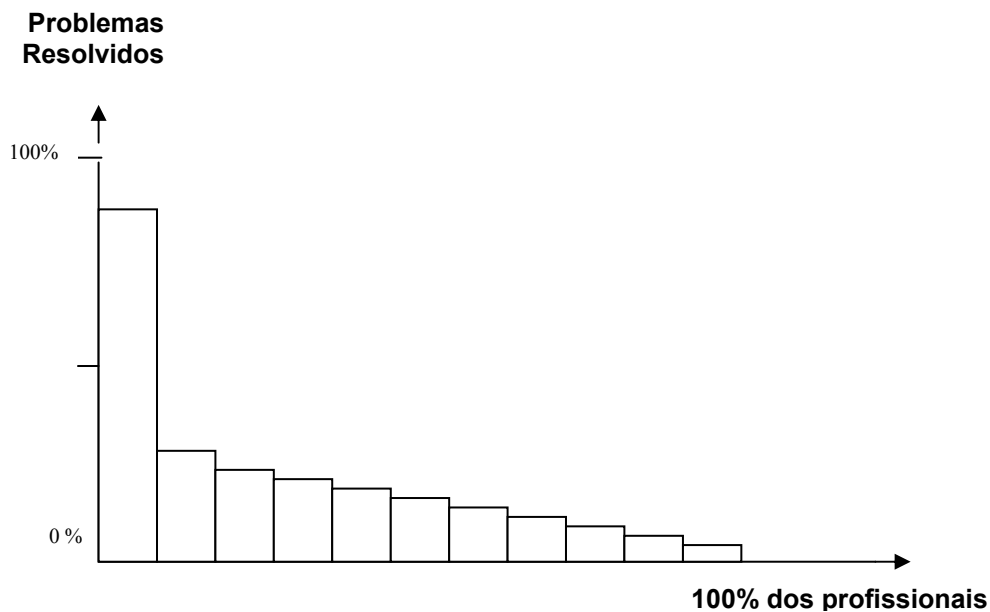


FIGURA 4.2 - Desempenho comparativo entre especialistas e não especialistas em um determinado domínio.

Alguns domínios, no entanto, não são propícios ao desenvolvimento de profissionais com desempenho especialista. Nos domínios maduros, as tarefas desenvolvidas para solução de problemas já estão suficientemente equacionadas e seus métodos formalizados, de forma a permitir que a maioria dos profissionais atinjam alto desempenho em solução de problemas, mesmo com reduzidos esforços de treinamento. São exemplos os domínios da Contabilidade e Cálculo de Projetos, por exemplo. Em outros domínios, por serem muito jovens ou de teoria mal estabelecida, não existem profissionais que atinjam altos índices de solução de problemas. Não há especialistas, simplesmente porque ninguém atingiu ainda o nível de desempenho desejável.

Os domínios que propiciam ou mesmo exigem o desenvolvimento de profissionais com alto nível de perícia são tipicamente, mas não exclusivamente, os domínios das Ciências Naturais (ERICSSON e SMITH, 1991). Aplicações em Medicina, Geologia, Biologia e a resolução de problemas em Física têm sido objeto de estudo sobre perícia. Outros domínios tradicionais de estudo são os jogos, em especial o xadrez. Nos domínios dos jogos, ditos fracos em conhecimento, o diferencial de desempenho é definido por

características individuais dos resolvedores de problemas, como a capacidade de memória, automonitoração, seleção de estratégias ou verificação de erros, entre outras.

Medidas comparativas de desempenho especialista carecem de métricas apropriadas que resultem em valores confiáveis para quantificar a perícia. Há dificuldades operacionais na definição desses métodos. Acrescente-se ainda que as diferenças entre os domínios não permitem fazer comparações úteis que permitam desenvolver uma teoria a respeito da perícia em geral, dentro da abordagem do contexto social. Outras abordagens permitem métricas mais acuradas de níveis de perícia, em termos individuais e dentro dos nichos de conhecimento.

4.2 Abordagem do especialista X novato

A comparação entre especialistas e novatos permite obter observações úteis em qualquer domínio onde se caracterize o desenvolvimento de perícia. Através do processo de aprendizado e aquisição de experiência, o especialista desenvolve métodos particulares de lidar com os problemas quando comparado com novatos. Essa abordagem ganhou maior força na medida em que ficou claro que a perícia depende mais de características desenvolvidas do que inatas. Identificar quais são as características desenvolvidas contribui para esclarecer os mecanismos da perícia.

Especialistas têm uma definição razoavelmente precisa na literatura, quer seja baseada no seu desempenho, tempo de treinamento e solução de problemas, ou características particulares do indivíduo (motivação, automonitoração e seleção de estratégias, por exemplo). Já o termo novato carece de uma definição mais precisa. Alguns experimentos descrevem os novatos como pessoas que não sabem originalmente nada sobre o assunto até receberem um treinamento de uma ou duas horas e serem solicitados a resolver problemas experimentais. Outros experimentos descrevem novatos como estudantes que já cursaram ao menos uma ou duas disciplinas no assunto. VanLehn define pré-novato como alguém que recebeu apenas umas poucas horas de treinamento no domínio, enquanto novato corresponde a um estudante com centenas de horas de treinamento (algo equivalente a uma disciplina de graduação) (VANLEHN, 1989). Essa definição será adotada neste trabalho.

Inicialmente, como intuitivamente esperado, especialistas *sabem mais* do que os novatos. Eles armazenam maior número de conceitos do domínio e possuem também maior número de episódios de solução de problemas que podem lembrar-se com segurança. Adicionalmente, as estruturas de armazenamento em memória tendem a ser maiores e mais complexamente relacionadas, permitindo relacionar e reutilizar informações de forma mais rica do que os novatos o fazem. Especialistas desenvolvem estruturas de armazenamento de informação particulares à aplicação, onde agrupam informações relacionadas com índices de acesso muito eficientes. Estas estruturas tendem a ser mais enxutas e eficazes no reconhecimento de situações do domínio do que as que os novatos utilizam (LEÃO, 1988; ABEL, CASTILHO e CAMPBELL, 1998).

Especialistas e novatos podem ser diferenciados por outras características relacionadas às estruturas de armazenamento. Ao descreverem um problema ou classificarem objetos do domínio, novatos tendem a utilizar-se de feições superficiais ou perceptuais na descrição (VANLEHN, 1989) enquanto especialistas fazem a descrição numa dimensão mais teórica. Especialistas demonstram também melhor memória e capacidade de recordar situações em condições experimentais, desde que os eventos ou objetos

recordados sejam comuns às situações de solução de problemas em que trabalham. Especialistas em xadrez, por exemplo, podem descrever com exatidão uma configuração intermediária de jogo, mesmo que a tenham visto por apenas alguns segundos para memorização. Novatos serão capazes de descrever a localização de apenas algumas poucas peças. No entanto, se as peças estiverem dispostas aleatoriamente sobre o tabuleiro, sem caracterizar uma situação de jogo, a capacidade de recordar de ambos, especialistas e novatos, será a mesma. A base cognitiva que suporta esses comportamentos discrepantes será melhor discutida no próximo item.

Em termos de estratégias de raciocínio, não existem diferenças notáveis entre especialistas e novatos. Ambos utilizam as mesmas estratégias gerais como encadeamento progressivo ou regressivo, análise do geral para o detalhe (*top down*) ou do detalhe para o geral (*bottom up*), busca em largura ou profundidade. Alguns estudos parecem indicar, no entanto, que especialistas mais freqüentemente parecem coletar informações e com elas dirigir a busca progressiva do que, espontaneamente, levantar hipóteses e buscar a solução por busca regressiva (PATEL e RAMONI, 1997).

As diferenças entre especialistas e novatos aparecem durante a busca por uma solução. Especialistas parecem monitorar melhor o progresso do seu processo de solução de problemas: selecionam o método mais apropriado a ser aplicado e param mais freqüentemente para avaliar o método que selecionaram. Esse comportamento resulta num caminho de solução de problemas mais direto quando comparado com aquele dos novatos e pré-novatos, que tendem a insistir por mais tempo em uma estratégia errada de solução antes de avaliar outros caminhos (VANLEHN, 1989). De fato, a utilização de tentativa e erro parece minimizada nos altos níveis de perícia.

Outra característica de solução relacionada à anterior é a capacidade de avaliar mais acuradamente as dificuldades de uma tarefa antes de realizá-la e, em conseqüência, alocar esforços mais eficientemente ao resolvê-la. Essa capacidade faz com que os especialistas usem os recursos para solução de problemas de forma mais racional e com maior economia.

Para certos domínios onde o custo da busca de solução é muito alto, a economia obtida no processo de busca de solução pode ser um diferencial mais significativo do que a própria capacidade de solução. Esse é o caso da Medicina, onde uma fraca capacidade de avaliação do profissional pode levar à utilização excessiva de exames ou procedimentos invasivos (cirurgias, endoscopias) que não seriam utilizados por especialistas (LEÃO, 1988). Também o domínio de exploração de petróleo enquadra-se nesse caso, onde sondagens e perfurações têm custos da ordem de milhares de dólares e devem ser utilizados parcimoniosamente.

4.3 Abordagem cognitiva

A análise da perícia baseada no contexto social ou na comparação do especialista com não-especialistas permite identificar e classificar profissionais com desempenho superior em algum domínio do conhecimento. Porém essas abordagens mostram-se limitadas para identificar e esclarecer os mecanismos individuais que levam a atingir esses desempenhos. A abordagem cognitiva busca identificar os aspectos ligados à forma como a mente humana adquire conhecimento e o armazena e processa, servindo como um meio para o desenvolvimento da perícia.

Diversos aspectos cognitivos concorrem para a manifestação da perícia, mas os principais parecem relacionar-se à capacidade de armazenar grande quantidade de conhecimento de forma organizada e aos processos utilizados para selecionar, combinar e processar esse conhecimento. No entanto, a perícia começa realmente a ser reconhecida quando os processos básicos de processamento de informações do domínio são parcialmente automatizados. Nesse estágio, os estímulos sensoriais funcionam como gatilhos que disparam processos específicos sem intervenção consciente do indivíduo. A capacidade mental do indivíduo é, portanto, parcialmente liberada para a elaboração de processos mentais mais sofisticados capazes de lidar com aspectos novos dos problemas, desenvolvendo soluções criativas e sob medida para o domínio (STERNBERG, 1994). Os aspectos cognitivos identificados por diversos autores como determinantes da perícia estão organizados a seguir.

4.3.1 Quantidade de conhecimento

Seguindo o senso comum, especialistas retêm maior quantidade de conhecimento do domínio do que não-especialistas. Isso pode ser evidenciado através da quantidade de diagramas e fórmulas que eles são capazes de descrever, do número de configurações que podem recordar-se, do conjunto dos conceitos e do vocabulário que utilizam. Essa capacidade foi especialmente demonstrada por De Groot (DE GROOT, 1965) e Chase e Simon (CHASE e SIMON, 1973) quando demonstraram que campeões de xadrez guardam na memória dezenas de milhares de configurações de jogos de xadrez e as utilizam para decidir as próximas jogadas.

Ainda que armazenar conhecimento exija uma boa capacidade de memorização, o fator determinante da perícia não é a memória superior do indivíduo. De fato, os especialistas somente demonstram uma capacidade de memorização superior quando o conhecimento refere-se ao seu domínio de perícia. Em testes de memória comuns, demonstram a mesma capacidade de memorização que os não-especialistas. Isso indica que a retenção de conhecimento especialista exige ferramentas mais complexas do que apenas uma memória prodigiosa.

A retenção de grandes quantidades de conhecimento é uma pré-condição essencial para a manifestação da perícia, garantindo o substrato sobre o qual se desenvolverão as habilidades de solução de problemas. Porém, claramente, o desempenho na solução de problemas não é proporcional à quantidade de conhecimento retido pelo especialista, nem tampouco à capacidade de recordar-se desse conhecimento. Essa observação se confirma mesmo em domínios ditos intensivos em conhecimento, onde a solução de problemas depende mais de habilidades cognitivas do que sensoriais ou motoras. Independentemente do domínio, outros fatores demonstram ter relação mais direta com o desempenho.

4.3.2 Organização e indexação do conhecimento

Estudos em domínios de perícia intensivos em conhecimento, como a Física (ANZAI, 1991), a Medicina (PATEL e GROEN, 1991; PATEL, AROCHA e KAUFMANN, 1994) (SCHIMDT, NORMAN e BOSHUIZEN, 1990) e a programação de computadores (KOUBEK e SALVENDY, 1991), demonstraram que o modelo mental que representa e organiza o conhecimento desempenha papel mais importante na determinação dos altos níveis de perícia do que a quantidade de conhecimento em si.

Especialistas organizam o conhecimento em grandes estruturas chamadas *esquemas* (COLLINS e BURSTEIN, 1989; ABEL e CASTILHO, 1993; MCNAMARA, 1994; ANDERSON, 1995). Um esquema é uma estrutura abstrata de conhecimento que captura regularidades de objetos e eventos e inclui todas as variações possíveis dos objetos conhecidos em uma forma flexível, sem corresponder particularmente a algum objeto individual. Um esquema representa o conhecimento de categorias de acordo com as propriedades genéricas que definem essas categorias. É um estereótipo do mundo, criado pela mente humana para auxiliar na compreensão do ambiente e que permite prever comportamentos futuros desse ambiente. Embora não esteja completamente estabelecido qual o formato que os esquemas possuem ou como são utilizados pelo cérebro humano, existe um consenso a respeito da estrutura geral de representação dos conceitos e eventos do mundo. Objetos e eventos são registrados através do seu conjunto de propriedades que os diferencia de outros objetos e eventos. Não apenas quais propriedades os caracterizam, mas também que tipos e variações de valores essas propriedades podem assumir.

Além da representação interna ou estrutural dos objetos, também as *associações semânticas* entre os objetos cumprem um importante papel na estrutura de esquemas. Objetos ou eventos relacionados a um mesmo contexto guardam representações dos seus relacionamentos semânticos, de forma que a recuperação de um conceito irá provocar a evocação de outro. Dessa forma, nos esquemas, objetos são associados a suas *classes*, agrupados em *conjuntos* e reconhecidos como fazendo *parte* de outros objetos mais complexos. Essas relações permitem compreender o mundo mesmo que as informações tenham sido imperfeitamente coletadas

Os esquemas constituem a base de conhecimento declarativa das pessoas (VANLEHN, 1989), ou seja, a base para raciocinar sobre objetos abstratos do mundo como classes, conjuntos e particionamentos, reconhecer e classificar elementos do domínio e suportar inferências, mesmo com informações incompletas ou inexatas sobre o domínio. Ou seja, os esquemas representam o *modelo estático interno* do mundo como o ser humano o percebe. Esse modelo será tanto mais complexo e detalhadamente indexado quanto maior o nível da perícia.

Os esquemas se refletem, entre outras ações, na forma como especialistas fazem classificação de problemas (VANLEHN, 1989; ROSS e SPALDING, 1994). Novatos tendem a classificar problemas com base em feições superficiais, como os tipos de objetos envolvidos ou características sensoriais desses objetos (tamanho, cor, etc.). Por outro lado, especialistas classificam problemas com base em aspectos mais abstratos do problema (ZEITZ, 1997). Por exemplo, especialistas em Física, classificam os problemas recebidos de acordo com os princípios básicos da Física, enquanto novatos o fazem baseado nas características descritas no problema, como a presença de planos, roldanas ou pesos (CHI, GLASER e REES, 1982; ANZAI, 1991). Esse resultado pode indicar que especialistas desenvolvem esquemas especiais para representar problemas (CHI, GLASER e REES, 1982), mas, mais provavelmente, indica que os índices utilizados para acessar (ou *casar*) esses esquemas serão tanto mais abstratos quanto maior o nível da perícia (ZEITZ, 1997). Para os novatos, os índices são propriedades simples dos objetos, equivalentes a estímulos sensoriais primários, enquanto para os especialistas corresponderão a *pacotes*⁵ de estímulos sensoriais interrelacionados que

⁵ Tradução livre para o termo *chunk* constante na literatura de Ciência da Cognição, significando um agrupamento de padrões sensoriais em pacotes de informações que, como um todo, possuem um significado particular. Da mesma forma, o termo *chunking* será traduzido neste texto como empacotamento.

devem ser reconhecidos juntos para indicarem algum esquema particular da memória. O processo de empacotamento está associado ao processo de automatização e será descrito no próximo item.

4.3.3 Empacotamento e Automatização

O processo de empacotamento desempenha um papel crucial no desenvolvimento da perícia. Estímulos que são reconhecidos juntos repetidas vezes passam a assumir um significado próprio, especialmente se associados a uma situação ou evento particular. Nesse caso, não serão mais reconhecidos como um estímulo, mas sim como um *padrão* de estímulos associados, que servirá como um índice ou um *gatilho* cognitivo para o esquema ao qual são associados. Esse é o processo utilizado por campeões de xadrez para reconhecerem configurações cruciais do jogo que definem as próximas jogadas. As peças não são analisadas individualmente, mas sim como um conjunto de peças dispostas em uma configuração particular do tabuleiro com uma estratégia de solução determinada (DE GROOT, 1965; CHASE e SIMON, 1973).

Cada *pacote* é mais provavelmente uma *representação mental* associada a algum objeto do mundo externo do que uma imagem, ou som, ou estímulo particular observado anteriormente (HOROWITZ, 1978; KOSSLYN, 1994). No caso de padrões visuais, como em Geologia, essa representação é sintetizada no cérebro a partir de diversas imagens reais vistas anteriormente e posteriormente associadas com um significado particular. Embora o processo em si seja mal compreendido pela Ciência da Cognição, pode-se aceitar que o cérebro retém algum tipo de *representação* (como descrito em (KOSSLYN, 1994)) vinculada com alguma indicação de significância e de solução possível. Portanto, o *empacotamento* não é estritamente um processo perceptual, como o aprendizado no reconhecimento de uma textura ou um tipo de melodia, mas inclui ainda componentes conceituais mais abstratos (COOKE, 1992) que permitem compreendê-lo como a abstração de um *passo de solução*. Um pacote não é um objeto do conhecimento *declarativo*, mas sim *inferencial* e sua aplicação é decisiva no processo de solução de problemas.

Independente da controvérsia de como as imagens são adquiridas e aplicadas pelo cérebro, é aceito que muito do desempenho superior de especialistas na solução de problemas pode ser explicada por empacotamento. Chase and Simon (CHASE e SIMON, 1973) explicam que o fato de que especialistas podem *ver* mais do que novatos pode ser explicado através de uma maior quantidade de pacotes, que funcionam como sofisticados índices que apontam para porções específicas dos seus esquemas internos. Mais ainda, especialistas retêm pacotes maiores e mais complexos do que os novatos, e essa habilidade permite que eles casem com um ajuste maior suas representações com o mundo externo.

O processo de empacotamento contribui para o desenvolvimento de outra característica da perícia: a da automatização. O fato de não tomar conhecimento de porções atômicas de estímulos determina uma economia de processamento de informação, levando a aplicação dos recursos cognitivos para realizar inferências mais sofisticadas e lidar com aspectos novos do problema. A automatização não acontece apenas no processamento dos estímulos externos, mas também no controle das ações motoras. Assim, uma pessoa fluente em algum idioma irá falar com facilidade e rapidamente, enquanto um aprendiz falará de forma vacilante, como um reflexo da atividade consciente de reconhecer o

contexto, selecionar o vocabulário cabível, organizar as frases e controlar sua pronúncia. A atividade controlada é efetivamente consumidora de recursos quando comparada à ação automática. A automatização de atividades básicas de reconhecimento permite, no mínimo, a liberação de recursos cognitivos para a utilização de altos níveis de análise e síntese, contribuindo, portanto, para o desenvolvimento da perícia (STERNBERG, 1997).

4.3.4 Estratégias de Solução de Problemas e Automonitoração

Os estudos da perícia até o momento não encontraram diferenças significativas nas estratégias de soluções de problemas utilizadas por especialistas e novatos (DE GROOT, 1965; VANLEHN, 1989). Alguns estudos demonstraram, na verdade, que existem diferenças na seleção de estratégias de busca entre especialistas e novatos quando comparados com pré-novatos (CHI, GLASER e REES, 1982). Apresentados a um problema novo, especialistas e novatos utilizaram as mesmas estratégias de partir do geral para o específico e também para decompor o problema, enquanto pré-novatos iniciaram a codificação da solução sem aparentar definir uma estratégia previamente. Poucos estudos, como a solução de problemas em Física (ANZAI, 1991), evidenciaram estratégias diferentes para especialistas e novatos, especialmente quando o problema em questão possui formas particulares de solução desconhecidas para os novatos. Esses resultados parecem demonstrar que a seleção de estratégias é uma das primeiras habilidades adquiridas no aprendizado de problemas num novo domínio.

As estratégias utilizadas tendem a ser mais dependentes do problema do que particularmente do domínio. Assim, problemas de diagnóstico tendem a exigir estratégias de busca regressiva, enquanto problemas de planejamento e projeto aplicam busca progressiva. Quando a situação inicial e os objetivos a serem alcançados são conhecidos, a estratégia aplicada geralmente é a de análise de meios e fins. Mas seja qual for a estratégia, a busca será sempre heurística, nunca cega. Todo o conhecimento disponível, mesmo intuitivo, será aplicado para reduzir os caminhos alternativos e otimizar o processo de busca da solução. Essa é uma forte característica humana, que será tanto mais evidenciada quanto mais altos forem os níveis da perícia.

Embora as estratégias gerais de busca sejam as mesmas para especialistas e novatos, outras diferenças entre ambos são percebidas no processo de solução de problemas.

Por reter mais conhecimento do domínio, especialistas tendem a *modelar* problemas reais de forma mais otimizada do que novatos. Eles reconhecem com mais facilidade aspectos irrelevantes do problema e definem representações mais abstratas, com menores caminhos de solução (ANZAI, 1991). Muitas vezes, o processo de busca é reduzido a um casamento de padrões entre o problema real e alguma possível representação dessa classe de problemas na mente do especialista, seguida da aplicação da solução. A busca acontece apenas para problemas novos ou desconhecidos para o especialista.

Mesmo para problemas que exijam busca, ainda assim, especialistas demonstram vantagens sobre os novatos. Especialistas monitoram o progresso da sua estratégia de solução e alocam esforços de forma mais otimizada (VANLEHN, 1989; ANZAI, 1991). Novatos tendem a testar mais caminhos alternativos e a insistir mais tempo nesses caminhos antes de perceber que a solução não é alcançável. Especialistas identificam melhor o nível de dificuldade dos problemas e o tempo necessário para atingir a solução antes de tentar resolvê-los, economizando esforços e aplicando-os mais adequadamente.

Finalmente, para qualquer problema no seu domínio ou estratégia aplicada, especialistas equacionam o problema e alcançam a solução mais rapidamente, com menor quantidade de recursos aplicados.

Esses resultados são coerentes com a hipótese de que especialistas possuem uma forma de organizar conhecimento mais rica e complexa. Os pacotes sensórios permitem um rápido reconhecimento do problema, enquanto que a maior quantidade de esquemas para representar o domínio garante um casamento mais adequado com as características do problema e, conseqüentemente, mais informação sobre o problema para decidir que solução aplicar. O resultado é maior rapidez, acuracidade e melhor qualidade de solução com os menores recursos aplicados. É a manifestação da perícia.

4.3.5 Capacidade analítica

Um bom desempenho em solução de problemas necessita mais do que uma grande quantidade de conhecimento bem organizado e métodos eficientes de busca. É necessário que a aplicação desses recursos seja eficaz. Especialistas são capazes de realizar inferências, a partir das informações recebidas, que os novatos não alcançam. Eles utilizam o conhecimento que possuem para *analisar* a situação em questão e definir qual abordagem de solução vão utilizar. A Psicologia Cognitiva tem dado grande ênfase ao papel da memória na inteligência humana e pouco se preocupou em determinar os mecanismos que suportam a inferência. Como conseqüência, os processos cognitivos que suportam a inferência ainda são pouco conhecidos.

Especialistas recebem a informação sobre o problema e a analisam de inúmeras maneiras antes de “casar” aquelas informações com sua base de conhecimento declarativa. Eles sabem quais partes da informação devem utilizar e sabem também que porções do seu conhecimento são aplicáveis ao problema em questão. Esse processo, claramente subsidiado pelos esquemas que armazenam conhecimento, será tanto mais sofisticado quanto maiores forem os níveis da perícia (STERNBERG, 1997).

4.3.6 Habilidade Criativa

Indo além da capacidade analítica, a perícia está associada a outra habilidade cognitiva ainda menos compreendida, aquela capaz de produzir introspecções criativas levando a analisar a informação de uma forma diversa daquelas que outras pessoas utilizam. A informação é filtrada, extraindo aspectos irrelevantes ao problema em questão. Depois é decomposta e combinada de diversas formas, sendo cada uma dessas combinações comparada com as representações mentais que descrevem problemas em busca de uma solução aplicável. Esses processos combinados parecem formar a base para o desenvolvimento dos processos de inferência de alto nível que suportam a perícia, ainda tão pouco compreendidos pela Psicologia. Cada um desses processos deve ser compreendido individualmente (STERNBERG, 1997):

- **Escolha seletiva:** é o processo no qual uma pessoa identifica uma informação como relevante enquanto descarta outras como sendo irrelevantes. Esse filtro seletivo é um suporte crítico para manifestação da perícia, uma vez que elimina o “ruído” na coleta de dados relativos ao problema, permitindo que as características relevantes se casem com os esquemas de conhecimento que descrevem problemas desse tipo. A escolha seletiva é que permite que um médico reconheça quais aspectos do paciente são efetivamente sintomas de alguma doença, ou que um advogado enfatize aspectos de um caso, ignorando outros.

- **Combinação seletiva:** é o processo pelo qual informações selecionadas são agrupadas ou desagrupadas de uma forma que pode não ser óbvia para a maioria das pessoas. Dessa forma, um matemático sabe em que ordem determinados teoremas e postulados devem ser combinados para serem aplicados em prova de teoremas ou resolução de equações.
- **Comparação seletiva:** refere-se a capacidade de utilizar uma informação adquirida em outro contexto para resolver o problema em foco. Ou seja, é a capacidade de identificar, no conhecimento adquirido e organizado anteriormente, que porções ou porções se referem ao problema a ser resolvido no presente momento. A comparação seletiva utiliza raciocínio analógico para identificar semelhanças entre episódios passados e problemas atuais. A comparação vai além do raciocínio baseado em casos de Shank (SCHANK, 1982) e Kolodner (KOLODNER, 1993), onde os *episódios* armazenados e presentes preservam a mesma estrutura, permitindo a comparação entre seus atributos. A comparação seletiva exige formas criativas de comparações dos problemas e esquemas internos do especialista levando a propostas de soluções inovadoras e imprevistas. Efetivamente, especialistas se distinguem não apenas por saber fazer suas tarefas com eficácia, mas principalmente por terem expandido os limites do conhecimento no seu domínio de atuação.

4.3.7 Habilidade prática

Finalmente, associada a todas as capacidades intelectuais dos especialistas, como quantidade de conhecimento, estruturas de organização, índices poderosos, automatização, capacidade analítica e criatividade, faz-se necessária a habilidade de aplicar esses recursos na solução de problemas reais. Para isso, é necessária uma compreensão efetiva de como o domínio do conhecimento funciona e a capacidade de aplicar seus recursos abstratos respeitando as restrições particulares de cada problema. É a habilidade de trabalhar com restrições reais partindo apenas de modelos hipotéticos de funcionamento.

4.4 A automatização da perícia

A análise dos mecanismos da perícia pode contribuir com a discussão das melhores alternativas computacionais e de Engenharia de Conhecimento para produzir Sistemas Especialistas eficientes.

A necessidade de armazenar conhecimento declarativo do domínio é conhecida dos primeiros desenvolvedores de Sistemas Especialistas. O papel desse conhecimento para suportar a perícia, bem como a melhor forma de organizá-lo, no entanto, ainda é controversa. Especialistas retêm uma grande quantidade de conhecimento do domínio, mas nem todo esse conhecimento é aplicável na solução de problemas de sua especialidade, tampouco é o mesmo corpo de conhecimento aplicado nas diferentes tarefas. A Engenharia de Conhecimento atual reconhece a importância de armazenar e manter conhecimento declarativo do domínio independente da tarefa, num formato que permita sua reusabilidade em diferentes problemas do domínio.

O conhecimento declarativo inclui os conceitos do domínio e a forma como esses conceitos podem ocorrer numa situação particular, descritos como seus atributos e domínios de valores. Inclui ainda os relacionamentos entre conceitos, que determinam a forma como eles se organizam no domínio. Uma proposta atual para representar o

conhecimento declarativo é através de ontologias, que serão apresentadas em maior detalhe no capítulo 5.

Ontologias organizam os conceitos através de *taxonomias* de termos, ou seja, apresentam os relacionamentos de generalização e especialização entre os conceitos do domínio. Esses relacionamentos são de vital importância para suportar a capacidade analítica do indivíduo e também a seleção dos métodos de solução de problemas, permitindo reconhecer a que classe pertence um determinado objeto do domínio e aplicando os métodos associados à classe.

Além de taxonomias, as ontologias representam outros tipos de agrupamentos de conceitos importantes para suportar inferência, como partonomias e associações de conjunto. As *partonomias*, construídas através de relações *parte-de*, permitem construir as agregações que dão suporte ao processo de empacotamento e à capacidade analítica dos indivíduos. As *associações de conjunto* possibilitam construir interpretações do domínio, reconhecendo características comuns entre objetos de diferentes classes que dão suporte ao raciocínio analógico, que, por sua vez, amplia a capacidade analítica e criativa do indivíduo. Taxonomias, partonomias e associações de conjuntos são chamados relacionamentos *estruturais* porque, ao se repetirem monotonamente entre os e conceitos, organizam o domínio segundo uma estrutura uniforme.

Outras associações entre conceitos de diferentes classes constroem as relações de causa e efeito, problema e solução, falha e tratamento, entre muitas outras que embasam a inferência nos diversos domínios. São essas associações, ordenadas mentalmente segundo os níveis de prioridade, suficiência e significância obtidos através da experiência, que são utilizadas como *índices* quando são percorridas as estruturas mentais.

Historicamente, o conhecimento declarativo tem sido melhor compreendido do que o conhecimento inferencial e os métodos de solução de problemas. Essa compreensão faz com que os modelos de representação declarativos sejam mais conhecidos e explorados do que os modelos inferenciais, nas implementações de sistemas de conhecimento. Uma das dificuldades refere-se ao componente dinâmico da inferência, difícil de ser reproduzido. A capacidade criativa, por exemplo, não resulta da *existência* de relacionamentos de agregação ou conjunto entre conceitos do domínio, mas sim da capacidade de um agente em *criar* esses relacionamentos dinamicamente durante a análise do problema.

Embora claramente percebida, ainda não foi possível reproduzir por computador, a capacidade humana de criar e desfazer associações entre conceitos do domínio, de forma a obter diferentes visões sobre o mesmo problema ou partes de um problema. A solução encontrada foi *congelar* o comportamento dinâmico, reproduzindo não o mecanismo de busca da solução, mas um ou mais caminhos de solução já utilizados diversas vezes com sucesso. Sistemas de busca sobre árvores de decisão, regras ou redes bayesianas são as implementações mais notáveis dessa abordagem. Também sistemas de raciocínio baseados em casos utilizam essa estratégia. Nesses sistemas, desenvolvidos para resolver uma única tarefa, os conceitos do domínio representam um papel fixo para solução de problemas, e os caminhos possíveis de solução estão previamente determinados. A inferência é representada por uma ou duas técnicas de busca aplicada repetidamente sobre a representação do problema ou a base de conhecimento.

Outro problema ligado à dificuldade em modelar inferência refere-se à limitação em associar os métodos de solução ao conhecimento utilizado pelo método, uma vez que

parte desse conhecimento é tácito e portanto, não é representado no modelo do domínio. A identificação desse conhecimento subconsciente pode ser feita pelo reconhecimento dos pontos de decisão no processo de inferência que não possuem conhecimento explicitamente associado.

Embora sem antever uma solução a curto prazo, as propostas atuais de sistemas de conhecimento buscam tornar os sistemas mais flexíveis de forma a incorporarem algumas das características cognitivas tipicamente humanas. Assim, os modelos de conhecimento atuais prevêm que:

- o modelo do domínio tenha múltiplos *tipos* de conhecimento, cuja definição de conceitos contribua com as diferentes estratégias de solução de problema;
- o modelo do domínio seja organizado a partir de diferentes tipos de relações estruturais entre os conceitos (e não mais apenas como uma taxonomia de classes);
- o modelo do domínio seja definido independentemente da tarefa a ser resolvida, refletindo o uso flexível desse conhecimento para diferentes tarefas (o que nem sempre pode ser efetivamente alcançado);
- os métodos de solução de problemas sejam definidos também de forma independente da tarefa, buscando refletir o conjunto de ferramentas utilizadas pela capacidade analítica e habilidade criativa do resolvidor de problemas;
- a associação entre os métodos de solução de problemas e o modelo do domínio ocorra no momento da execução da tarefa.

Essa abordagem, intrinsecamente correta, ainda não tem alcançado os resultados esperados em termos de qualidade e eficiência na solução de problemas. As limitações parecem associar-se à falta de um modelo adequado para implantar o componente dinâmico da solução de problemas. Ou seja, um especialista confronta o problema com diferentes partes de seu modelo do domínio e com os papéis do seu método de solução, inclusive adaptando-os durante a comparação, até identificar a melhor associação entre conceitos do domínio e o método de solução a ser aplicado. Nos modelos propostos, a tarefa é completamente modelada e seus papéis associados fixamente ao modelo do domínio (embora um mesmo conceito possa assumir diferentes papéis em diferentes tarefas, como veremos no próximo capítulo). Esse determinismo limita a habilidade analítica e criativa de um sistema implementado.

4.5 Sumário do capítulo 4

Neste capítulo foram estudados os fundamentos cognitivos para o desenvolvimento da perícia humana, independentemente do domínio onde ela ocorra. A análise pode ser feita segundo três abordagens.

- Contexto social: a perícia tem características diferentes em cada domínio, de acordo com as habilidades exigidas para a solução de problemas. Especialista é aquele que é reconhecido por seus pares.
- Especialista X Novato: permite definir *métricas* para as diferenças entre especialistas em algum domínio quando comparados com não-especialistas, evidenciando ainda onde se localizam essas diferenças.

- Análise cognitiva: busca identificar a forma como a mente humana adquire, armazena e processa conhecimento, de forma a identificar as características intelectuais individuais que suportam a perícia em qualquer domínio.

Através da abordagem cognitiva, foi identificado o conjunto de sete recursos cognitivos que concorrem para o estabelecimento de altos níveis de perícia, que aqui estão associados às suas principais estratégias para reprodução por computador.

- Quantidade de conhecimento. Como o senso comum indica, conceitos, fórmulas, regras e o vocabulário particular do domínio, entre outros conhecimentos, devem ser memorizados para poderem ser utilizados na solução de problemas em qualquer domínio. Essa característica tem sido automatizada em computador através de modelos semânticos de informações e dos modelos de conhecimento, que representam poucas instâncias de muitos conceitos de diferentes tipos (ao contrário dos modelos de dados) refletindo as características da perícia no uso da informação.
- Organização e indexação do conhecimento. Objetos, conceitos e associações que formam a base declarativa do conhecimento humano parecem ser armazenados em uma estrutura de *esquemas*, que representam estereótipos de objetos do mundo com todas as suas variações. Os esquemas são tanto mais complexos e abstratamente relacionados quanto maiores os níveis da perícia, o que irá refletir-se na forma como especialistas fazem classificação de problemas no domínio. Em computador, os modelos de conhecimento buscam reproduzir a quantidade de relacionamentos entre conceitos do domínio, que permitem *navegar* sobre as estruturas de conceitos, e a proposta de índices de acesso segundo as mais diferentes características dos conceitos (como aqueles utilizados em sistemas de raciocínio baseados em casos)
- Empacotamento e Automatização. Os índices de acesso a essas estruturas são formados por *pacotes sensórios*, de acordo com o tipo do domínio (pacotes visuais para domínios baseados em imagens, pacotes de fonemas, para especialistas em idiomas, e assim por diante). O empacotamento de estímulos concorre na automatização das atividades básicas do domínio contribuindo, por sua vez, para a liberação de recursos cognitivos para utilização em inferências de mais alto nível. O tratamento de conhecimento do tipo de pacotes em computador é ainda incipiente e é objeto de estudo deste trabalho. O reconhecimento e utilização de pacotes sensórios por sistemas de conhecimento passa pelo reconhecimento e inclusão desses pacotes e seus componentes na ontologia do domínio, o que, em muitos casos, equivale à transformação de conhecimento tácito em explícito. Pacotes representam um novo *tipo* de conhecimento, que inclui um componente declarativo (como os frames, por exemplo), mas também inferencial (como as regras). Uma forma de automatização pode ser implementada através monitoração da existência de pacotes no domínio do problema, os quais funcionam como atalhos de solução de problemas. A discussão sobre o papel dos pacotes e seu papel na inferência é uma questão central neste trabalho e será retomada nos capítulos subseqüentes.
- Estratégias de Solução de Problemas e Automonitoração. As estratégias básicas de busca utilizadas por especialistas tendem a ser as mesmas utilizadas por não-especialistas. No entanto, na maioria das atividades do domínio, especialistas simplesmente não realizam busca. Os problemas são comparados a representações abstratas de problemas anteriormente resolvidos e as soluções são adaptadas e reaplicadas. Quando a busca é exigida, especialistas planejam antecipadamente a

estratégia e monitoram sua aplicação a intervalos mais curtos, atingindo a solução com mais eficácia e menor aplicação de recursos. As estratégias de solução de problemas tem sido modeladas através dos *métodos de solução de problemas*, que buscam modelar as diferentes formas como o conhecimento do domínio pode ser utilizado para resolver problemas, desde estratégias intensivas em conhecimento até procedimentos simples de busca heurística. A possibilidade de selecionar e aplicar diferentes métodos com avaliação parcial a adequação do método, reproduz parcialmente a habilidade de automonitoração.

- Capacidade analítica. Especialistas analisam a informação a respeito do problema das mais variadas formas, subdividindo-a e casando-a com diferentes partes de suas estruturas mentais de formas tanto mais sofisticada quando mais complexos forem seus esquemas de representação. Modelar a capacidade analítica para ser implementada em computador é uma tarefa complexa. Analisar um problema implica extrair dele somente as informações relevantes para a solução, subdividi-lo em problemas mais fáceis e buscar as melhores estratégias de solução. Parte dessa habilidade é suportada por modelos completos do domínio com classes de problemas resolvidos, associações de conceitos e muitos índices que permitam representar a relevância das diferentes informações envolvidas. Essas características podem ser simuladas para problemas simples, porém a Engenharia de Conhecimento ainda não alcançou métodos para desenvolver grandes modelos com esse capacidade.
- Habilidade Criativa. Na ausência de casamentos adequados entre problemas e esquemas mentais, os especialistas são capazes de examinar um problema de forma criativa para gerar soluções anteriormente não previstas. A informação é filtrada em relação aos seus aspectos irrelevantes, decomposta e combinada, sendo seletivamente comparada com as estruturas internas de representação. Soluções recuperadas são também filtradas e combinadas para gerar uma nova solução. A reprodução dessas habilidades em computador exige uma melhor compreensão do raciocínio humano e de modelos adequados para implementação de *raciocínio analógico*, um tema ainda mal resolvido no atual estado da arte. A produção de soluções criativas em computador pode ser resultado da identificação de semelhanças estruturais entre tarefas de diferentes tipos, com adaptação e combinação de soluções previamente aplicadas, à semelhança do que é proposto em (CAMPBELL e WOLSTENCROFT, 1990).
- Habilidade prática. O especialista vai além do conhecimento teórico a respeito de um domínio. Sabe como o domínio funciona de fato, de modo a ser capaz de aplicar estruturas abstratas de forma eficaz na solução de problemas reais. Sistemas de conhecimento são eminentemente práticos, uma vez que são incapazes de representar o conhecimento profundo de um domínio. Seus modelos representam uma tarefa real e a forma de resolvê-la sem considerações teóricas que permitam adaptar aquele conhecimento a outro contexto.

Os recursos acima descritos foram identificados em especialistas nos diversos domínios de conhecimento estudados, tanto aqueles intensivos em conhecimento, como Medicina e Física, quanto nos dependentes de busca, como jogos, ou que demandam habilidades motoras, físicas ou sensoriais, como Música, Esportes ou Artes. Para cada domínio, algumas habilidades se desenvolvem mais notavelmente do que outras refletindo as características dos problemas a serem resolvidos.

Este trabalho explora as diferenças entre especialistas e novatos ao resolver problemas no domínio da Petrografia Sedimentar, buscando identificar quais características cognitivas suportam a perícia. Estas irão determinar quais as melhores alternativas para reproduzir a perícia em computador.

5 Engenharia de conhecimento

O objetivo geral da Engenharia de Conhecimento assemelha-se ao da Engenharia de Software: transformar o processo *ad hoc* de construir sistemas baseados em conhecimento em uma disciplina da Engenharia baseada em métodos, linguagens e ferramentas especializadas (STUDER, BENJAMINS e FENSEL, 1998).

A Engenharia de Conhecimento surgiu nos anos 70 dentro de um enfoque humanístico como um paradigma de *transferência de conhecimento*, onde a pesquisa buscava aperfeiçoar os métodos para transferir conhecimento de suas fontes para um programa. Atualmente, um paradigma de *modelagem* dirige a pesquisa. Nessa visão, o objetivo é criar um modelo da *interação* de um agente inteligente com o meio, de forma a reproduzir os resultados dessa interação em termos de solução de problemas. O modelo não necessita inspirar-se em modelos humanos de representação ou inferência, desde que reproduza seu comportamento.

Este trabalho foi desenvolvido segundo a abordagem da modelagem do conhecimento, utilizando os conceitos introduzidos pela noção de nível do conhecimento apresentado por Newell em (NEWELL, 1982). A compreensão dessa abordagem será subsidiada neste capítulo.

5.1 A Noção de nível do conhecimento de Newell

A noção de *nível do conhecimento* foi introduzida por Allen Newell nos anos 80 (NEWELL, 1982). Desde então, tem proporcionado uma perspectiva comum para pesquisadores de Inteligência Artificial, especialmente estudiosos de sistemas baseados em conhecimento, quando permitiu tratar o nível do conhecimento como um nível em sistemas de computação, da mesma forma que o nível de arquitetura ou o nível simbólico. Nessa abordagem, desenvolver um sistema baseado em conhecimento é visto como a construção de um conjunto de modelos relacionados a algum comportamento de solução de problemas (VELDE, 1993). Em particular, um modelo no nível do conhecimento representa o conhecimento que racionaliza aquele comportamento.

Um sistema baseado em conhecimento é visto como um *agente* que atua como se possuísse conhecimento sobre o mundo e utilizasse esse conhecimento de modo completamente racional para atingir seus objetivos. O *nível do conhecimento* permite a descrição do comportamento desse agente acima do nível simbólico, sem considerações sobre o que exatamente é esse agente. Já o *nível simbólico* fornece a descrição do *mecanismo* que permite reproduzir esse comportamento e atua sobre símbolos e estruturas de símbolos. O nível simbólico é orientado para o sistema, enquanto o nível do conhecimento é orientado para o domínio.

É importante notar que o objeto da modelagem no nível do conhecimento não é *conhecimento*, mas sim *comportamento*, ou seja a interação observada entre um agente e seu ambiente (CLANCEY, 1989). Essa noção, de fato, é que provocou a mudança de paradigma na Engenharia de Conhecimento. Um modelo no nível do conhecimento, ou *Modelo KL* (do Inglês, *Knowledge Level*), é um modelo de comportamento nos termos do conhecimento, exatamente como um modelo no nível simbólico é um modelo de interação em termos de símbolos e representações (Figura 5.1- Adaptada de (VELDE,

1993)) . O que mantém esses modelos juntos é o fato de que eles modelam a mesma coisa, ou seja, a interação observada. Um modelo no nível do conhecimento e no nível simbólico são coerentes e consistentes na extensão do que se propõem a modelar e, em certo grau, devem levar à mesma classe de comportamentos. Essas idéias gerais norteiam as propostas feitas ao longo deste trabalho e subsidiaram o desenvolvimento do modelo do domínio.

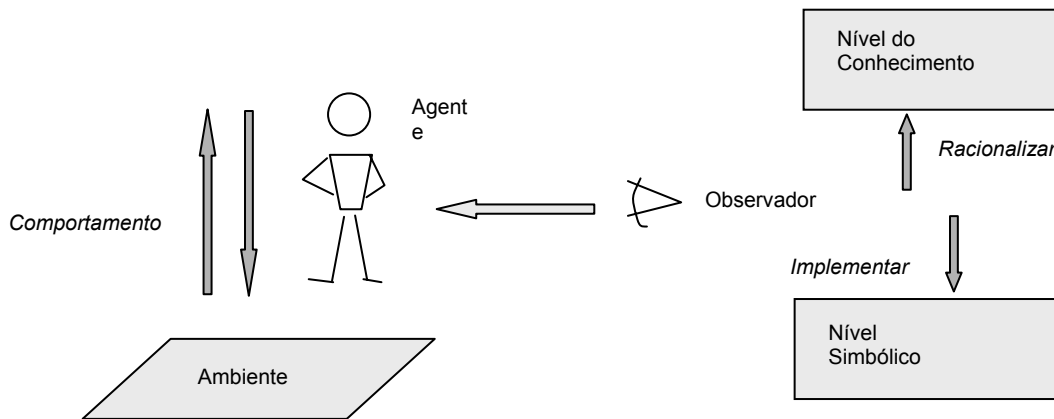


FIGURA 5.1 – O nível do conhecimento e o nível simbólico são modelos do comportamento, ou seja, da interação observada entre o agente e o ambiente.

A evolução das noções apresentadas por Newell levaram ao surgimento de uma série de metodologias de aquisição e representação de conhecimento que se tornaram tecnologias de sucesso. Entre as mais representativas cabe mencionar:

- Tarefas genéricas (CHANDRASEKARAM, 1986);
- Métodos de limitação de papéis (MCDERMOTT, 1988);
- Componentes da perícia (STEELS, 1990);
- Ontologias (WIELINGA e SCHREIBER, 1994) e OntoLíngua (GRUBER, 1992);
- VITAL (STUTT e MOTTA, 1994);
- KADS (SCHREIBER, 1992) e Common KADS (SCHREIBER et al., 1994).

Todas essas metodologias têm em comum as noções básicas de Newell de que um modelo do conhecimento deveria ser definido em termos de *conhecimento*, *objetivo* e *ações*. Nos modelos baseados no nível do conhecimento há um consenso de que esses termos podem ser traduzidos em três conceitos relacionados: o de *modelo do domínio*, *modelo da tarefa* e *métodos de solução de problemas*. Embora nenhuma das metodologias citadas tenha sido utilizada para o desenvolvimento deste projeto, a construção do modelo do conhecimento baseou-se fortemente nestes três conceitos apresentados e nas suas especializações como propostas pela metodologia Common KADS, pela facilidade que essa introduz para lidar com aquisição e representação de conhecimento em domínios de tal complexidade.

5.1.1 Modelo do domínio e ontologias

O modelo do domínio é construído a partir de um conjunto de declarações sobre o domínio que permite descrevê-lo de forma precisa e sistemática. Um modelo do domínio pode descrever, por exemplo, todas as particularidades da anatomia do coração humano, ou descrever o mapeamento entre problemas num carro e suas causas. Um modelo, no entanto, é mais do que uma série de pedaços do conhecimento de um certo domínio, já que a descrição deve ser feita de modo coerente, segundo uma estrutura e terminologia previamente definidas, às quais se atribui uma semântica não ambígua. Por exemplo, a associação entre causas e defeitos é vista como uma *relação causal*, com significado próprio e possibilidades de extrair novas informações por dedução e transitividade. Também a forma de descrever os objetos e entidades do domínio e restrições sobre suas propriedades permite antever propriedades desse domínio. O modelo do domínio descreve o conhecimento estático e genérico (no sentido de que pode ser utilizado por mais de um agente) da aplicação.

No nível mais básico, o conhecimento do domínio é representado por meio da *ontologia do domínio*, que descreve o conhecimento declarativo (como definido no capítulo de Introdução deste texto) e estático daquele domínio, a ser acessado por todos os agentes que atuam sobre ele. O termo *ontologia* foi herdado da Filosofia, onde significa uma “*explicação sistemática da Existência*” (GÓMEZ-PÉREZ e BENJAMINS, 1999). Na Inteligência Artificial, o termo foi introduzido por (NECHES et al., 1991), que definiram ontologias como “*o conjunto dos termos básicos e relações que se referem ao vocabulário de uma determinada área, assim como as regras para combinar termos e relações para definir as extensões do vocabulário*”. Gruber, em (GRUBER, 1993) propôs a definição mais citada na literatura “*uma ontologia é uma especificação explícita de uma conceitualização*” modificada posteriormente por Borst (BORST, 1997) apud (GÓMEZ-PÉREZ e BENJAMINS, 1999) para “*uma ontologia é definida como uma especificação formal de uma conceitualização compartilhada*”.

Essa definição foi posteriormente explicada por Studer e colegas em (STUDER , BENJAMINS e FENSEL, 1998). “*Conceitualização*, nesse caso, refere-se a um modelo abstrato de algum fenômeno do mundo, por terem sido identificados os conceitos relevantes para aquele fenômeno. *Explícito* significa que o conjunto de conceitos utilizados e as restrições aplicadas são previamente e explicitamente definidas. *Formal* refere-se ao fato de que se espera que uma ontologia seja processável por computador, o que exclui definições em linguagem natural, por exemplo. Finalmente, uma ontologia é *compartilhada* porque descreve um conhecimento consensual, que é utilizado por mais de um indivíduo e aceito por um grupo”.

Usos comuns de ontologias incluem a gestão de conhecimento, geração de linguagem natural, modelagem de empresas, modelagem de sistemas de conhecimento e de módulos de interoperabilidade entre sistemas, como integração de bancos de dados e data warehouse.

Os princípios básicos para o desenvolvimento de uma ontologia foram resumidos por (GÓMEZ-PÉREZ e BENJAMINS, 1999):

- clareza e objetividade: os termos devem ser acompanhados de definições objetivas e também de documentação em linguagem natural;
- completeza: uma definição deve expressar as condições necessárias e suficientes para expressar um termo, indo além das necessidades circunstanciais de uma aplicação;

- coerência para permitir derivar inferências que sejam consistentes com as definições;
- extensibilidade monôtonica: para permitir a inclusão de novos termos sem revisão das definições existentes;
- mínimo compromisso ontológico: para permitir que sejam definidas tão poucas suposições quanto possível sobre o mundo a ser modelado, permitindo que as especializações e instanciações da ontologia sejam definidas com liberdade;
- princípio da distinção ontológica: as classes definidas na ontologia devem ser disjuntas, sem superposição de conceitos;
- diversificação das hierarquias para aproveitar ao máximo os mecanismos de herança múltipla;
- modularidade para minimizar o acoplamento entre os módulos;
- minimização da distância semântica entre conceitos similares, de forma a agrupá-los e representá-los utilizando as mesmas primitivas;
- padronização dos nomes sempre que possível.

Uma ontologia do domínio é definida através de conceitos (termos ou classes organizadas em taxonomias e partonomias, e seus domínios de valores), relações, funções, axiomas e instâncias (GRUBER, 1993):

- conceitos representam qualquer coisa do domínio sobre a qual alguma coisa é dita; incluem os objetos do domínio, a descrição de uma tarefa, de uma função, ação, estratégia etc.;
- relações representam os tipos de interações entre os conceitos do domínio. São definidas formalmente como qualquer subconjunto de um produto de n conjuntos, ou seja: $R: C_1 \times C_2 \times \dots \times C_n$; neste trabalho, as relações definidas são todas binárias, como por exemplo: *parte-de*, *restringe*, *forma*, *fica-em*;
- funções são relações especiais onde o n -ésimo elemento da relação é único para os $n-1$ elementos precedentes; formalmente, funções são definidas como $F: C_1 \times C_2 \times \dots \times C_{n-1} \rightarrow C_n$; são exemplos de funções *antecedente-de* e *causa*, indicando que o valor do segundo componente da relação depende do primeiro;
- axiomas modelam sentenças que são sempre verdadeiras;
- instâncias representam elementos da ontologia.

Ontologias têm sido utilizadas para diferentes aplicações e objetivos o que permite organizar sua tipologia (GÓMEZ-PÉREZ e BENJAMINS, 1999):

- ontologias para representação de conhecimento capturam as primitivas utilizadas para formalizar o conhecimento num dos paradigmas de representação; um exemplo é a *Frame-Ontology* de (GRUBER, 1993) que captura as primitivas das linguagens baseadas em frames;
- ontologias gerais definem o vocabulário do senso comum relacionado aos objetos do mundo, eventos, tempo, espaço, relações causais, comportamento, funções etc.; é o caso da ontologia do Projeto CYC de (LENAT e GUHA, 1990);
- ontologia de alto nível fornecem as noções gerais sob as quais os termos de outras ontologias existentes podem ser relacionados; normalmente definem as regras

léxicas que permitem o mapeamento entre ontologias, como a ontologia de (GUARINO, 1995);

- meta-ontologias, também chamadas ontologias genéricas ou ontologias de núcleo são definidas de modo a serem reusáveis entre domínios, como a ontologia de meteorologia de (BORST, 1997) que explicita a partonomia do domínio e suas propriedades; essa ontologia permite conhecer as formas como os componentes dos equipamentos são combinados e compostos para construir esses equipamentos;
- ontologias de domínio são reusáveis num determinado domínio; capturam o conhecimento estático do domínio, organizando o vocabulário de conceitos do domínio e seus relacionamentos, as tarefas típicas no domínio e as teorias e princípios que os governam; o projeto Sisyphus (GAINES, 1998) apresenta um exemplo de construção de uma ontologia do domínio;
- ontologias lingüísticas contêm os principais conceitos de uma língua definidos de uma forma independente do idioma para permitir seu mapeamento entre diferentes linguagens; são utilizadas para construir sistemas de tradução ou de extração de significado de textos e documentos;
- ontologias de tarefas fornecem um vocabulário de termos utilizados para resolver problemas associados a tarefas desenvolvidas em diferentes domínios; incluem nomes, verbos e adjetivos genéricos utilizados para definir o roteiro das tarefas;
- ontologias de domínio-tarefa são ontologias de tarefa reusáveis num determinado domínio, mas não entre domínios;
- ontologias de métodos definem os conceitos e relações relevantes para especificar um determinado processo de raciocínio associado a alguma tarefa particular;
- ontologias de aplicação descrevem o conhecimento necessário para modelar uma determinada aplicação;

A ontologia especificada neste trabalho pode ser classificada como uma *ontologia do domínio*, uma vez que foi construída não apenas para atender as tarefas de interpretação de classificação de rochas, mas para organizar e preservar o conhecimento necessário para outras tarefas associadas à caracterização de reservas de petróleo.

Ontologias têm sido estudadas e propostas especialmente nos trabalhos de (GRUBER, 1992; WIELINGA e SCHREIBER, 1994; ERIKSSOM et al., 1995; GUARINO, 1995; GÓMEZ-PÉREZ e BENJAMINS, 1999; BENJAMINS, 2000) entre outros autores. A importância desse tópico deve-se ao fato de que a *formalização* do conhecimento declarativo compartilhado de um domínio tem papel fundamental na definição de quais recursos são mais adequados para uma determinada aplicação, permitindo especificá-los nas fases iniciais de projeto.

Ainda, modelos de domínio permitem o desenvolvimento de aplicações que utilizam conhecimento compartilhado e potencialmente reusável. Esse conhecimento pode ser acessado e utilizado por diferentes aplicações desenvolvidas concomitantemente ao modelo do domínio, ou posteriormente ao longo de sua vida útil. Dessa forma, o esforço em capturar e representar conhecimento para uma aplicação é diluído ao permitir sua reutilização na solução de novos problemas. Por exemplo, o conhecimento para solução de falhas num equipamento pode ser também base de conhecimento para o projeto de uma nova versão desse equipamento, ou para o treinamento dos técnicos que vão utilizá-lo.

A ontologia do domínio da Petrografia, objeto deste trabalho é apresentada no Capítulo 8 e detalhada no Anexo 4, que apresenta o modelo do domínio.

5.1.2 Modelo da tarefa

O modelo da tarefa expressa os objetivos da aplicação de uma forma precisa e sistemática e as atividades necessárias para atingi-lo. Expressa como um objetivo pode ser atingido e como diversos objetivos são interrelacionados (relações de dependência ou prioridades, por exemplo).

Um exemplo de tarefa pode ser a de achar o motivo da falha num automóvel. O fato do problema ser de diagnóstico não define a forma de solução ou como a tarefa pode ser definida. Essa tarefa pode ser abordada como a tentativa de encontrar o componente responsável pela função que não está operando de acordo ou, alternativamente, por procurar a descrição dos defeitos e componentes responsáveis por eles até encontrar o defeito que se assemelhe. Ambas abordagens são adequadas para diagnóstico, porém definem tarefas distintas.

Uma tarefa é normalmente descrita através de dois componentes: a *definição da tarefa*, que expressa qual o objetivo a ser atingido (ou seja, tem um caráter declarativo), e o *corpo da tarefa* que especifica como atingir aquele objetivo (e tem um caráter procedural) (SCHREIBER, 1992). O modelo da tarefa descreve ainda como um objetivo pode contribuir para alcançar outro objetivo, permitindo a decomposição de uma tarefa em outras mais simples, construindo a *estrutura de uma tarefa*.

O modelo da tarefa, ao contrário do modelo do domínio, é específico para uma aplicação e tipo de problema. Nele, são especificados os dados de entrada, as ações de inferência possíveis e as condições para que o objetivo seja atingido.

Considerando que a metodologia Common KADS é um recurso tipicamente orientado à tarefa, serve como exemplo de quais componentes são necessários para defini-la:

- objetivo: descrição de qual é o objetivo e como é atingido;
- papéis de entrada e de saída dinâmicos instanciados a cada execução, ou seja, quais as informações do problema são fornecidas como entrada e quais o sistema gera como saída;
- especificação da tarefa, que detalha as dependências entre os papéis envolvidos (o que deve ser verdadeiro no final da execução, o que não muda, etc.);

O corpo da tarefa é descrito por suas sub-partes:

- os sub-objetivos que a tarefa gera para ser realizada;
- as sub-tarefas responsáveis por atingir cada um dos sub-objetivos;
- a estrutura de controle da tarefa, que define como as sub-tarefas devem ser realizadas para atingir o objetivo final.

A tarefa define a relação entre um método genérico de solução de problema e os conceitos particulares do domínio descritos na ontologia. A tarefa torna explícitos quais os objetivos de um determinado sistema e que passos devem ser executados para atingi-lo.

5.1.3 Métodos de solução de problemas

Os métodos de solução de problemas (CLANCEY, 1989; STUDER, BENJAMINS e FENSEL, 1998) permitem modelar o componente dinâmico do conhecimento do domínio. É uma forma de relacionar uma tarefa e o modelo do domínio a fim de atingir determinado objetivo.

Esse formalismo de representação de tipos abstratos de raciocínio fora inspirado no processo de solução de problema de especialistas humanos. Eles não refletem, por exemplo, o método dedutivo que permite executar uma regra, mas sim o *conhecimento de controle* que diz como selecionar a regra adequada a cada momento e como combinar as deduções de um conjunto de regras.

Um método de solução de problemas é um modelo abstrato de inferência que pode ser reconhecido ou reaplicado em tarefas similares em diferentes domínios. Não é, porém, tão genérico ou equivalente aos métodos de inferência implementados nos Sistemas Especialistas de primeira geração, como encadeamento progressivo e regressivo ou resolução. Corresponde a uma generalização de um padrão de raciocínio específico, mas não é um raciocínio genérico que possa ser aplicado em diferentes classes de problemas (BENJAMINS e FENSEL, 1998).

Como exemplo (VELDE, 1993), pode-se selecionar o método de *geração e teste* para ser aplicado ao objetivo de diagnosticar uma falha num sistema. O papel de *gerar* pode ser desempenhado por uma tarefa que seleciona os componentes candidatos a responsáveis pela falha, descritos no modelo do domínio. O papel de *testar* fica a cargo de outra tarefa que verifica se o componente selecionado está funcionando perfeitamente ou não, utilizando o modelo do domínio que descreve a função de cada componente. O método de solução de problema, portanto, é responsável por propor a estratégia de solução para um determinado problema e aplicá-la até que o objetivo seja atingido.

Métodos de solução de problemas têm sido, isoladamente, o mais intenso tópico da pesquisa recente em Engenharia de Conhecimento. Consistem de um problema mal equacionado cientificamente, pela pobre compreensão dos mecanismos cognitivos de solução de problemas (STERNBERG, 1994). Sua compreensão e a geração de um modelo formal pode levar ao desenvolvimento de um conjunto de metodologias mais maduras para construção de sistemas que utilizem conhecimento.

A integração de ontologias e métodos de solução de problemas é uma área bastante promissora, especialmente quando ontologias e bancos de dados são integrados. Os métodos de solução de problemas podem então fornecer serviços de raciocínio no topo desses bancos de dados, tornando-os ativos e dinamicamente configurados em vez de repositórios passivos de conhecimento estático esperando por serem consultados (GÓMEZ-PÉREZ e BENJAMINS, 1999). Para alcançar esse objetivo, têm-se pesquisado formas de definir e catalogar os métodos de solução de problemas em bibliotecas, com seu escopo e aplicabilidade completamente descritos.

Métodos de solução de problemas, como componente de um modelo abstrato de aplicação de inferências, vêm sendo estudados por (MCDERMOTT, 1988) e (CLANCEY, 1985), ou como as Tarefas Genéricas de Chandrasekaran (CHANDRASEKARAM, 1986). Já a metodologia Common KADS (SCHREIBER, 1992; SCHREIBER et al., 1994) propõe uma biblioteca de métodos de solução de problemas que é considerada referência na área.

5.1.4 A Modelagem de conhecimento no nível do conhecimento

O processo de modelagem que utiliza a abordagem do modelo KL baseia-se num conjunto de diretrizes para construção de um modelo de conhecimento (STUDER, BENJAMINS e FENSEL, 1998) representado pelas seguintes características:

- o processo de modelagem é contínuo para buscar uma maior aproximação da realidade;
- o processo de modelagem é cíclico, logo novas observações podem causar modificações no modelo enquanto o próprio modelo dirige o processo de aquisição de conhecimento;
- o processo de modelagem é falho, uma vez que depende de interpretações subjetivas, logo, o modelo deve ser progressivamente validado em cada estágio de seu desenvolvimento.

A utilização do modelo do domínio, da tarefa e dos métodos de solução de problemas permitem tratar os tipos de conhecimentos com diferentes características de forma independente, permitindo ainda uma sistematização no processo de modelagem do conhecimento. Por conta disso, essa abordagem tem-se tornado uma unanimidade entre os pesquisadores da Engenharia de Conhecimento. Os benefícios da sua utilização podem ser medidos em diversos momentos do desenvolvimento de um sistema baseado em conhecimento, conforme apresentado a seguir.

- O modelo do domínio permite dirigir o esforço de aquisição de conhecimento para a geração de grandes bases de conhecimento, uniformes e compartilhadas, que podem atender a diversas aplicações. Isso minimiza dois grandes problemas no desenvolvimento de Sistemas Especialistas: a dificuldade de aquisição de conhecimento associada à pouca vida útil do sistema.
- O modelo da tarefa permite modelar particularidades do problema ou diferentes formas de solução sem desprezar o formalismo de modelagem. Nas abordagens convencionais isso acabava sendo feito na forma de alteração do código do sistema, dificultando enormemente sua manutenção.
- A abordagem uniforme e flexível na construção de sistemas baseados em conhecimento junto com uma metodologia de desenvolvimento mais madura permite a definição de estratégias de integração com os demais sistemas de uma organização, sejam eles convencionais ou não. As novas metodologias, portanto, não abordam apenas a modelagem do conhecimento do especialista, mas também o conhecimento organizacional e do contexto onde se inserirá o sistema respondendo às necessidades da gestão de conhecimento. Entre as mais conhecidas estão a PROTÉGÉ II (PUERTA et al., 1992), VITAL (STUTT e MOTTA, 1994) e Common KADS (SCHREIBER et al., 1999). Essa última tem sido referência para diversos autores como metodologia de projeto de sistemas de conhecimento.
- As bibliotecas dos métodos de solução do problemas são as que, de fato, garantem a viabilidade de uma modelagem de conhecimento independente, ao permitir que a efetiva aplicação da inferência seja definida de forma abstrata. Tornar independente o método de resolução, tradicionalmente embutido no código do mecanismo de inferência a na própria organização da base de conhecimento (como a ordenação de regras de produção, por exemplo), permite definir componentes de software para

desenvolvimento modular de sistemas baseados em conhecimento. Essa mudança de paradigma aproximou o processo de construção de sistemas baseados em conhecimento ao processo de desenvolvimento de um software convencional. As principais diferenças são listadas na Tabela 5.1⁶.

TABELA 5. 1 – Comparação da análise de sistemas para construir software convencional e da análise de conhecimento para desenvolver Sistemas Especialistas (GARDNER et al., 1998).

Análise de Sistema enfatiza	Análise do Conhecimento enfatiza
Necessidades do usuário	Necessidades da perícia e do usuário
Informações e dados factuais, processos e procedimentos	Aplicação cognitiva dos dados e da informação
Entradas, saídas e fluxo de dados	Conceitos e estratégias de solução de problemas
Dados quantitativos	Dados heurísticos e subjetivos
Técnicas estruturadas	Aquisição cognitiva do conhecimento e técnicas de análise
Aspectos sintáticos do domínio e seus processos	Riqueza semântica do domínio e raciocínio de solução de problemas

As metodologias baseadas em modelos KL significaram um grande avanço no desenvolvimento dos sistemas baseados em conhecimento ao definirem um conjunto de ferramentas conceituais consistentes para suportar a modelagem do conhecimento. Ainda assim, a aplicação dessas metodologias fica limitada por diversos problemas, descritos a seguir.

- As primitivas de modelagem de conhecimento do domínio baseadas em conceitos, atributos, relações e regras são insuficientes para refletir a riqueza do domínio. A perícia é fortemente dependente da organização e indexação dos conceitos do domínio que permitem ao especialista desenvolver inferências em diferentes níveis de abstração e diferentes dimensões sobre o domínio, mantendo a correspondência dos objetos num nível ou em outro. São necessários construtos mais estruturados que suportem a organização do domínio.
- Uma primitiva do tipo *dimensão* deveria ser definida segundo a utilidade, contexto ou granularidade da informação que representa. Por exemplo, em Petrografia poderiam ser definidas duas dimensões, uma para externalização do conhecimento e outra de interpretação. Essas dimensões não necessariamente têm relação com a taxonomia ou partonomia do domínio e também não têm correspondência com os papéis do domínio. Relacionam-se efetivamente com um passo de inferência, porém

⁶ (Karen Gardner et al. [GARDNER et al., 1998] propõem o uso do termo *Análise de Conhecimento*, no lugar de *Engenharia de Conhecimento*, com a intenção de enfatizar o esforço de análise no processo cooperativo de construção de um modelo.

representam conhecimento declarativo e não procedural. Dimensões permitem agrupar pedaços do conhecimentos para tratá-los como um objeto único, mantendo o significado e o objetivo desse agrupamento, bem como a relação com outros objetos.

- A primitiva do tipo *dimensão* deveria estar associada a todos os conceitos necessários para as operações de inferência. Ou seja, na dimensão de externalização do conhecimento seriam descritos os objetos reconhecidos e descritos em termos de componentes geométricos, enquanto na dimensão de inferência seriam descritos os conceitos gerados por empacotamento cujo significado seja imediatamente aplicável à inferência. Relações de especialização, agregação ou conjunto mapeiam os objetos de uma dimensão para a outra.
- A primitiva do tipo *dimensão* poderia ser útil ainda para definir a interface adequada para cada classe de usuário, assim um usuário classificado como novato estaria associado à dimensão de externalização, enquanto um usuário especialista estaria associado à dimensão de inferência.
- As primitivas de inferência têm, em sua maioria, definições ambíguas, sendo descritas de forma conflitante por diferentes autores (GARDNER et al., 1998; SCHREIBER et al., 1999). O número de tipos de inferências necessárias para realizar o raciocínio aparenta ser menor do que a quantidade descrita de modo pouco claro na literatura. Por outro lado, alguns passos de inferência, como a verificação de similaridade que suporta o raciocínio analógico, não são disponibilizados (devido aos problemas práticos para implementar tal raciocínio).
- Os métodos de solução de problemas, embora consistam em uma iniciativa notável ao disponibilizarem modelos explícitos e diferenciados de inferência, ainda são de difícil aplicação num processo real de modelagem.

A expansão da abordagem de modelagem para a Engenharia de Conhecimento, não extinguiu, no entanto, a necessidade da aquisição de conhecimento de suas fontes ou da eliciação a partir de um especialista. Os métodos de aquisição devem servir às necessidades de modelagem e, normalmente, são ciclicamente incrementados por elas.

A *aquisição de conhecimento* corresponde ao processo de coleta, eliciação, interpretação e formalização de dados sobre o funcionamento da perícia num determinado domínio, com a finalidade de construir um sistema baseado em conhecimento. O processo de aquisição busca extrair o conhecimento de suas diversas fontes, humanas ou artificiais, como livros, manuais, documentos ou sistemas. Ainda é vista como o gargalo no desenvolvimento de Sistemas Especialistas, em parte devido às dificuldades em compreender os mecanismos da perícia, em parte devido à falta de treinamento dos analistas de sistemas nas técnicas de eliciação.

A *eliciação de conhecimento* é conhecida como o processo de extrair conhecimento de fontes humanas, particularmente, dos especialistas do domínio, e por isso alimenta-se de técnicas oriundas da Psicologia ou Ciência da Cognição.

5.2 Extração de modelos por aprendizagem de máquina

Além da transferência e modelagem, que, sob diferentes formas, são abordagens que buscam produzir um *modelo* de funcionamento do domínio, outros paradigmas para desenvolvimento de sistemas baseados em conhecimento podem ser considerados. Alguns desses paradigmas buscam extrair automaticamente o modelo do domínio, seja

através de uma abordagem simbólica, como no caso das redes bayesianas, ou numéricas, através de redes neurais. Outras abordagens fazem reuso de soluções sem uma definição explícita de um modelo, como aplicado por sistemas de raciocínio baseado em casos. Essas alternativas serão apresentadas a seguir, com uma maior ênfase a raciocínio baseado em casos, que foi utilizado para aquisição de conhecimento e construção do modelo do domínio neste projeto.

5.2.1 Raciocínio baseado em casos

Raciocínio baseado em casos ou RBC (RIESBECK e SCHANK, 1989; KOLODNER, 1993; WATSON, 1997) é um enfoque de representação e processamento de conhecimento que utiliza a experiência passada para resolver problemas. A idéia é descrever e acumular descrições de *casos*, ou instâncias de problemas na área do conhecimento especializado, e tentar descobrir, por analogia, quando um determinado problema é similar a um outro já resolvido. Dessa forma, a solução já aplicada ao problema pode ser utilizada novamente ou adaptada para o caso em questão. Embora RBC alimente-se das técnicas de desenvolvimento e de eliciação de conhecimento geradas para servir à abordagem de modelagem, desenvolver um sistema de RBC *não* passa pela produção de um modelo do domínio, mas sim pela coleta e representação de instâncias de problemas resolvidos naquele domínio (Figura 5.2) que são armazenados em uma base de casos.

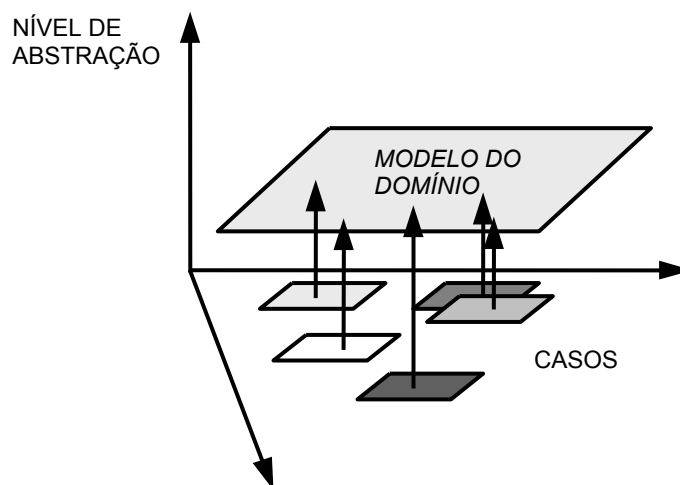


FIGURA 5.2 - Raciocínio baseado em casos. A modelagem convencional de conhecimento exige a construção de um *modelo* do domínio a partir de um estudo e compreensão dos problemas da aplicação. Um sistema baseado em casos utiliza a descrição dos próprios problemas - *casos* - para a busca da solução.

Um *caso* é uma descrição completa de um problema do domínio com a respectiva solução aplicada, mais uma avaliação da eficácia dessa solução. É descrito de forma similar a uma tabela, ou seja, através da enumeração e qualificação de atributos e valores. O conjunto dos casos é indexado por seus atributos de forma a agilizar a busca e recuperação de casos similares. O sistema irá recuperar o caso cuja descrição mais se aproxima do problema apresentado. O caso então é adaptado (modificado) para ajustar-

se ao problema e apresentar a solução mais adequada. O novo caso é apreendido pelo sistema e passa a fazer parte do banco de casos disponíveis.

A utilização da abordagem de casos para a construção de sistemas baseados em conhecimento tem vantagens notáveis:

- casos fornecem uma amostragem significativa do tipo de problemas que o sistema deve resolver;
- a aquisição de conhecimento é facilitada, especialmente em domínios pouco estruturados e muito complexos, mesmo antes de uma perfeita compreensão do domínio;
- é possível fazer reuso do conhecimento armazenado em bancos de dados e outras fontes;
- permite o encapsulamento da descrição do conhecimento com a solução aplicada;
- a manutenção do banco de conhecimento pode ser realizada por aprendizagem automática de novos casos com pouca ou nenhuma interferência de um engenheiro de conhecimento.

Em contraste, a utilização de casos é muitas vezes limitada por alguns problemas inerentes à abordagem:

- dificilmente os casos estão disponíveis de forma confiável, em quantidade suficiente e com boa representatividade sobre o domínio (como pode ser observado neste projeto), inviabilizando a aplicação dos algoritmos de recuperação como forma de solução de problemas;
- os algoritmos de recuperação por similaridade não mostram bom desempenho em aplicações reais, onde as comparações feitas por um especialista tendem a ser muito mais sofisticadas e de difícil compreensão do que as implementadas em sistemas de casos;
- não existem bons algoritmos de adaptação que permitam ao sistema fornecer soluções adequadas ao problema apresentado pelo usuário, se esse não for muito parecido com algum previamente descrito.

Raciocínio baseado em casos tem-se mostrado uma opção eficaz para adquirir conhecimento em domínios complexos, minimizando o tempo aplicado no processo de eliciação de fontes humanas. Mesmo nas tarefas onde o raciocínio por medida de similaridade não é aplicável, como neste trabalho, a modelagem de conhecimento por casos mostra-se uma alternativa eficaz para representação e compreensão das formas de inferência do domínio.

5.2.2 Redes neurais

A abordagem de redes neurais (FREEMAN e SKAPURA, 1992; MICHIE , SPIEGELHALTER e TAYLOR, 1994) surgiu como uma tentativa de obter um modelo computacional do funcionamento do cérebro humano, inicialmente na simulação de habilidades humanas como fala e uso da linguagem e, posteriormente, em aplicações comerciais como reconhecimento de padrões e mineração de dados. Atualmente, redes

neurais são especialmente aplicadas às tarefas de classificação e previsão com base em séries temporais.

Embora exista uma grande classe de técnicas sob essa denominação, redes neurais geralmente se referem a camadas de nodos interconectados, cada nodo produzindo uma função não linear da sua entrada. Essa entrada pode ser originada de uma camada superior da própria rede ou diretamente dos dados entrados. A rede completa, portanto, representa um conjunto complexo de interdependências que incorporam qualquer grau de não-linearidade, permitindo modelar um conjunto bastante genérico de funções entre suas entradas e padrões de saída a partir de exemplos.

Embora inicialmente proposta como uma abordagem de tratamento numérico, a partir dos trabalhos de (MOONEY et al., 1989) e (FISHER e MCKUSICK, 1989), redes neurais foram consideradas comparáveis a outras abordagens simbólicas na capacidade de representar conhecimento. Uma forma simples de construir uma representação simbólica em uma rede neural foi proposta para o sistema KBANN (TOWELL e SHAVLIK, 1992) e considera um mapeamento entre implicações lógicas (ou regras de produção) e redes neurais (SHAVLIK, 1992) (Tabela 5.2):

TABELA 5.2 – Correspondência entre representação de implicações lógicas e redes neurais.

Teoria do Domínio	Redes Neurais
conclusão	nós de saída
conclusões intermediárias	nós escondidos
fatos	nós de entrada
antecedentes de uma regra	conexões de maior peso

A Figura 5.3 (SHAVLIK, 1992) apresenta um exemplo de como um conjunto de implicações poderia ser mapeado para uma árvore de decisão e, posteriormente, para redes neurais. Na rede neural as linhas mais espessas correspondem às dependências entre as regras e os pesos são definidos de forma a que os nodos sejam ativados somente quando a teoria do domínio suporta a dedução correspondente.

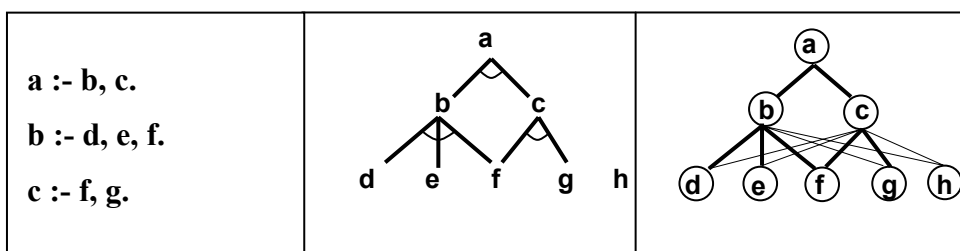


FIGURA 5.3 – Mapeamento de implicações do domínio para uma árvore E-OU e desta para uma rede neural.

O grande apelo de redes neurais é o de permitir extrair conhecimento de bases de dados, onde elas existem, ao reconhecer padrões de ocorrência ocultos naqueles dados. Como forma de representação de conhecimento simbólico em si, no entanto, demonstra o mesmo problema das regras de produção e da lógica. Ao disponibilizar primitivas de

representação homogêneas e de granularidade muito fina, tornam a tarefa de modelar grandes bases de conhecimento de aplicações reais excessivamente complexa.

5.2.3 Redes bayesianas

Redes bayesianas são grafos dirigidos e acíclicos, nos quais os vértices representam variáveis aleatórias e os arcos suas interdependências, quantificadas por probabilidades condicionais. As variáveis podem representar atributos dos conceitos do domínio, ligadas a conclusões ou conclusões parciais. As probabilidades podem ser obtidas automaticamente por medidas de frequência sobre bases de dados, onde as ocorrências passadas passam a significar probabilidades de ocorrências futuras. Podem ser ainda obtidas por eliciação de conhecimento, demonstrando a crença do especialista na ocorrência de um determinado evento frente à evidência da ocorrência de outro evento relacionado, representado pelas variáveis aleatórias (ADAMS, 1984).

Redes bayesianas são redes probabilísticas que surgiram como uma alternativa para tratar probabilidades condicionais através das relações de dependências apenas entre as variáveis dependentes do domínio. Baseia-se em princípios matemáticos fundamentados e permite modelar o conhecimento do especialista de forma intuitiva. Porém, especialistas como médicos e geólogos, parecem aplicar um mecanismo eficaz para extrair conclusões de um conjunto incompleto de informações, que embora não tenha base formal, aparenta aperfeiçoar-se com a experiência. Não parece ser um consenso entre os médicos (LEÃO, 1988) de que redes bayesianas reflitam esse mecanismo, mesmo que parcialmente. Em Geologia esse método mostra-se ainda mais inadequado para representar a influência de informações parciais sobre a decisão tomada.

5.3 Métodos de eliciação de conhecimento

No contexto deste trabalho, as técnicas de eliciação serão analisadas para abordagem de modelagem e sob o enfoque de construir Sistemas Especialistas em domínios intensivos em conhecimento, onde um único especialista costuma dominar uma área de aplicação. Esse não é, na verdade, o único objetivo da aquisição de conhecimento. Cada vez mais, as técnicas são utilizadas para dirigir entrevistas com usuários e clientes para coleta de requisitos na construção de sistemas convencionais, obter informação dos trabalhadores de conhecimento (CORTADA, 1998) para modelar organizações, ou simplesmente transferir conhecimento entre diferentes profissionais.

Esta seção apresenta um resumo das técnicas mais conhecidas de eliciação de conhecimento. Uma análise mais extensiva do método pode ser obtida em (WRIGHT e AYTON, 1987; GAINES e BOOSE, 1988; MOTODA et al., 1991) ou nos anais dos simpósios de aquisição de conhecimento (*Workshop on Knowledge Acquisition for Knowledge-Based Systems, European Knowledge Acquisition Workshops*).

As técnicas de eliciação de conhecimento ajudam a reduzir os problemas de comunicação no processo de aquisição de conhecimento de fontes humanas. A seguir serão apresentadas e avaliadas as principais classes de técnicas de aquisição de conhecimento (GARDNER et al., 1998), com especial ênfase àquelas utilizadas neste projeto. Embora o especialista seja considerado a principal fonte de conhecimento por excelência, num projeto de Sistema Especialista, além do especialista, devem ser também entrevistados usuários potenciais do sistema, gerentes e outros profissionais detentores de partes do conhecimento envolvido na solução de problemas.

5.3.1 Entrevistas

É o método mais comum e tradicional para eliciar conhecimento. Corresponde à técnica inicial de qualquer projeto de Engenharia de Conhecimento, onde o engenheiro de conhecimento conversa diretamente com o especialista, questionando diversos aspectos envolvidos na solução de problemas naquele domínio. O processo de entrevista, no entanto, sempre fornece um conjunto incompleto de informações, independente dos cuidados com que é realizada. A qualidade dos resultados varia em função das habilidades de comunicação do entrevistado e da experiência e capacidade de compreensão do entrevistador, qualidades que raramente andam juntas.

Do ponto de vista cognitivo, as entrevistas têm por objetivo:

- alcançar alguma familiaridade com o especialista, de modo a conhecer seus métodos usuais de raciocínio, vocabulário e características pessoais que possam interferir na aquisição de conhecimento (timidez, falta de objetividade, comunicação obscura);
- obter compreensão sobre o funcionamento do domínio;
- coletar fatos do domínio.

As primeiras entrevistas são ditas *não-estruturadas*, onde questões muito gerais são perguntadas para o especialista que é deixado responder livremente. As questões comuns para esse tipo de entrevista são:

Quais as expectativas a respeito desse projeto?

Qual é o problema a ser resolvido? Como é reconhecido?

Como é resolvido?

A partir da compreensão inicial do problema, são realizadas as *entrevistas dirigidas*, onde as perguntas referem-se a um assunto previamente definido, que é particularmente analisado. Exemplos de tópicos a serem estudados são:

- identificação dos processos principais envolvidos na aplicação;
- definição do nível do conhecimento esperado no usuário do sistema;
- definição do detalhamento (granularidade) das informações a serem modeladas;
- especificações gerais do sistema a ser proposto;
- expectativas de interface do sistema.

As *entrevistas estruturadas* são projetadas para eliciar fatos precisos da aplicação, em detalhes. Seguem um formato ou estrutura pré-definida. Exemplos das questões para esse tipo de entrevista podem ser:

Descreva os passos para a identificação do defeito mencionado.

Quais são as entradas necessárias nesse processo?

Quais desses termos estão relacionados ao equipamento X?

Entrevistas são inevitáveis num processo de aquisição de conhecimento e têm a vantagem de estabelecer rapidamente uma ligação entre o engenheiro de conhecimento e especialista. Não é possível, no entanto, basear todo o processo de eliciação em entrevistas, embora pareça ser possível nas etapas iniciais da engenharia do conhecimento. Alguns dos problemas típicos da obtenção de informação por entrevistas são discutidos a seguir:

Descrições verbais sempre são tendenciosas e incompletas. O especialista explica o processo de solução de problema da forma como ele *acha* que acontece, ou da forma que seja mais fácil para o entrevistador compreender, não da forma como efetivamente acontece.

Por exemplo, em (ABEL, M. 1988), o especialista na identificação de ambientes sedimentares descreve o processo de identificação de turbiditos como dependente da análise de 10 a 55 diferentes características geológica, dependendo da complexidade do ambiente. Contrariamente, ao ser observado durante o processo de solução, o geólogo não coleta mais do que 7 informações para sugerir a interpretação e essas informações são aquelas de menor custo de obtenção (ou seja, são obtidas por observação direta, não exigindo exames de laboratório ou sondagens, por exemplo). Não foi possível, no entanto, através de entrevistas, esclarecer como o especialista seleciona quais são as informações relevantes para resolver o problema.

O processo de comunicação não depende apenas do emissor, no caso, do especialista, mas também da capacidade do receptor, o engenheiro de conhecimento, de *decodificar* a informação. Mesmo que se parta do princípio de que o engenheiro de conhecimento deve ser treinado a ser imparcial na captação do conhecimento (REGOCZEI e HIRST, 1994), a completa isenção de julgamento é humanamente impossível de ser atingida.

Para grande parte dos domínios, uma parte do conhecimento simplesmente não tem tradução verbal, logo não é explicitado através de entrevistas. Essa dificuldade é tanto maior quanto mais sensório for o domínio.

Em (ABEL, 1988), mesmo em entrevistas realizadas imediatamente após a solução do problema, o especialista mostrou-se incapaz de descrever com clareza quais foram as observações que subsidiaram o processo de decisão. Descrições vagas como “*o terreno tem o jeito de*” ou “*esse local claramente se parece com*” indicaram que o processo de reconhecimento das feições diagnósticas era parcialmente subconsciente.

Shadbolt e Burton avaliam métodos de eliciação de conhecimento num domínio de Arqueologia, com especialistas no reconhecimento de cerâmicas antigas. Os autores reportam que “os estudos sugerem que os especialistas nesse domínio normalmente utilizam dimensões visuais, não-verbalizáveis, para caracterizar as cerâmicas” (SHADBOLT e BURTON, 1990). No mesmo estudo, a identificação de rochas ígneas mostra-se como outro domínio onde as entrevistas tem um fraco desempenho em esclarecer a forma de solução de problemas dos especialistas.

Entrevistas devem ser utilizadas nas fases iniciais da aquisição de conhecimento, nunca como técnica única. Com elas é possível identificar o escopo da aplicação, o tipo de domínio do conhecimento e planejar os próximos passos no processo de aquisição, bem como apontar para as técnicas de eliciação mais adequadas para as etapas subsequentes.

5.3.2 Análise de protocolos

É uma técnica que visa obter informações detalhadas a respeito do processo particular de solução de problemas. Considerando o problema em foco, por exemplo o diagnóstico de falha num equipamento, normalmente o processo é decomposto em subprocessos - analisar a possibilidade de falha em cada componente do equipamento - e a análise de protocolo é aplicada para cada uma das partes, devido a complexidade da informação obtida.

O especialista deve ter em mente as seguintes questões:

Qual meu objetivo nesse processo?

Quais são os métodos aplicados?

O que estou vendo/procurando com este processo?

O especialista executa o processo e, durante a solução, verbaliza seus pensamentos de forma a que sejam registrados. As entrevistas são gravadas e filmadas para posterior análise. A partir da análise de protocolos, as listas de termos do domínio são extraídas, as taxonomias de domínio são propostas e validadas pelo especialista, e algumas regras e fatos do domínio podem ser reconhecidos. A eficácia da análise de protocolos tem sido demonstrada em vários estudos (ERICSSON e SIMON, 1980) e é uma técnica onipresente no processo de aquisição de conhecimento ou análise cognitiva em diversos domínios.

As vantagens da aplicação dessa técnica devem-se principalmente a:

- processo real de solução é analisado, ao contrário das descrições estilizadas feitas posteriormente ao momento de solução de problema. (ABEL, 1988) demonstrou que existem grandes diferenças entre o processo descrito pelo especialista e aquele efetivamente realizado por ele;
- registro da entrevista permite uma análise posterior mais cuidadosa, que permite reconhecer os termos mais utilizados ou com mais frequência;
- ausência de um intervalo entre a solução de problema e posterior descrição pelo especialista, evitando distorções;
- a análise é feita com o nível de detalhe adequado à solução;
- as informações incompletas são facilmente identificadas;
- a utilização de informações não-verbalizáveis é evidenciada na seqüência do processo.

A análise de protocolos, no entanto, tem limitações significativas:

- nas as atividades que não seguem uma seqüência linear de solução;
- em algumas situações que simplesmente não permitem a verbalização durante o processo de solução;
- em aplicações que envolvam atividades motoras ou sensórias;
- pelo alto custo envolvido na aplicação da técnica e por ser altamente consumidora de tempo.

Uma característica da verbalização durante o processo de solução foi reconhecida em diversos experimentos que utilizaram análise de protocolos (ERICSSON e SMITH, 1991): o especialista interrompe a verbalização da solução quando a solução torna-se não trivial, ou quando há necessidade de buscar caminhos alternativos de solução. As heurísticas utilizadas nesses momentos são importantes e devem ser posteriormente investigadas através de entrevistas. Essa característica será discutida na Seção 6.2, Análise da Perícia.

5.3.3 Classificação de termos

Refere-se a um conjunto de técnicas que visa a identificação e organização de termos ou conceitos e seus relacionamentos num domínio particular, segundo a visão do especialista. Uma lista de termos do domínio é obtida a partir das entrevistas iniciais ou extraída da análise de protocolos. A técnica mais conhecida, a de *classificação de fichas* (WRIGHT e AYTON, 1987), consiste em escrever cada um desses termos num cartão e solicitar ao especialista que divida sucessivamente esses grupos de cartões em dois ou três grupos segundo o critério que desejar. O especialista deve incluir termos que deveriam estar presentes ou retirar aqueles que não tem utilidade para o raciocínio.

Os resultados obtidos com as técnicas de classificação de termos são o reconhecimento da hierarquia do domínio, a obtenção de termos não evidenciados através de entrevistas, o reconhecimento de conceitos que são sinônimos (um objeto mencionado com dois nomes diferentes) além de uma melhor compreensão global do domínio. A técnica é particularmente útil em domínios onde os métodos de solução de problemas são especialmente de classificação. Mesmo nesses casos, a aplicação torna-se difícil nos domínios muito complexos onde um número excessivamente grande de termos pode inviabilizar o uso de cartões. A prática aponta que os melhores resultados são obtidos quando a técnica é aplicada sobre menos do que uma centena de conceitos. Resultados medíocres são também obtidos em domínios excessivamente procedimentais, onde a explicitação das hierarquias de termos não parece fazer senso ao especialista.

5.3.4 Focalizando contextos ou cenários

Contextos ou cenários são casos de teste tanto reais quanto criados especialmente para enfatizar algum aspecto do problema. O engenheiro de conhecimento apresenta problemas definidos ao especialista e solicita que ele os resolva. As condições podem ser alteradas dinamicamente de forma a evidenciar os pontos essenciais do método aplicado. Quando os cenários refletem aspectos reais do domínio e são construídos para evidenciar particularidades dos processos de solução, esse método permite equacionar as necessidades de tratamento de incerteza nos métodos do especialista, definir prioridade de regras e tratamento de informações incompletas.

5.3.5 Observação

Observação corresponde a técnica de assistir o especialista enquanto este está executando uma tarefa, tanto real como simulada. A observação pode incluir ou não a possibilidade de interrupção. No primeiro caso, o engenheiro de conhecimento pode interromper o especialista durante o processo de solução para fazer perguntas ou tirar dúvidas. No segundo caso, irá apenas tomar notas ou filmar, sem nenhuma intervenção no processo. A experiência demonstra que a qualidade da observação é melhor no processo sem interrupção, desde que essa altera o caminho natural de raciocínio do especialista, que possivelmente prosseguirá na tarefa utilizando métodos mais compreensíveis ao observador, porém não os mais eficientes.

A técnica da observação tem a vantagem de garantir uma visão realista do processo de solução no ambiente onde ele ocorre, raramente obtida através de entrevistas. Nessa situação, o processo tende a mostrar-se mais simples (mas não mais claro) do que descrito pelo especialista. Nem sempre, no entanto, é possível realizar a observação direta. Outro problema é que assistir o processo de decisão não permite compreender

porque as decisões foram tomadas, o que é essencial na aquisição de conhecimento. As razões devem ser questionadas posteriormente através de entrevistas.

5.3.6 Recuperação de eventos

Essa técnica é utilizada para recuperar casos não triviais de solução de problemas. O especialista é convidado a descrever uma situação particular pela qual passou e qual a solução proposta. A recuperação de eventos só é efetiva para reconstruir situações de exceção, uma vez que os indivíduos tendem a esquecer situações que repetem-se diariamente e armazenar apenas aquelas que foram não usuais. Quando convidados a descrever uma situação do dia a dia, o especialista irá *construir* a ocorrência a partir do modelo (ou *script*) daquela situação construído pela experiência e não lembrar-se de uma situação já vivida. A técnica é adequada para complementar o modelo do conhecimento em relação a situações possíveis mais não usuais, ou ainda para identificar os limites do processo de solução.

5.3.7 Grafos de conhecimento

A técnica de grafos de conhecimento, como uma técnica de eliciação de conhecimento foi proposta por (LEÃO, 1988; LEÃO e ROCHA, 1990), para caracterização da perícia na identificação de cardiopatias congênitas.

Um grafo de conhecimento é uma árvore AND/OR com três tipos de nodos:

- nodos de hipóteses, que representam as hipóteses de interpretação consideradas no grafo;
- nodos de evidências, que representam as diferentes características que suportam a interpretação, propostas pelo engenheiro de conhecimento ou incluído pelo especialista e dispostos em ordem de importância no grafo;
- nodos intermediários que representam diferentes agrupamentos de evidências utilizados pelo especialista para resolver o problema.

A técnica de aquisição de conhecimento pode ser descritas através dos seguintes passos:

1. Coleta e definição de uma lista de sinais clínicos (ou sintomas), obtidos da literatura médica e daqueles mencionados pelos especialistas, totalizando 210 sinais.
2. Identificação do conjunto existente de diagnósticos possíveis para cardiopatias congênitas (12 diagnósticos).
3. Cada um dos médicos do experimento, com experiência em Cardiologia que poderia ir de um novato a um especialista, foi solicitado selecionar entre os sinais clínicos coletados aqueles associados a cada um dos diagnósticos. Novos sinais poderiam ser acrescentados à lista.
4. Cada um dos médicos foi solicitado, por sua vez a ordenar os sinais, de acordo com sua ordem de importância decrescente para aquela cardiopatia.
5. A construção do grafo é realizada por colocar os sinais ordenados na base do grafo e o diagnóstico no topo ou raiz do grafo.
6. Os médicos devem mostrar graficamente as associações entre sinais para suportar o diagnóstico, criando, se necessário, os nodos intermediários que representam essas associações. Se um sinal clínico sozinho é capaz de suportar o diagnóstico, uma

única linha ligará esse sinal ao diagnóstico (como o sinal de peso 7 da Figura 5.3). Se esse sinal só for significativo se associado a outros sinais, essa associação será representada através de um nodo intermediário com conexões para cada um dos sinais e uma única conexão até o nodo de diagnóstico, como demonstrado pelas três primeiras evidências do grafo da Figura 5.4 (Extraído de (LEÃO, 1988)).

7. Após a construção do grafo, são atribuídos *índices de significância*, na escala de 0 a 10, para cada um dos nodos de sinais e nodos intermediários. Esses índices devem representar a confiança do especialista no diagnóstico representado, caso apenas o sinal ou os sinais representados por aquele nodo fossem encontrados.

Os grafos de conhecimento possuem maior poder de expressão quando comparados com regras de produção, ao permitirem que sejam expressados, não apenas as evidências que levam as conclusões, mas também como essas evidências se combinam para indicar determinada conclusão e o quanto elas influenciam, individual ou coletivamente, para confirmar uma determinada hipótese.

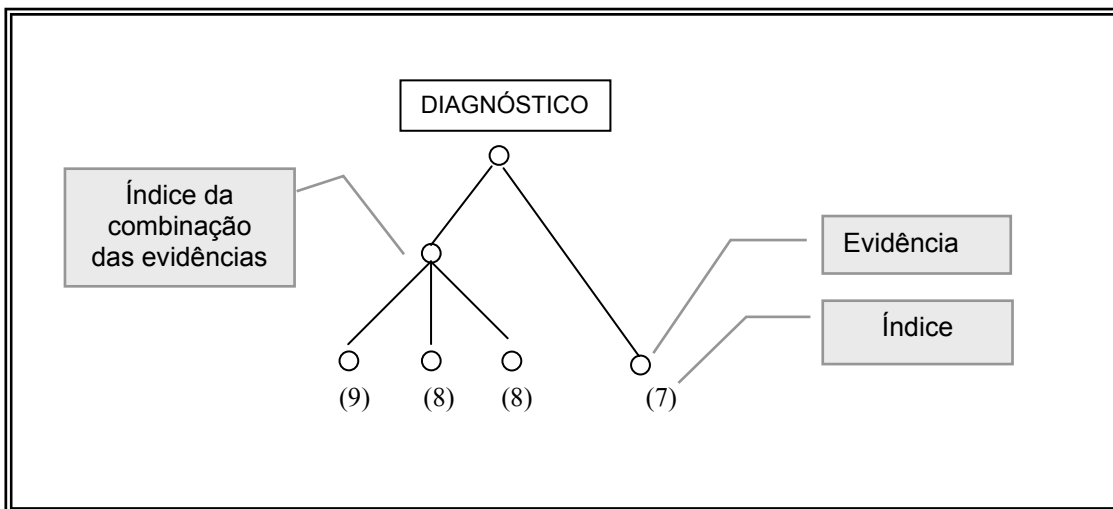


FIGURA 5.4 - Grafo de conhecimento representando como as evidências são combinadas para sugerir um diagnóstico clínico.

Assim como regras, não está implícito nos grafos de conhecimento a forma como eles serão aplicados para atingir uma determinada conclusão, ou seja, de que forma o raciocínio deve ser desenvolvido. Grafos expressam apenas como determinadas informações disponíveis no modelo do domínio estão relacionadas a uma determinada conclusão.

Nos anos recentes, diversos formalismos de modelagem disponibilizam linguagens baseadas em formas gráficas. Especialmente os Grafos Conceituais de (SOWA, 1984) foram utilizados em diversas propostas para suportar as tarefas de aquisição e modelagem de conhecimento (MARTIN, 1995; MINEAU, 1995; MÖLLER e WILLEMS, 1995). Já a linguagem MODEL-ECS de (LUKOSE, 1996) disponibiliza grafos como estruturas conceituais para representar conhecimento declarativo, incluindo relações causais com o objetivo de criar uma representação diretamente executável, como é a aspiração neste projeto. Nenhuma das linguagens acima prevê, no entanto, a

aquisição e representação de representação e tratamento de índices de significância ou alguma outra forma de inferência sobre informações incompletas como necessárias nesse trabalho.

5.4 Projeto de sistemas baseados em conhecimento

A abordagem de modelagem para desenvolvimento de Sistemas Especialistas tem produzido diversas metodologias de desenvolvimento. O objetivo comum de todas elas é estabelecer um padrão para o projeto de software baseado em conhecimento, desde a coleta de requisitos junto ao usuário e especialista, até a etapa de implementação do sistema. Por sua dificuldade e particularidade para projetos de sistemas baseados em conhecimento, a ênfase maior está na especificação formal do modelo do conhecimento como uma consequência natural da fase de aquisição de conhecimento. As estruturas de modelagem especificam o sistema no *nível do conhecimento* (NEWELL, 1982; VELDE, 1993), sem uma definição antecipada de uma ou outra abordagem de implementação, eliminando vícios comuns do desenvolvimento por prototipação incremental, onde a forma de implementação (por exemplo, sistemas simbólicos baseados em regras ou frames) era definida antes da completa compreensão do problema.

KADS (SCHREIBER, 1992; WIELINGA et al., 1992) e seu subsequente desenvolvimento Common KADS (SCHREIBER et al., 1994) são as mais conhecidas destas metodologias. Notabilizaram-se ao definir uma estrutura de modelos da perícia que permite organizar componentes reusáveis para representar conhecimento do domínio, da tarefa e de inferência, além de métodos de solução de problemas e conhecimento estratégicos, nunca anteriormente descritos como componentes isolados. MIKE (ANGELE, FENSEL e STUDER, 1996) suporta a aquisição e representação de conhecimento utilizando um formalismo que permite a subsequente execução. PROTÉGÉ-II (ERIKSSOM et al., 1995) explora a noção de ontologias para descrever o domínio. VITAL (STUTT e MOTTA, 1994) fornece suporte para todas as fases do desenvolvimento de sistemas baseados em conhecimento, desde a coleta de requisitos até a implementação, através de quatro produtos: a especificação dos requerimentos, o modelo conceitual, o modelo funcional, o modelo de projeto técnico e o código executável. O modelo conceitual contém a descrição do domínio e dos métodos de solução de problemas.

O conceito de *reusabilidade* exige que os modelos de conhecimento sejam definidos em termos de primitivas que resolvam não apenas uma tarefa em particular. É necessário que os conceitos modelados possam suportar outras tarefas no mesmo domínio. Assim, um sistema que modele doenças e sintomas, pode ser utilizado num momento para a tarefa de diagnóstico de doenças em pacientes e, posteriormente, para realizar planejamento estratégico de estoque de medicamentos. Para alcançar esse objetivo, as metodologias prevêm formas de modelar as tarefas de modo independente do conhecimento declarativo, ao contrário das abordagens baseadas em transferência.

Essa visão foi formalizada através da *ARPA Knowledge Sharing Effort* (GÓMEZ-PÉREZ e BENJAMINS, 1999) que propôs que "*construir sistemas deveria ser um feito pela montagem de componentes reusáveis. Os desenvolvedores de sistemas apenas devem preocupar-se com construir o conhecimento especializado e os raciocinadores para a tarefa especificada. Este sistema deve interoperar com os sistemas existentes, usando-os para realizar partes do raciocínio. Desta forma, o conhecimento declarativo, técnicas de solução de problemas e serviços de raciocínio estão entre os componentes*

compartilhados". Essa estratégia permite construir sistemas melhores e mais baratos em prazos menores.

Como o padrão de modelagem mais conhecido, a metodologia Common KADS será aqui descrita e utilizada ao longo deste trabalho para comparar e explicar a funcionalidade dos modelos propostos.

5.5 Metodologia Common KADS

O objetivo básico da metodologia Common KADS (SCHREIBER et al., 1999) é dar suporte ao desenvolvimento de sistemas baseados em conhecimento em todas as suas fases e aspectos. Isso significa que a modelagem não se preocupa apenas com a aquisição e representação de conhecimento especialista, mas também com os aspectos organizacionais que definem onde esse conhecimento se insere e como é utilizado por usuários ou clientes. Common KADS parte de um conjunto de princípios que norteiam a aplicação da metodologia, dentre os quais, os principais são (SCHREIBER, 1992):

- Princípio da Modelagem: o desenvolvimento de um sistema baseado em conhecimento é visto como a construção de um conjunto de modelos de comportamento para a solução de problemas em uma organização. Um sistema baseado em conhecimento é a realização computacional associada a esses modelos.
- Princípio da Limitação de Papéis: um agente inteligente pode ser modelado por atribuir-lhe um conjunto de estruturas de conhecimento e os papéis que essas estruturas devem desempenhar no processo de solução de problemas.
- Princípio da Tipagem do Conhecimento: um modelo, no nível do conhecimento, pode ser visto como consistindo de três diferentes categorias de conhecimento (ou tipos): *conhecimento do domínio*, *conhecimento da tarefa* e *conhecimento de inferência*. Além desses, há também o *conhecimento de solução de problemas*, que compõem não uma quarta categoria, mas uma especificação de como as categorias acima são aplicadas para resolver problemas.
- Princípio da Interação Relativa: prevê diferentes níveis de interação entre as três categorias do conhecimento, que varia em função da aplicação modelada.

5.5.1 O Conjunto de modelos

A construção de um sistema baseado em conhecimento segundo a metodologia Common KADS tem como produto um conjunto de quatro modelos que especificam todos os aspectos ligados ao software a ser desenvolvido, incluindo a organização, os recursos humanos, os aspectos de implementação e a interação entre estes (Figura 5.5 extraído de (SCHREIBER et al., 1999)).

). São eles o Modelo da Organização, o Modelo do Projeto, o Modelo de Comunicação e o Modelo do Conhecimento. Apesar de interdependentes, os modelos podem ser desenvolvidos em diferentes momentos do projeto e por diferentes equipes.

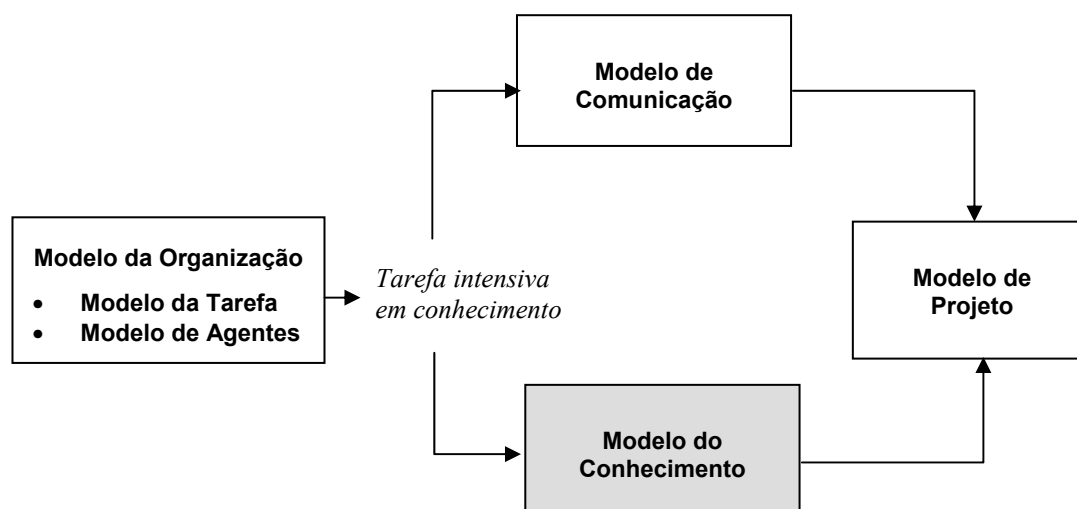


FIGURA 5.5 - Suíte de modelos da metodologia Common KADS.

O *modelo da organização* suporta a análise dos aspectos mais gerais da organização, de modo a identificar problemas e oportunidades para sistemas de conhecimento, estabelecendo sua viabilidade.

O *modelo da tarefa* identifica as partes relevantes de um processo de negócio da instituição. Analisa a organização geral da tarefa, suas entradas e saídas, pré-condições e critérios de desempenho, bem como recursos e competências.

O *modelo de agentes* são os executores da tarefa. Um agente pode ser uma pessoa ou um sistema de informação, ou qualquer entidade capaz de executar uma tarefa. O modelo de agentes descreve as características dos agentes envolvidos na execução de uma tarefa, definindo suas competências e restrições para atuar. Fazem parte do modelo ainda as comunicações existentes entre os agentes para executar a tarefa.

O *modelo de comunicação* define como acontece a comunicação entre os agentes envolvidos em uma tarefa, na forma de transações permitidas.

O *modelo do conhecimento* especifica em detalhe os tipos e estruturas do conhecimento utilizado para executar a tarefa. Garante uma descrição, independente da implementação, do papel que os diferentes componentes do conhecimento desempenham na solução de problemas num formato compreensível.

O *modelo de projeto* define o sistema em termos de arquitetura, plataforma de implementação, módulos necessários de software, construtos de representação e mecanismos computacionais necessários para implementar as funções especificadas nos demais modelos.

O componente principal e mais complexo do conjunto de modelos é o modelo do conhecimento que detalha o conhecimento do domínio e descreve as capacidades de um agente, normalmente um sistema baseado em conhecimento, em resolver problemas utilizando conhecimento. A construção desse modelo para o domínio da Petrografia,

com componentes reusáveis para domínios que aplicam raciocínio baseado em imagens, é parte das contribuições deste trabalho.

5.5.2 Modelo do conhecimento

A estrutura de Common KADS para o modelo do conhecimento separa o *conhecimento da aplicação* e o *conhecimento para solução de problemas* (ou *metaconhecimento da aplicação*). São definidos utilizando-se das mesmas primitivas, porém enquanto o conhecimento da aplicação se refere aos objetos do mundo sobre o qual se deseja raciocinar, o conhecimento para solução de problemas tem por objeto o próprio conhecimento da aplicação. O modelo do conhecimento é descrito em três categorias epistemológicas:

- *Conhecimento do domínio*, que descreve o conhecimento declarativo e inferencial do domínio da aplicação;
- *conhecimento de inferência*, que descreve os passos básicos de raciocínio que o sistema deve realizar para resolver o problema;
- *conhecimento da tarefa*, que descreve quais os objetivos que devem ser alcançados, que informações ou conhecimentos devem ser obtidos para alcançá-los e quais inferências devem ser feitas para atingir esse objetivo.

5.5.2.1 Conhecimento do domínio

Descreve as informações estáticas do domínio e os objetos do conhecimento para uma determinada aplicação. O domínio do conhecimento é construído por dois componentes: as *estruturas do domínio* e as *bases de conhecimento* (SCHREIBER et al., 1999). As estruturas do domínios descrevem de forma esquemática os tipos abstratos do domínio e como eles se organizam através de hierarquias e relacionamentos. As bases de conhecimento contém as instâncias do conhecimento desses tipos abstratos.

Diferentemente de modelos de dados, que representam unicamente tipos abstratos que serão instanciados unicamente pelo usuário, um modelo de conhecimento necessita representar determinadas porções do conhecimento que realmente correspondem a instâncias do modelo. Essas instâncias não são instâncias do usuário do sistema, mas instâncias do especialista.

O conhecimento do domínio refere-se ao conhecimento estático do domínio, ou conhecimento declarativo (como definido no Capítulo de Introdução deste trabalho). Descreve os objetos, suas propriedades, e os relacionamentos que compõem a base sobre a qual uma tarefa raciocina.

As estruturas do domínio são definidas através de três construtos: *conceito*, *relação* e *tipo-regra*.

- Os *conceitos* descrevem os objetos ou entidades do domínio da aplicação. São definidos através de seus atributos e valores, sendo que os valores de um atributos são definidos em termos de tipos e de domínio de valores.
- As *relações* definem a forma como os conceitos se associam, se agrupam, se dividem ou influenciam uns aos outros. As relações de especialização e

generalização são utilizadas para construir a taxonomia do domínio. Em Common KADS, as relações têm cardinalidade e podem ter atributos associados.

- O *tipo-regra* descreve um tipo especial de relação: aquela que descreve as dependências entre instâncias de conceitos com determinados atributos e valores, definindo os caminhos possíveis de inferência do modelo.

As instâncias dos conceitos do domínio, devidamente valoradas são descritas como *expressões do domínio*. São também expressões de domínio, as combinações dessas instâncias através de operadores lógicos (E, OU, NÃO) ou aritméticos (<, >, =, +, etc.).

Neste trabalho, o tipo-regra definido em Common KADS foi substituído por dois outros tipos de domínio que também definem as dependências entre instâncias do domínio e dirigem a inferência: são os tipos *grafo* e *triângulo*, descritos em detalhe na Seção 8.2.- Conhecimento de Inferência da Aplicação.

Uma forma usual de descrever esquemas de domínios é através de *ontologias de domínio*. Ontologias foram definidas por (STUDER, BENJAMINS e FENSEL, 1998) como (i) um vocabulário de conceitos, que são os *termos do domínio*; (ii) os tipos que esses conceitos podem ser e que valores podem assumir, ou a *tipologia do domínio*; (iii) a estrutura de relacionamento entre os termos, especialmente as relações de classe ou partes, ou seja, a *taxonomia ou partonomia do domínio*. A ontologia do domínio permite definir formalmente um universo compartilhado, sobre o qual todas as operações vão acontecer.

Ontologias de domínio e métodos de solução de problemas parecem ser as ferramentas adequadas para introduzir funções de inferências em sistemas de gerência de bancos de dados. A representação de ontologias em bancos de dados e a definição de métodos de solução de problemas como primitivas associadas por papéis a essa representação pode permitir a definição de inferências abstratas e independentes de domínio, implementáveis como bibliotecas nos sistemas de bancos de dados. Essas possibilidades vêm sendo discutidas por (GÓMEZ-PÉREZ e BENJAMINS, 1999).

As *bases de conhecimento* contêm as instâncias dos tipos do conhecimento de uma determinada aplicação, ou seja, dos conceitos, das relações e das regras. Ao contrário dos bancos de dados, as instâncias do conhecimento do domínio, não são instâncias do usuário do sistema, mas instâncias do próprio domínio, como nome de peças, de componentes, regras de diagnóstico, etc. As bases de conhecimento são construídas a partir das *expressões do domínio*, que descrevem o modelo de domínio, de uma forma potencialmente útil de ser aplicada pelos métodos de solução de problemas. São construídas com o vocabulário do domínio e respeitando as restrições definidas pela conhecimento do domínio. As expressões do domínio podem definir propriedades de objetos, relacionamentos, ou relações entre outras expressões.

5.5.2.2 Conhecimento de inferência

Enquanto o conhecimento do domínio é descrito como uma estrutura de informação ou conhecimento estático da aplicação, o conhecimento de inferência descreve como essas estruturas estáticas podem ser utilizadas para suportar o processo de raciocínio. O conhecimento de inferência é descrito através da primitivas de inferência, papéis do conhecimento e funções de transferência (SCHREIBER et al., 1999).

Uma primitiva de *inferência* corresponde a um passo atômico (no sentido de indivisível) de raciocínio, aplicado para derivar uma nova informação a partir das instâncias do

conhecimento contidas na base de conhecimento e também das instâncias entradas pelo usuário. De acordo com a metodologia Common KADS, utilizada para descrever o conhecimento, "uma inferência é completamente descrita através de uma especificação declarativa de suas entradas e saídas. O processo interno de como essa inferência transforma aquela entrada na respectiva saída não é relevante no nível do conhecimento". (SCHREIBER et al., 1999)

TABELA 5.2 – Significado das primitivas de inferência utilizadas nesse trabalho (SCHREIBER et al., 1999) e (GARDNER et al., 1998) .

Inferências de Common KADS	
Inferência	Significado
Abstrai	A entrada é um conjunto de dados e a saída é um modelo abstrato daqueles dados.
Avalia	A entrada é um conjunto de dados e uma norma e a saída é um valor-verdade indicando se os dados se adequam a norma.
Calcula	Processa o cálculo de um novo valor para um atributo, fornecido como saída.
Combina	A entrada é um conjunto de dados e a saída é uma organização coerente destes dados.
Compara	A entrada são dois valores e a saída é se eles são iguais, ou se um é maior que o outros.
Confronta	A entrada são dois conjuntos de dados e a saída é uma medida de similaridade entre os dois conjuntos de dados.
Decompõe	A entrada é um conceito único e a saída é o conjunto das partes que o compõe.
Especifica	A entrada é um objeto e a saída é um novo objeto associado de alguma maneira com o objeto da entrada.
Seleciona	A entrada é um conjunto de dados e a saída é um elemento ou subconjunto desses dados.

Uma inferência em Common KADS pode ser pensada como um mini-sistema baseado em conhecimento com uma finalidade bastante limitada e específica. Recebe uma porção do conhecimento do domínio ou do problema como entrada e gera uma saída, que é uma transformação desse conhecimento. As entradas e saídas das inferências são conhecidas como *papéis*, que são associados dinamicamente ao conhecimento do domínio. A Tabela 5.2 apresenta algumas das inferências da biblioteca de inferências de Common KADS (SCHREIBER et al., 1999), com os respectivos significados, que são utilizadas neste trabalho. A forma como as operações serão executadas será somente definida no nível simbólico.

Os *papéis do conhecimento* são nomes de conceitos abstratos que indicam o seu papel no processo de raciocínio. Um determinado conhecimento pode exercer o papel de uma hipótese em uma determinada seqüência de raciocínio, ou de uma solução em outra seqüência, dependendo de qual forma de solução de problemas é utilizada. Os papéis do conhecimento podem ser *estáticos* ou *dinâmicos*.

Os papéis dinâmicos do conhecimento referem-se às entradas e saídas das inferências, instanciadas no momento da execução, normalmente com os dados do usuário. Os papéis estáticos são mais estáveis ao longo do tempo. Definem quais as expressões de conhecimento do domínio aplicadas para realizar a inferência. Referem-se as regras ou taxonomias de domínio representadas no modelo e instanciadas de acordo com as necessidades da inferência.

Juntas, as inferências formam os blocos construtores do raciocínio de uma sistema. O conjunto das inferências pode ser representado graficamente, de forma a explicitar as relações de *dependência* entre os passos de inferência. As estruturas de inferência assim construídas, quando definem métodos de solução abstratos e reusáveis em outros domínios, constituem-se em *métodos de solução de problemas* ou PSM.

A Figura 5.6 (extraída de (CLANCEY, 1985)) descreve o método de solução de classificação heurística, que especifica o processo de levantar uma hipótese e confrontá-la com os dados até alcançar uma conclusão. As elipses indicam as inferências primitivas. O diagrama pode ser percorrido usando uma estratégia de busca regressiva (as hipóteses definem a aquisição dos dados) ou progressiva, onde os dados definem a seleção das hipóteses. Os papéis do conhecimento, definidos genericamente no PSM e representados como retângulos no diagrama, são associados dinamicamente às expressões do conhecimento do domínio e aos dados do usuário durante o processo de inferência. Essa forma de utilização garante a reusabilidade do método para outros domínios que possuam a mesma classe de problemas.

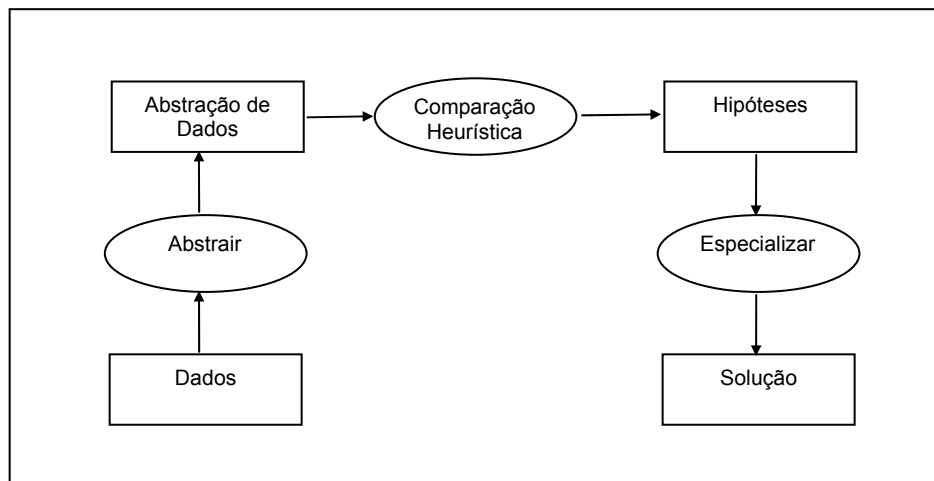


FIGURA 5.6 - Estrutura de inferência que descreve o método de Classificação Heurística.

Métodos de solução de problemas têm atraído o foco da pesquisa em Engenharia de Conhecimento, por se mostrar um componente fundamental para o desenvolvimento de sistemas baseados em conhecimento eficientes e com componentes reusáveis (FENSEL et al., 1997; BENJAMINS e FENSEL, 1998; MUSEN, 1998; GÓMEZ-PÉREZ e BENJAMINS, 1999).

A idéia básica da utilização de métodos de solução de problemas como componentes abstratos se opõem a abordagem tradicional, onde a inferência sobre os dados era pré-definida e implementada no mecanismo de inferência do sistema. A possibilidade de reuso era condicionada a definição de mecanismos genéricos que não contemplavam as particularidades do problema para o qual foram originalmente desenvolvidos.

O uso de métodos de solução de problemas associados a modelos declarativos, dos quais ontologias tem se mostrado o mais adequado, permite definir módulos de solução para diferentes problemas que utilizam conhecimento do mesmo domínio. O sistema pode ser desenvolvido de modo incremental e os métodos de solução podem migrar entre diferentes domínios.

Assim, uma base de conhecimento que suporte diagnóstico de falhas em equipamentos utilizando um método de solução de problemas (de diagnóstico) pode também ser utilizada para projeto, com outro método de solução de problemas. Da mesma forma, métodos de diagnóstico, projeto ou planejamento podem ser aplicados a diferentes domínios, cujas ontologias baseiam-se nas mesmas primitivas.

Os princípios que norteiam essa forma de desenvolvimento:

- base de conhecimento que contenha toda a informação do domínio, mesmo aquela não imediatamente necessária à inferência e
- métodos de solução propostos de forma abstrata e independente para diferentes problemas

vêm de encontro às necessidades de bancos de dados inteligentes, de manter a independência entre o conhecimento e métodos de inferência, e a modularidade dos componentes de inferência.

5.5.2.3 Conhecimento de Tarefa

Definem como serão executadas as tarefas no domínio, de acordo com os objetivos da tarefa e às atividades necessárias para atingir esses objetivos. A definição das tarefas é feita através de um componente declarativo, que define os papéis e pré-requisitos da tarefa, e outro procedural, que descreve como os objetivos serão alcançados.

Em Common KADS, uma tarefa é definida pelos seus objetivos, papéis de entrada e saída, especificação e corpo da tarefa. Os papéis de entrada e saída, definem quais porções do conhecimento do domínio serão utilizados para resolver a tarefa e como essas porções serão modificadas para gerar as saídas. A especificação da tarefa descreve as dependências entre os papéis envolvidos (o que fica invariante, o que deve ser verdadeiro após a execução da tarefa, etc.). O corpo da tarefa é definido com base em subobjetivos e estrutura de controle das subtarefas, ou seja, em que ordem e em que condições os subobjetivos devem ser alcançados.

5.6 Sumário do capítulo 5

- A Engenharia de Conhecimento objetiva transformar o processo *ad hoc* de construir sistemas baseados em conhecimento em uma disciplina da Engenharia, baseada em métodos, linguagens e ferramentas.
- Nível do Conhecimento proposto por Newell (NEWELL, 1982), introduz a visão de modelagem ao processo de aquisição e representação de conhecimento, em oposição à abordagem de transferência adicional.
- Uma especificação no nível do conhecimento é uma definição abstrata da forma de solução de problemas e informações aplicadas para aquele domínio.
- Uma especificação no nível do conhecimento não descreve a forma como uma informação ou método de solução será representado ou implementado. Isso será definido no nível simbólico e no nível da implementação.
- modelo no nível do conhecimento é definido em termos do conhecimento sobre o domínio, os objetivos a serem alcançados e as ações a serem efetuadas para atingir aquele objetivo.
- conhecimento do domínio é representado no modelo do domínio, os objetivos no modelo da tarefa, e as ações, nos métodos de solução de problemas.
- Raciocínio baseado em casos representa uma abordagem alternativa de representação de conhecimento, onde o conhecimento é adquirido e representado sem a construção de um modelo do domínio.
- Raciocínio baseado em casos parte da representação de instâncias de problemas e suas respectivas soluções associadas ou não à representação de modelos de ocorrências de problemas e soluções.
- As técnicas de eliciação de conhecimento buscam reduzir os problemas de comunicação no processo de aquisição de conhecimento de fontes humanas.
- Embora entrevistas sejam uma ferramenta indispensável no processo de eliciação, os métodos estruturados tendem a fornecer resultados mais confiáveis e eficientes.
- Common KADS é uma metodologia de projeto de sistemas baseada na construção de modelos, na tipagem do conhecimento e na definição de agentes e respectivas porções (ou papéis) do conhecimento que esses agentes reconhecem e, ainda, na forma como os agentes interagem.
- Common KADS introduz uma inovação importante na Engenharia de Conhecimento ao oferecer primitivas abstratas para a especificação do conhecimento do domínio e, principalmente, para especificação dos métodos de raciocínio.

6 Investigação da perícia em Petrografia Sedimentar

Este capítulo descreve as evidências encontradas em diversos experimentos desenvolvidos pelo autor sobre a utilização de conhecimento tácito na forma de imagens por geólogos especialistas, e a forma como essa utilização determina os níveis da perícia. Essas evidências sugeriram a aplicação de um conjunto particular de métodos de aquisição de conhecimento capazes de tornar explícito e evidenciar esse tipo de conhecimento. A aplicação desses métodos no domínio da Petrografia Sedimentar é aqui descrita, assim como as dificuldades e vantagens encontradas na sua aplicação, contribuindo para a seleção de técnicas de aquisição de conhecimento em domínios com as mesmas características.

Os trabalhos anteriores desenvolvidos pelo autor no domínio da Geologia Sedimentar forneceram as primeiras pistas sobre o comportamento cognitivo de especialistas ao realizar interpretação geológica. O uso diferenciado de conhecimento tácito por especialistas e não especialistas pode ser objetivamente medido através de diversos experimentos que evidenciam o comportamento cognitivo de geólogos no processo de solução de problemas. Esses experimentos e seus resultados são descritos nas seções subsequentes.

O projeto do sistema Geoxpert, desenvolvido para identificação e classificação de depósitos turbidíticos a partir de observações de campo, descrito em (ABEL, 1988; ABEL, 1991), teve a fase de aquisição de conhecimento desenvolvida em três etapas: imersão na literatura (cerca de um mês, estudando trabalhos previamente selecionados pelo especialista), um longo período de entrevistas retrospectivas (durante seis meses, com interrupções) e um intenso período de entrevistas concorrentes (um mês de trabalho de campo sem interrupções e em tempo integral,).

O período de entrevistas retrospectivas produziu um modelo do domínio na forma de uma árvore de decisão modificada (detalhada em (ABEL, 1988)) onde os termos do domínio foram explicitados, bem como suas relações de dependência e de causalidade. Nesta árvore, cada nó de decisão foi expandido num conjunto de termos que deveriam ser reconhecidos *juntos* para discriminar o caminho de decisão. Isoladamente, os termos não discriminavam caminhos da árvore, apenas aumentavam ou diminuíam a probabilidade de um caminho ser escolhido (Figura 6.1).

Subseqüentemente, no período de entrevistas concorrentes o especialista foi observado enquanto realizava a tarefa, em campo. Contrariando a expectativa, o especialista não seguia seu próprio caminho de decisão, não desenvolvendo o processo seqüencial de coleta de informação esperado. O processo decisório era claramente dirigido pelo casamento de padrões de imagens, *porém essas imagens não correspondiam as feições descritas*. Ao ser confrontado com o modelo, o especialista reafirmou-o, indicando que cada uma das informações necessárias à decisão estavam efetivamente no local investigado (e demonstrou isso, procurando por instâncias de cada um dos termos do domínio no local). Em resposta ao fato de que essas informações simplesmente não poderiam ter sido coletadas anteriormente à decisão, o especialista afirmou que o afloramento “*parecia claramente um depósito turbidítico*” sem ser capaz de fornecer melhor suporte a sua decisão.

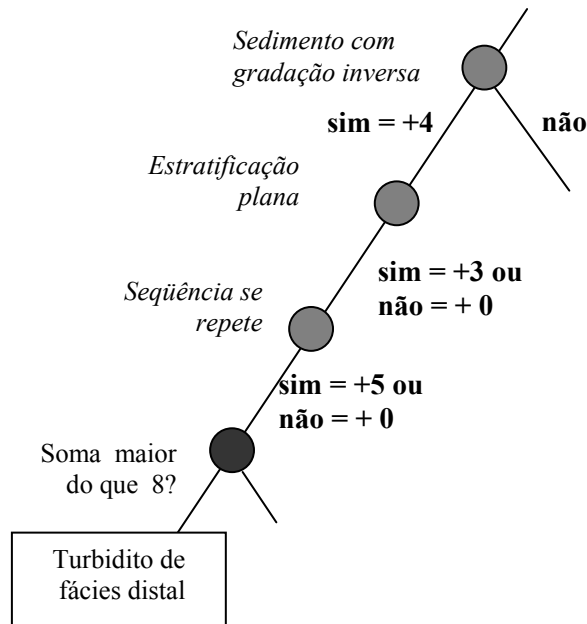


FIGURA 6.1 – Árvore de decisão modificada do projeto Geoxpert, os nodos nem sempre discriminam caminhos, mas aumentam a probabilidade da interpretação.

Em um segundo projeto foi realizada a aquisição de conhecimento com um especialista em reservatórios de petróleo em rochas carbonáticas. A finalidade foi obter um modelo preliminar do domínio para interpretação de fácies carbonáticas e datação estratigráfica a partir da análise petrográfica de amostras de rocha, com especial ênfase nas entradas de dados e formas de inferência necessárias a execução da tarefa.

A aquisição de conhecimento foi desenvolvida ao longo de 2 meses, em 5 seções de entrevistas, sem imersão prévia na literatura. As primeiras 3 seções foram entrevistas abertas ou fracamente dirigidas, enquanto as duas últimas foram entrevistas concorrentes ao processo de interpretação.

Nas entrevistas abertas, o especialista buscou demonstrar o fundamento teórico que suporta interpretação geológica, ou seja, como determinados processos físicos marcam os sedimentos e determinam os fósseis que lá irão ocorrer. Claramente, o objetivo era permitir que o raciocínio de investigação geológica pudesse ser seguido. Nas entrevistas concorrentes, no entanto, a identificação do ambiente sedimentar e idade provável da rocha eram determinados no primeiro instante de visualização da seção delgada da rocha ao microscópio. Instanciado a justificar sua decisão, o especialista teve que examinar detidamente a seção delgada, para encontrar os aspectos que comprovavam sua decisão, demonstrando que aqueles aspectos não haviam sido individualmente vistos anteriormente.

Claramente, ambos especialistas demonstraram trabalhar em dois níveis cognitivos distintos: um onde ocorre o processo de decisão, fortemente dirigido por imagens e suportado por conhecimento tácito, e outro, onde o conhecimento deve ser formalizado para ser transmitido, no processo descrito como *externalização* por Nonaka e Takeuchi (NONAKA e TAKEUCHI, 1997). A externalização pode ocorrer tanto para justificar o processo de decisão, com o objetivo de ensinar outros geólogos, ou para transmitir esse conhecimento durante o processo de aquisição de conhecimento.

Na migração entre um nível e outro, duas operações em especial se repetem:

- a decomposição de padrões visuais com alta significância para a interpretação em aspectos de menor complexidade e granularidade, passíveis de serem traduzidos por atributos geométricos (cor, formato, tamanho) ou previamente existentes na ontologia do domínio (termos como *estratificação plana*, *gradação inversa*);
- a atribuição de um *valor de significância* para cada um dos aspectos decompostos e a definição de alguma estratégia para combinar a presença ou ausência desse aspecto, evidenciando um raciocínio nebuloso.

A primeira dessas operações, raramente reportada em trabalhos publicados anteriormente, foi objeto de investigação neste trabalho. Com o objetivo de esclarecer a forma de raciocínio e conhecimentos envolvidos, as características cognitivas dos especialistas em Petrografia Sedimentar foram investigadas em duas fases distintas.

Na primeira fase, foi realizado um estudo exploratório das atividades de um especialista em Petrografia Sedimentar, utilizando técnicas usuais da Engenharia de Conhecimento. O tipo de tarefa da interpretação geológica e quais os conhecimentos envolvidos foram evidenciados através de entrevistas e técnicas estruturadas. Ficou clara a lacuna existente entre o conhecimento externalizado e aquele efetivamente utilizado.

A segunda fase foi voltada para evidenciar os conhecimentos e processos tácitos do especialista aplicados para interpretação. Para isso foi elaborado um instrumento de coleta de dados sobre diferenças cognitivas entre especialistas, novatos e intermediários, e a sua validação. Esse instrumento foi aplicado com a realização de um delineamento quase-experimental com grupo não aleatório somente com pós-teste e a análise dos seus resultados (CAMPBELL e STANLEY, 1969).

O objetivo geral deste estudo, foi elucidar, através das habilidades cognitivas evidenciadas na perícia e nas diferenças entre especialistas e não-especialistas, quais características devem ser reproduzidas num sistema de computador, no atual estado da arte ou futuro, para buscar um desempenho superior na solução de problemas em domínios complexos. A identificação de diferenças cognitivas entre especialistas e novatos é uma forma tradicional de investigação da psicologia cognitiva, e tem dado suporte à proposta de novos modelos de representação de conhecimento para Sistemas Especialistas (o modelo de raciocínio baseado em casos de Shank and Riesbeck (RIESBECK e SHANK, 1989), é um exemplo disso).

Um geólogo formado pode ser, em princípio, considerado um novato em Petrografia Sedimentar, embora essa classificação seja muito dependente do domínio. Certos autores, estabelecem um número mínimo de horas de treinamento no problema ou domínio particular para considerar um estudante um novato, porém, como o desempenho resultante deste treinamento é muito dependente da complexidade da tarefa, a classificação utilizada por VanLehn, (VANLEHN, 1989) baseada em diversos aspectos cognitivos e de desempenho mostra-se muito mais adequada.

Utilizando essa classificação do ponto do domínio da Petrografia Sedimentar, um novato é um estudante ou geólogo que recebeu, ao menos, 100 horas de treinamento em descrição de amostras de rochas sedimentares. Menos formalmente, pode-se classificar como um intermediário um profissional que utilize a Petrografia Sedimentar como uma ferramenta adicional e ocasional de coleta de informações para a solução de problemas, sem que, no entanto, essa seja sua atividade fim. Nessa situação, é provável que esse geólogo realize descrições petrográficas por muitos anos ou algumas décadas, sem obter um desempenho que o diferencie dos demais profissionais da área. Um intermediário é

considerado como tal mais por sua familiaridade com o domínio e seu desempenho aceitável na descrição petrográfica, do que nos aspectos cognitivos demonstrados na realização da tarefa.

Esta seção descreve o processo de investigação do domínio da Petrografia Sedimentar e aquisição de conhecimento desenvolvido ao longo deste projeto. O processo pode ser dividido nas seguintes etapas, que serão descritas a seguir:

- a) Estudo exploratório;
- b) Eliciação da ontologia do domínio;
- c) Aquisição de conhecimento orientada por casos e grafos de conhecimento;
- d) Análise da perícia;
- e) Construção do instrumento de investigação;
- f) Investigação da forma de raciocínio do especialista;
- g) Estudo comparativo da perícia no domínio;
- h) Comparação com outros domínios que aplicam raciocínio baseado em imagens.

6.1 Estudo exploratório: a aquisição de conhecimento

O objetivo desta fase foi mapear o processo de análise petrográfica e quais os conhecimentos envolvidos na solução de problemas. Ou seja, identificar os conhecimentos que dirigem o processo de descrição de uma amostra de rocha sedimentar e de sua classificação e interpretação. Os resultados dessa fase contribuíram para o desenvolvimento da proposta inicial de modelo de conhecimento e raciocínio para esse domínio.

A obtenção do conhecimento do especialista foi feita em duas fases: a aquisição de conhecimento utilizando uma abordagem baseada em conceitos do domínio, para descrever a ontologia do domínio; e a aquisição de conhecimento utilizando a abordagem de casos. O processo de aquisição de conhecimento e seus resultados serão aqui descritos como uma contribuição para a avaliação das técnicas de aquisição de conhecimento em domínios reais.

6.1.2 Eliciação da ontologia do domínio

Na primeira fase, foi realizada a coleta de requisitos junto ao especialista, gerentes e usuários da informação, geólogos sedimentares, do Centro de Pesquisa Leopoldo Miguez de Mello, da PETROBRÁS (a companhia estatal de petróleo do Brasil). O objetivo foi determinar as necessidades da tarefa e identificar quais os agentes envolvidos na solução e consumo da informação.

Os agentes consumidores da informação e da solução influenciam grandemente o desenvolvimento e aplicação de uma ontologia de termos, cuja riqueza será determinada pelo conhecimento de domínio prévio desses agentes. O único método aplicado nesta fase foram as entrevistas abertas, tanto retrospectivas como concorrentes.

A execução da tarefa mostrou-se bastante desestruturada, não obstante as tentativas recentes de formalização dos passos de descrição e da terminologia utilizada impostas

pelo Centro de Pesquisa. Os consumidores imediatos da solução gerada na tarefa são geólogos classificados como intermediários nesse domínio de conhecimento.

Uma vez identificados os agentes envolvidos na solução, iniciou-se a interação junto ao especialista com a utilização, numa primeira fase, de técnicas tradicionais da Engenharia de Conhecimento, como as que foram descritas na Seção 5.3 – Métodos de eliciação de conhecimento. A aquisição de conhecimento foi realizada com um único especialista, um geólogo com vinte anos de experiência acadêmica e profissional em Geologia de Petróleo, quinze dos quais dedicados apenas a Petrografia Sedimentar de reservatórios de petróleo, tema central deste trabalho.

A seguir, é descrita a seqüência de etapas, técnicas aplicadas e avaliação dos resultados.

6.1.2.1 Imersão na literatura

O especialista selecionou um conjunto de artigos científicos, manuais, livros e seus próprios textos didáticos para servirem como referência para métodos de descrição e classificação de rochas sedimentares clásticas. O Centro de Pesquisa da Petrobrás disponibilizou um conjunto de tabelas e formulários resultados de tentativas anteriores de formalização do processo de descrição, tanto dentro da empresa como em instituições internacionais.

O material foi utilizado para identificar a terminologia técnica da área e os principais conceitos envolvidos na aplicação. O objetivo foi obter uma visão geral do processo de solução de problema e facilitar o diálogo com o especialista.

6.1.2.2 Análise de protocolos

O especialista tornou-se a fonte principal de informação da aplicação. Nessa fase, entrevistas de uma hora a uma hora e meia eram dirigidas apenas para esclarecer os conceitos e métodos de solução do domínio. O especialista era convidado a falar livremente, com farto suporte de material ilustrativo, sobre como o problema era resolvido.

A análise de protocolos teve por objetivo não só ampliar a familiaridade com o domínio, mas também evidenciar o perfil psicológico do especialista, seu método pessoal de trabalho, a forma de raciocínio, capacidade de organizar seus pensamento e de expor claramente suas idéias.

Os resultados dessa fase foram:

- especialista situou a aplicação no domínio;
- identificou e definiu com clareza os principais conceitos envolvidos no problema e a estrutura hierárquica na qual eles se organizam, apresentando a ontologia do domínio;
- identificou as principais tarefas envolvidas na solução do problema, explicitando, tanto quanto possível, os passos que deveriam ser seguidos para a solução;
- esclareceu de que forma um sistema de conhecimento fictício, que suportasse a aplicação, seria utilizado pelos diversos setores envolvidos com exploração de petróleo na empresa.

O perfil do especialista foi extremamente favorável à eliciação do conhecimento. De caráter metódico e extremamente organizado, apresentou suas idéias com segurança e clareza. A tarefa de eliciação veio ao encontro do seu desejo natural de organizar as informações com as quais trabalha. Apesar da clareza na organização e apresentação das idéias, o especialista mostrou não ser capaz, em muitos momentos, de justificar suas decisões ou explicitar claramente seus passos de raciocínio, como havia sido identificado nos outros especialistas em geologia. Essas lacunas foram identificadas à medida em que aumentou a compreensão a respeito do domínio, ainda na fase de análise de protocolos, porém sua importância só tornou-se clara no momento da construção do modelo.

Os produtos da análise de protocolos foram:

1. Estrutura hierárquica dos principais conceitos do domínio (Figura 6.2);
2. Atributos desses conceitos descritos na hierarquia;
3. A nomenclatura mineral;
4. Lista de termos utilizados pelo especialista cujo significado ou utilidade não haviam sido esclarecidos até o momento.

Os textos desenvolvidos na fase de análise de protocolos pelo especialista foram organizados, buscando definir os tipos de cada um dos atributos. Além dos tipos, os atributos são definidos como univalorados (referidos no modelo descrito no Anexo 4 como atributos do tipo *one-of*, associado a lista dos valores possíveis) ou multivalorados (referidos no Anexo 4 como atributos do tipo *list-of* que podem assumir nenhum, um ou mais de um dos atributos listados).

Esses textos estruturados constituíram-se na semente da representação de conhecimento, a partir da qual os modelos definitivos evoluíram através de sucessivos refinamentos. Já a estrutura hierárquica dos conceitos (item 1, acima), embora tivesse importante papel ao permitir uma melhor compreensão do domínio e situação do problema, não desempenha nenhum papel relevante no processo de solução de problema. Essa discussão será retomada na Seção 6.2, que descreve a análise da perícia no domínio.

6.1.2.3 Métodos estruturados

Os resultados da análise de protocolos foram utilizados para definir os métodos estruturados a serem aplicados. O método de classificação de termos foi aplicado para detalhar a taxonomia do domínio. Os termos coletados nas fases de imersão e de análise de protocolos foram organizados em grupos e subgrupos. A forma de separação identificou termos que são sinônimos e explicitou o papel que os termos mais comuns desempenham no domínio.

Embora a hierarquia dos termos do domínio fosse clara, bem como o significado desses termos, os métodos aplicados até o momento não esclareceram qual era a forma de solução de problemas e, tampouco, que informações eram efetivamente utilizadas para definir a solução.

Entrevistas estruturadas foram definidas com o intuito de extrair as regras de solução e explicitar quais informações influenciavam no processo de decisão. As entrevistas constaram de seqüências de perguntas pré-definidas sobre classificação e interpretação de rochas e também de entrevistas concorrentes (*thinking aloud*). O resultado foi

positivo para esclarecer os métodos de classificação de rocha (descritos no Capítulo 2), especialmente por serem estes métodos completamente estruturados e formalizados.

Já as entrevistas concorrentes foram particularmente úteis no caso da interpretação sobre a origem da rocha (interpretação diagenética). A técnica aplicada foi a de acompanhar o especialista desde o início da análise de uma amostra desconhecida. Isso foi feito com o auxílio de um equipamento que permite projetar simultaneamente num monitor a imagem observada num microscópio. Cada comentário sobre a possível interpretação da rocha era acompanhado da sinalização das feições que sugeriam essa interpretação. Dessa forma, novas feições não descritas nas entrevistas anteriores surgiram e foram definidas, agregando novos termos do domínio a ontologia.

O resultado da aplicação dos métodos foi uma lista de termos e um conjunto de regras desestruturadas, muitas vezes conflitantes entre si, cujas premissas não referenciavam os termos de domínio do modelo hierárquico definido até o momento e resumido na Figura 6.2. A quantidade de incertezas envolvidas no raciocínio tornaram ainda mais complexa a tarefa de formalizar os caminhos de inferência do sistema.



FIGURA 6.2 - Hierarquia dos conceitos do domínio da Petrografia Sedimentar, baseada nos relacionamentos de generalização e particionamento.

6.1.3 Aquisição de conhecimento orientada por casos e grafos de conhecimento

A avaliação dos resultados da aplicação dos métodos estruturados indica que esses métodos são fortemente dirigidos à coleta de conhecimento declarativo e conseqüente expansão da ontologia do domínio. Pouca influência tem para a identificação do raciocínio. O conhecimento obtido aparenta ter pouca relação com a forma como as interpretações geológicas são obtidas.

A etapa seguinte no processo de aquisição do conhecimento foi a aplicação da abordagem de raciocínio baseado em casos (RBC). Para a construção dos casos, foi coletado um conjunto inicial de 102 descrições quantitativas e 12 descrições qualitativas (todas as amostras descritas qualitativamente, também o foram quantitativamente) de amostras de arenitos brasileiros e do Mar do Norte europeu. O formato das descrições foi estudado e foi feita uma proposta inicial de representação de casos, onde todas as descrições de uma única amostra de rochas constituíam um caso e os tipos de feições petrográficas descritas, em seus atributos. Essa representação, originalmente com 83 atributos, foi posteriormente refinada pelo especialista em sucessivas etapas através do acréscimo de novos atributos e valores. O processo de refino de atributos seguiu o procedimento básico de incluir atributos necessários para justificar a decisão encontrada nos casos.

O novo modelo de representação foi construído como uma partonomia de conceitos, cada um deles definido pelo conjunto de atributos que o caracteriza e pelos valores possíveis de cada atributo. O conjunto das partes forma uma descrição de uma amostra. O modelo é descrito no Capítulo 8 e apresentado integralmente no Anexo 4. Esse modelo apresentou finalmente muitos dos termos utilizado pelo especialista ao explicar a inferência. No entanto, a tentativa de identificar quais atributos deveriam ser utilizados para indexação da base de casos, de modo a reduzir a busca nos instantes iniciais da inferência, expôs a limitação da abordagem de RBC em domínios complexos.

Como um produto da natureza, rochas tendem a se apresentar como um exemplar único, sem reproduzir jamais um mesmo padrão. Esse comportamento levou a produção de métodos artificiais para classificação de rochas, baseados na composição mineralógica e textural, onde os exemplares são agrupados de acordo com os atributos facilmente visíveis, embora não resultem de um mesmo processo sedimentar ou tenham uma origem comum. Do ponto de vista econômico, no entanto, o processo de formação de uma rocha (de qualquer tipo) tem importância muito maior do que suas características texturais ou composicionais.

Isso identifica claramente que a ontologia largamente conhecida no domínio da Petrografia Sedimentar não foi construída como um suporte à solução de problemas ou à sua justificativa, mas sim, com o objetivo de organizar o domínio para permitir sua melhor compreensão. Não existe a desejada relação entre os atributos descritivos utilizados para classificação (textura e composição mineralógica) a interpretação diagenética.

A utilização de raciocínio baseado em casos seria possível se:

- a indexação fosse definida utilizando *agrupamentos de pares de atributo-valor*, ao invés de atributos isolados cujos valores fossem agrupados por aprendizado automático. Tal complexidade no inter-relacionamento dos atributos sugere que a utilização de um modelo seja mais eficaz ao capturar conhecimento;

- existisse uma base de casos suficientemente extensa para permitir uma boa cobertura do domínio, de forma a refletir todas as variações possíveis dos atuais 139 atributos, alguns podendo assumir 30 valores diferentes possíveis. Essa base deveria conter alguns milhares de descrições qualitativas completas de amostras de rochas. Essa base é, no momento, inalcançável, uma vez que os atributos significativos, identificados neste trabalho, não são tradicionalmente descritos por petrógrafos sedimentares. Os seja, mesmo que os casos pudessem ser coletados, os atributos que influenciam a decisão não estão completamente descritos.

Ao contrário dos domínios artificiais que reproduzem à exaustão um mesmo padrão (de problemas ou de instâncias), os domínios naturais caracterizam-se pela capacidade de gerar instâncias sempre diferentes das anteriores. Essa variedade será tanto mais observada quanto maior o número de atributos que caracterizam um conceito.

A limitação do raciocínio baseado em casos foi compensada pela associação da representação de casos com um modelo parcial do domínio. Essa não é uma abordagem original. Muitos sistemas de RBC são complementados por modelos parciais do domínio, especialmente para compensar a pouca cobertura do domínio pelos casos ou tornar a busca da solução mais eficiente. Casos foram combinados com alguma forma de modelo do domínio no sistema CHEF (HAMMOND, 1989), que ao criar uma nova receita, determina o relacionamento entre palavras utilizando um dicionário. O sistema PERSUADER (SYCARA, 1988), cujo objetivo é gerar soluções em negociações trabalhistas, utiliza regras e heurísticas para adaptar estratégias de solução descritas na base. PROTOS (BAREISS, 1989) mantém uma teoria parcial de domínio para determinar categorias em audiologia clínica. O Sistema CASEY (KOTON, 1988) utiliza um modelo de doenças cardíacas para propor soluções quando falha a estratégia de casos ⁷. (REATEGUI, 1997) descreve um sistema que utiliza redes neurais para gerar modelos a partir de casos de diagnósticos de doenças cardíacas.

Nos exemplos citados, o uso de RBC foi complementado por alguma forma de raciocínio baseada em modelos. Neste trabalho, RBC foi utilizado unicamente como uma técnica de aquisição e modelagem de conhecimento, na qual realizou uma contribuição essencial ao expor as lacunas entre os atributos descritos e a solução registrada no caso, que levou a ampliação da ontologia do domínio pela inclusão de novos atributos. A solução para a modelagem do conhecimento que dirige a inferência, no entanto, foi baseada em modelos extraídos diretamente do especialista. (relacionamento entre feições petrográficas e conclusões possíveis e diagramas de classificação composicional).

A técnica de grafos de conhecimento, descrita na Seção 5.3.7, foi então escolhida para estudar o processo de interpretação diagenética das amostras e modelar o relacionamento entre feições petrográficas e conclusões.

A combinação de grafos de conhecimento e casos mostrou-se uma ferramenta eficaz na eliciação de conhecimento em domínios que aplicam raciocínio baseado em imagens. A estrutura de casos descreve a ontologia conhecida do domínio, enquanto os grafos permitem construir as associações entre essa ontologia e as interpretações do especialista. A construção dos grafos de conhecimento foi realizada em duas fases, que refletem cada um dos níveis cognitivos em que o especialista trata a informação (nível de externalização e nível de inferência), descritas a seguir.

⁷ Descrições detalhadas desses e outros sistemas podem ser obtidas em [KOLODNER, 1993].

Fase 1: A primeira fase de aplicação do método produziu um conjunto preliminar de grafos de conhecimento. Cada grafo representava uma interpretação de algum aspecto da origem da rocha feita pelo especialista durante o processo de descrição. Ou seja, um grafo capturava porções do processo de interpretação e explicitava como este subcaminho de inferência foi percorrido. O maior poder de expressão dos grafos de conhecimento, quando comparados a regras de produção, permitiu que os inter-relacionamentos entre feições, ao indicarem uma determinada interpretação, fossem explicitados.

Um dos grafos de conhecimento eliciados na primeira fase é apresentado na Figura 6.3. A exemplo da proposta original de grafos de conhecimento, todos os grafos eliciados possuíam 3 níveis (evidências, um nível de combinações e conclusões). Embora os grafos fossem claros em demonstrar quais feições eram utilizadas, não havia uma correspondência direta entre os nós de evidência dos grafos de conhecimento com os termos do domínio descritos na ontologia construída com a abordagem de casos.

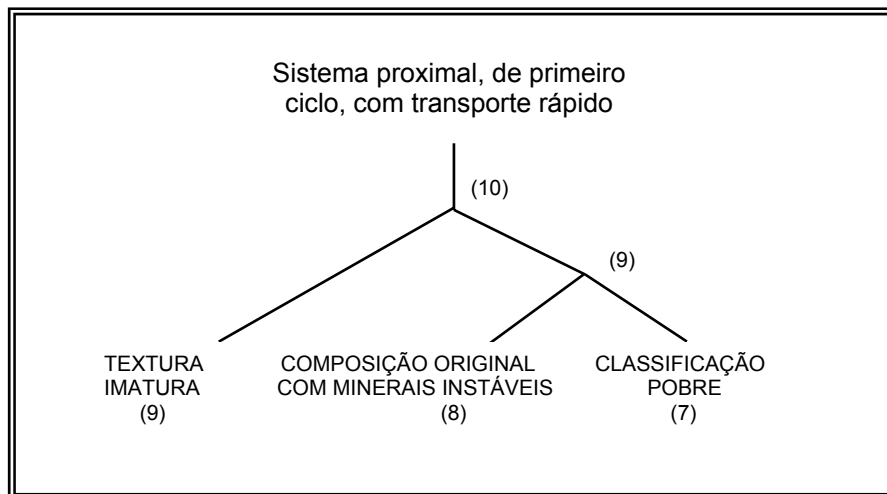


FIGURA 6.3 - Grafo de conhecimento mostrando o relacionamento entre feições da rocha e a interpretação de um depósito sedimentar.

Uma análise sobre os dois modelos demonstrou que havia uma diferença de granularidade entre as informações descritas durante a análise petrográfica e aquelas utilizadas para realizar inferência (Figura 6.4).

O especialista, de fato utilizava informações mais estruturadas e complexas do que aquelas comumente descritas durante o processo de análise. De modo interessante, mesmo as descrições feitas pelo próprio especialista (como aquelas apresentadas nas Figura 3.5 e 3.6) não continham as feições utilizadas por ele para realizar a inferência. Na Figura 3.7 parte da conclusão descreve "*Immature texture and original composition suggests a relatively proximal, first-cycle system*" (*Textura imatura e composição original sugere um sistema de primeiro ciclo deposicional, relativamente proximal*) porém as feições textura imatura e composição original não constam na descrição desta rochas. A omissão não acontecia de forma consciente, uma vez que ela somente foi percebida pelo especialista ao ser confrontado com os dois modelos, o de grafos e a ontologia, que ele ajudou a construir.

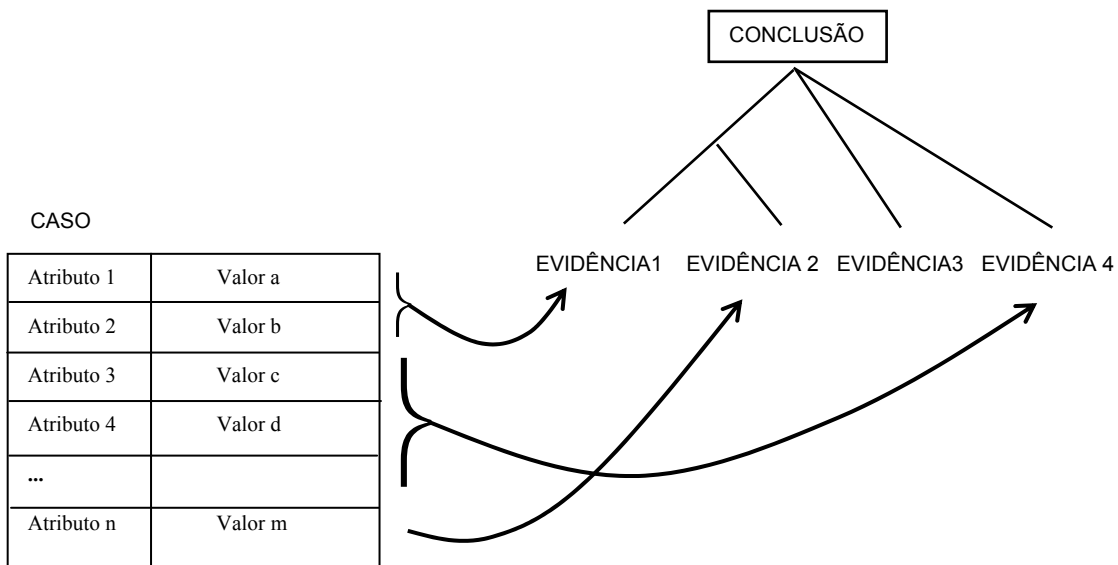


FIGURA 6.4 - Evidências dos grafos de conhecimento consistem de informações mais estruturadas e complexas do que aquelas descritas na ontologia construída com a abordagem de casos.

Esse fato é significativo porque demonstra que, mesmo com um esforço consciente de formalização do domínio ao descrever a ontologia, o especialista ainda permanece raciocinando em uma dimensão distinta daquela da formalização. Esse comportamento não tem sido registrado nos trabalhos recentes da Engenharia do Conhecimento, no entanto, a explicitação do conhecimento tácito aplicado na inferência só pode ser alcançada através da utilização de métodos de eliciação próprios para isso.

Fase 2: O descasamento de impedância, ou seja, as diferenças de granularidade, (BEYON-DAVIS, 1991) das representações foi resolvido na segunda fase de aplicação dos grafos de conhecimento, onde as evidências deixaram de ser definidas pelo especialista, mas selecionadas por ele na ontologia. Cada uma das evidências foi então decomposta num conjunto de tríades Conceito-Atributo-Valor combinadas através dos conectivos lógicos E e OU, de forma a representar as formas possíveis em que essas tríades podem se combinar para formar a evidência. A estrutura de descrição de uma evidência é exemplificada na Figura 6.5.

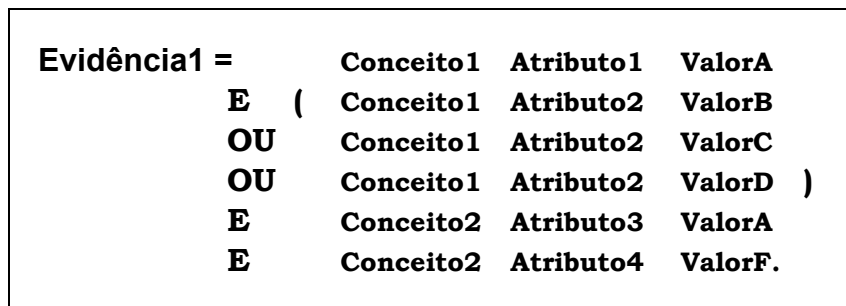


FIGURA 6.5 - Definição de um nó de evidência de um grafo de conhecimento de acordo com os termos definidos na ontologia do domínio.

O especialista desprezou a possibilidade de considerar a influência das evidências combinadas sobre a conclusão, corroborando resultados obtidos em (DUARTE FILHO, 1991), que afirmam que especialistas utilizam o menor número possível de inter-relacionamentos entre as evidências que suportam as conclusões.

A cada evidência foi atribuído um peso, variando em uma escala de 1 a 6 (1 - sugere a conclusão e até 6 - confirma a conclusão). Essa escala e seus significados foram definidos pelo próprio especialista, que também determinou que o limite mínimo para que uma conclusão verdadeira seja de 6. Ou seja, para que uma conclusão seja válida, é necessário que pelo menos duas evidências estejam presentes. Uma vez identificadas as evidências, todos os grafos confirmados contribuem com a conclusão, mesmo que identifiquem diferentes interpretações.

A não existência de conflito entre diferentes conclusões é explicada pelo fato de que uma rocha evolui através de diversos processos diagenéticos, que refletem as condições do ambiente predominante naquele momento (ZUFFA, 1985). Assim, um sedimento pode se consolidar num processo diagenético de ambiente predominantemente continental seco e, posteriormente, por subsidência da região onde se encontra, passar a fazer parte de um ambiente marinho, sofrendo a influência deste. Cada um dos processos pelos quais passa uma rocha ficam registrados em suas feições texturais.

A forma intuitiva de construir escalas e atribuir a elas significados é prática corrente na aquisição de conhecimento em domínios complexos (HAYES-ROTH, WATERMAN e LENAT, 1983), apesar das muitas tentativas de definir e aplicar metodologias para tratar a incerteza de modo uniforme através dos domínios (DUARTE FILHO, 1991; MICHIE, SPIEGELHALTER e TAYLOR, 1994). A prática tem demonstrado que a utilização dos métodos intuitivos dos especialistas tende a atingir resultados mais eficientes e confiáveis dentro de um único domínio.

Os grafos de conhecimento esclareceram quais feições observadas eram efetivamente aplicadas na solução de problemas e permitiram, ainda, esclarecer o papel da ontologia do domínio para as interpretações. No entanto, os relacionamentos eliciados entre as feições não são em sua maioria relacionamentos hierárquicos, comumente descrito nos modelos de representação.

A análise desse comportamento de solução de problema e o quanto o comportamento está associado com a perícia no domínio foi objeto particular de investigação através de um estudo comparativo entre especialistas, intermediários e novatos o domínio da Petrografia Sedimentar, que será descrito na próxima seção. Um exemplo completo de um dos grafos obtidos é descrito no Anexo 3 deste volume e a descrição de sua morfologia é apresentada no Capítulo 8.

6.2 Análise da perícia

Neste trabalho, os métodos de solução de problemas do especialista foram investigados através de métodos tipicamente aplicados na Psicologia cognitiva para estudo de processos cognitivos (ERICSSON e SMITH, 1991). A hipótese inicial da investigação, comum a todos os experimentos, é a de que especialistas possuem, ou desenvolvem sob treinamento, um conjunto de habilidades cognitivas distintas daquelas dos não-especialistas, como descrito na Seção 4.3 - Abordagem cognitiva- deste trabalho. Essas

habilidades podem se referir a modelos mentais, formas de decomposição dos problemas, forma de seleção das informações ou métodos particulares de raciocínio.

Essas habilidades podem ser identificadas e medidas através da comparação sistemática de especialistas e novatos. As diferenças podem servir como pistas de quais características devem ser reproduzidas em computador ou transmitidas para um aprendiz de forma a reproduzir o desempenho do especialista. Neste trabalho, o objetivo foi identificar de que forma os especialistas lidam com imagens e como isso influencia no seu desempenho.

Os instrumentos de análise foram dois: um experimento para expor os processos cognitivos de geólogos que utilizam a Petrografia Sedimentar como instrumento de trabalho, e novas entrevistas estruturadas com o especialista utilizando grafos de conhecimento dirigidas aos processos capturados nos experimentos. Posteriormente, o experimento foi replicado em outro domínio, o de Fitopatologia de batatas, para confrontar com o comportamento de especialistas em domínios alternativos de raciocínio baseado em imagens.

A aquisição de conhecimento no domínio da Petrografia Sedimentar indicou que as formas de raciocínio aplicadas pelos geólogos na solução de problemas tinham características peculiares para aquele domínio. As hipóteses levantadas, e que dirigiram a investigação, são descritas a seguir.

- O processo de solução de problemas em petrografia é principalmente dirigido por dados (progressivo) e apenas secundariamente e de forma localizada por hipóteses (regressivo).
- A busca, seja ela progressiva ou regressiva, tem um papel secundário na inferência quando comparada ao casamento de estruturas mentais.
- Os dados que dirigem o raciocínio são fundamentalmente imagens, ou alguma representação mental de imagens muito próxima do sensório, aqui chamadas de pacotes visuais.
- Os pacotes visuais não são os conceitos do domínio coletados na fase inicial de eliciação de conhecimento, tampouco têm uma correspondência com casos ou partes de casos. São objetos com identidade própria, embora tenham estreita correspondência com os termos do domínio.
- O desenvolvimento da perícia passa pela acumulação de pacotes visuais e de termos do domínio, e pela estruturação e criação dos relacionamentos entre eles.

Para avaliar as hipóteses levantadas, foi proposto um instrumento de investigação da perícia, que busca esclarecer quais processos cognitivos são associados ao desempenho superior na solução de problemas. O experimento e seus resultados são descritos a seguir.

6.2.1 Construção do instrumento de investigação

Esse experimento foi desenvolvido com base em testes similares aplicados em estudos da Psicologia Cognitiva, como os descritos em (VANLEHN, 1989; ANZAI, 1991; CHARNESS, 1991; PATEL, AROCHA e KAUFMANN, 1994; SUNDALI e ATKINS, 1994; PATEL e RAMONI, 1997; SHALIN et al., 1997; ZEITZ, 1997; SCHUNN e ANDERSON, 1999). Outros estudos semelhantes (CHI, GLASER e REES, 1982; KOUBEK e SALVENDY, 1991; HOFFMAN, 1994; STERNBERG, 1997) foram

desenvolvidos com a finalidade de ampliar a compreensão do domínio para facilitar o desenvolvimento de Sistemas Especialistas, como neste trabalho.

A investigação da perícia no domínio da Petrografia Sedimentar foi feita com o auxílio de uma grupo não-aleatório de 19 geólogos. O grupo foi selecionado entre professores e estudantes de graduação, mestrado e doutorado do Instituto de Geociências da UFRGS e profissionais do Centro de Pesquisa Leopoldo Miguez de Mello da PETROBRAS. O critério único de seleção para compor a amostra foi o fato de utilizar atualmente ou no último ano a Petrografia Sedimentar, como ferramenta de trabalho, pesquisa ou estudo. Foi considerado um aspecto fundamental da pesquisa, pela necessidade de evidenciar o conhecimento tácito do domínio, que o geólogo tivesse e aplicasse experiência prática em Petrografia e não apenas teórica. Apesar de amostra não ter representatividade estatística, devido a forma de seleção da amostra e ao seu número reduzido, o estudo justifica-se por seu caráter exploratório, e é efetivo em elucidar os processos básicos da perícia e indicar caminhos para estudos futuros mais sistemáticos.

Os testes foram aplicados em 3 etapas, com intervalos de 20 e de 9 dias entre elas, respectivamente. Na primeira, foram reunidos os alunos da disciplina de Petrografia Sedimentar do curso de Geologia da UFRGS, ministrada pelo especialista deste experimento. Na segunda, o grupo integrou professores de Petrografia Sedimentar e Metamórfica, alunos dos programas de Mestrado e Doutorado do Instituto de Geociências da UFRGS, incluindo geólogos da PETROBRAS que realizam seu pós-graduação naquela universidade. Ambas etapas foram realizadas na mesma sala, com os mesmos equipamentos e condições. A terceira etapa foi realizada no Centro de Pesquisa Leopoldo Miguez de Mello, no Rio de Janeiro, com geólogos da Divisão de Reservatórios do Centro de Pesquisa. Os equipamentos utilizados (monitor conectado a microscópio e gravador) foram idênticos e buscou-se reproduzir as mesmas condições da entrevista (sem interrupções, com mesma contagem de tempo, etc.). Apenas um dos testes teve que ser desprezado por ter sido interrompido no meio do experimento, resultando nos 19 descritos aqui.

Os geólogos da amostra foram posteriormente classificados em novatos, intermediários e especialistas, segundo os critérios descritos no Capítulo 3 deste trabalho, compilados a partir da proposta de diversos autores, em especial (VANLEHN, 1989; ERICSSON e SMITH, 1991; STERNBERG, 1997). As variáveis utilizadas para a distribuição nos três grupos foram:

- **Tempo de Mestrado:** Utilizando a abordagem do contexto social, um especialista possui 10 anos ou mais de experiência no assunto da perícia. Como diagênese de arenitos não é estudada habitualmente num curso de graduação em Geologia, considerou-se o tempo do início do curso de mestrado como uma das métricas para avaliar a experiência na área, no lugar de utilizar o tempo de formado apenas.
- **Relação da Dissertação de Mestrado ou Tese de Doutorado com o assunto da perícia:** Essa variável avalia o quanto os profissionais estiveram trabalhando diretamente no tópico da perícia e não em assuntos correlatos. A avaliação do quanto as teses de mestrado ou doutorado estão relacionadas com o tópico da perícia foi feita pelo próprio especialista.
- **Horas de Trabalho:** Número de horas mensais aplicadas na prática da Petrografia Sedimentar. Essa variável reflete a prática profissional ou acadêmica atual do geólogo no tema da perícia.

- **Formação:** Complementa a formação dos cursos de graduação, mestrado ou doutorado através da prática profissional ou acadêmica. Registra as situações em que a Petrografia Sedimentar foi utilizada efetivamente como ferramenta de trabalho ou foi objeto de treinamento formal, refletindo a efetiva experiência profissional. Quanto mais alto o número, maior o número de oportunidades de aprender ou aplicar Petrografia Sedimentar.

Considerando a combinação das variáveis anteriores, a amostra foi classificada como especialistas, intermediários e novatos. Utilizando a abordagem do contexto social, são especialistas em Petrografia Sedimentar os geólogos que possuem pelo menos 10 anos de efetiva experiência no tema, medida pelo tempo e intensidade de trabalho dedicado ao assunto da perícia. A distribuição da amostra e sua classificação está descrita na Tabela 6.1.

TABELA 6.1- Classificação dos geólogos participantes do experimento quanto ao nível da perícia.

COMPOSIÇÃO DA AMOSTRA PARA PETROGRAFIA					
Amostra	Tempo Mestrado	Relação Dissert./Tese	Horas de trabalho	Formação	Classificação
1	mais de 10 anos	Muito	Mais de 40	6	Especialista
2	-	-	Entre 10 e 40	1	Novato
3	-	-	Entre 10 e 40	1	Novato
4	-	-	Entre 10 e 40	1	Novato
5	-	-	Entre 10 e 40	1	Novato
6	-	-	Entre 10 e 40	1	Novato
7	-	-	Entre 10 e 40	2	Novato
8	menos de 5 anos	Muito	Entre 10 e 40	2	Intermediário
9	mais de 10 anos	Sem relação	Menos de 10	2	Novato
10	mais de 10 anos	Pouco	Entre 10 e 40	5	Especialista
11	mais de 5 anos	Sem relação	Menos de 10	3	Novato
12	-	-	Menos de 10	2	Novato
13	-	-	Mais de 40	2	Novato
14	mais de 5 anos	Muito	Menos de 10	3	Intermediário
15	mais de 10 anos	Muito	Menos de 10	2	Especialista
16	mais de 10 anos	Muito	Menos de 10	5	Especialista
17	mais de 10 anos	Sem relação	Mais de 40	5	Intermediário
18	mais de 5 anos	Pouco	Mais de 40	4	Intermediário
19	mais de 5 anos	Sem relação	Mais de 40	5	Intermediário

O instrumento, que é apresentado integralmente no Anexo 1, foi proposto em duas partes.

A primeira parte é composta de um questionário para caracterizar a formação e tempo de experiência do geólogo especificamente em Petrografia Sedimentar.

Na segunda parte, foi definida a coleta de dados em 5 etapas, com diferentes procedimentos. Todos os procedimentos basearam-se na apresentação de imagens em monitor conectado ao microscópio ou através de fotos. Em todos eles, foi medido o tempo aplicado na solução de problemas.

O questionário inicial foi utilizado para separar o grupo em especialistas, intermediários e novatos, de acordo com a abordagem do contexto social (definida na Seção 4.1 - Abordagem do contexto social). Nesse caso, tempo de formado em Geologia, a formação acadêmica (mestrado e doutorado na área), prática profissional e número de horas semanais dedicadas à Petrografia foram utilizados como critério para identificação de especialistas e intermediários. A Tabela 6.5, mostra a distribuição da amostragem nas três classes. O objetivo geral do experimento era evidenciar quais características cognitivas diferenciavam novatos de especialistas e como essas características evoluíam com o desenvolvimento da perícia.

Na segunda fase, os 3 primeiros testes foram realizados coletivamente (ou seja, as imagens foram mostradas para todo o grupo) e os dois últimos individualmente. Nos três primeiros, o geólogo deveria escrever os resultados em uma folha previamente entregue. Nos dois últimos, as respostas forma gravadas.

Como proposições do experimento, era esperado que os geólogos classificados como especialistas demonstrassem alguns comportamentos, comuns entre si e distintos das outras categorias, explicitando as habilidades cognitivas desenvolvidas. Foram formuladas as seguintes proposições, a priori, esperando que os especialistas:

- apresentem formas de representação de conhecimento mais estruturadas do que os novatos e as utilizam para o rápido reconhecimento e interpretação das rochas;
- reconheçam mais padrões interpretados da imagem, enquanto os novatos devam reconhecer aspectos mais descritivos das rochas, como minerais e tipos de texturas;
- identifiquem maior número de detalhes das rochas e sejam capazes de interpretá-los em menos tempo;
- classifiquem as informações do domínio utilizando aspectos mais estruturados do que os novatos, que o fazem utilizando feições perceptuais;
- demonstrem ter mais conhecimento do domínio, que pode ser demonstrado pelo número de informações utilizadas para resolver problemas, do que os novatos.

Basicamente, os indicadores utilizados foram desenvolvidos a partir do vocabulário dos três grupos e da eficiência em extrair informação significativa da amostra. As questões onde o geólogo deveria escrever a resposta foram propostas com tempo de observação determinado (exceto o teste 2), mas tempo de redação livre, para evitar a influência da velocidade de escrita sobre os resultados.

Foram definidos três indicadores para analisar o comportamento dos geólogos: quantidade de informação significativa, uso de feições interpretadas e organização e indexação do domínio.

• **Indicador 1 : Quantidade de informação significativa**

Todos os textos discursivos foram analisados com o auxílio de uma ferramenta de análise lexical que extraiu as palavras sem significado no domínio, como verbos de ligação, preposições, advérbios ou os substantivos não relacionados ao domínio da Geologia. As demais palavras continham informação significativa para o domínio e foram, portanto, quantificadas. O indicador pode ser a quantidade de palavras significativas pelo tempo em que a amostra de rocha foi observada ou, como o tempo foi o mesmo para todos, apenas a quantidade de palavras.

- **Indicador 2 : Uso de feições interpretadas**

Os textos foram analisados e extraídas as palavras sem significado no domínio, como descrito no indicador 1. As demais palavras foram agrupadas em expressões (palavras compostas, termos com mesmo significado etc.), que por sua vez foram classificadas como interpretativas e descritivas. As expressões descritivas referem-se a feições geométricas da rocha, como texturas, tamanho de grão, mineralogia básica⁸, contatos entre grãos e outras. As expressões interpretadas resultam de um curto processo de inferência desenvolvido sobre a rocha, ou seja, uma única feição tem o poder de expressão de muitas feições descritivas cujo significado já foi extraído. São exemplos expressões como: *compactação química*, que é identificada pela mineralogia e tipo de contatos entre os grãos; *substituição de grãos*, reconhecida pela mineralogia e formato dos grãos; *classificação sub-arcóseo*, que resulta da proporção entre os minerais formadores de rocha e aspecto textural. Essas expressões, dificilmente traduzidas por uma única palavra, são reconhecidas aqui como indicativas do uso de pacotes visuais pelos geólogos.

Não é possível afirmar que os pacotes visuais tenham sido expressos totalmente através das feições interpretadas, uma vez que muitos pacotes não têm tradução verbal e correspondem ao conhecimento tácito, mas o uso intenso de feições interpretadas indica certamente que o raciocínio do especialista se dá em outro nível que não aquele onde as feições descritivas são reconhecidas.

- **Indicador 3 : Organização e indexação do domínio**

Os testes de memória e classificação foram analisados de maneira a expor a forma de organização do domínio na mente dos especialistas, intermediários e novatos. Esse indicador não é medido quantitativamente como os anteriores, mas analisado qualitativamente a partir dos parâmetros utilizados para classificação e recuperação de informação no domínio. Por exemplo, geólogos agrupam um conjunto de amostras de rochas por terem origem no mesmo ambiente, por apresentarem uma mesma textura principal, por possuírem mesma mineralogia etc. A seguir, são descritos os testes e os resultados obtidos. Para uma melhor compreensão, os resultados de cada observação são apresentados nos gráficos e tabelas em ordem decrescente, por categoria.

Teste 1 - Avaliação da memória de longa duração.

Foi apresentada uma lâmina de rocha por um minuto e solicitado que fosse descrita completamente 90 minutos depois.

Estudos demonstram que o aprendizado se dá através da retenção de informações na memória de longa duração (conforme apresentado nas Seção 4.3.2 e 4.3.2). A informação é capturada no meio e armazenada na memória de curta duração, para só depois ser processada e retida na memória de longa duração. Por essa razão, a forma como uma informação é armazenada na memória de longa duração é um importante demonstrativo da organização mental de um indivíduo e um bom mecanismo de compreensão da perícia.

⁸ A questão se a mineralogia é uma feição descritiva é controversa, uma vez que a identificação mineralógica em si é uma tarefa de interpretação, como reportado também em [GAPPA e PUPPE, 1998]. Neste trabalho, os minerais muito conhecidos por sua frequência de ocorrência foram considerados descritivos, enquanto os menos usuais, de difícil reconhecimento, foram considerados interpretativos.

A hipótese desse experimento considerou que, à medida em que se desenvolve a perícia, aumenta a capacidade de se reconhecer rapidamente os aspectos importantes de um problema, porém a retenção se dá numa forma mais interpretada e não descritiva. Feições interpretadas são formatos mais eficientes de armazenar informações, uma vez que uma única interpretação alcançada substitui muitas feições descritivas. Ainda, os esquemas internos parecem ser naturalmente organizados em feições interpretadas e não descritivas, sendo portanto mais direta a associação das novas informações.

A Figura 6.6 apresenta o resultado da análise da amostra para o indicador de quantidade de informação significativa, relacionado com os níveis da perícia. As linhas representam as médias de palavras (linha superior) e de palavras significativas (linha inferior) para cada uma das classes da amostra (especialistas (E), intermediários (I) e novatos (N)). Embora seja esperado que especialistas observem muito mais aspectos significantes da rocha, a relação entre perícia e a quantidade de informação retida não é tão clara.

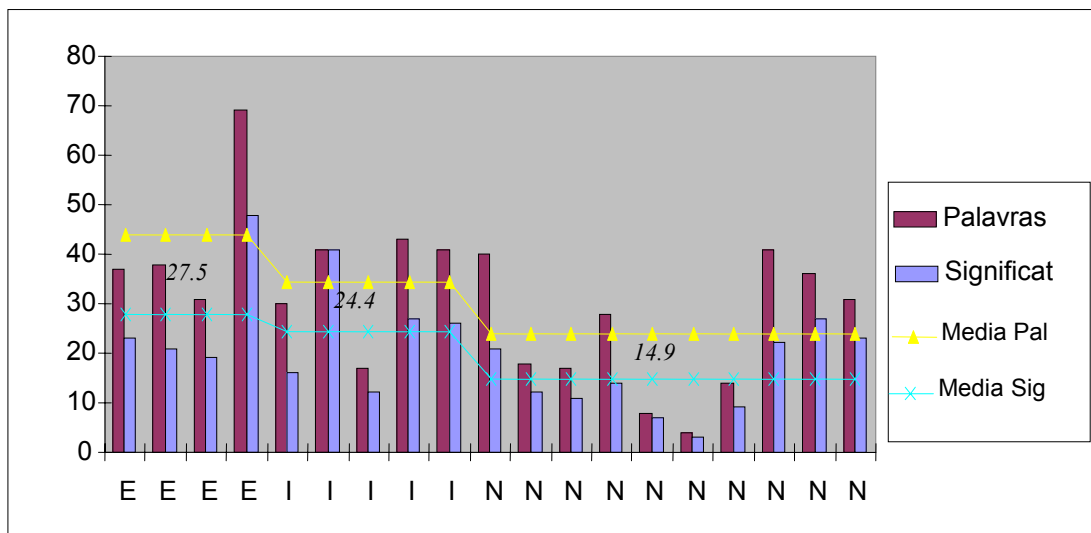


FIGURA 6.6 – Relação entre os níveis da perícia e quantidade de informação retida na memória de longa duração, medida através da quantidade de palavras utilizadas e da quantidade de palavras significativas no domínio utilizadas.

Na média, especialistas lembraram de mais informações (27 palavras significativas), do que os intermediários (24), e estes mais do que os novatos (15), porém a média não é muito representativa do comportamento dos indivíduos (há novatos com a mesma medida que especialistas e intermediários). Isso sugere que esse comportamento, embora influenciado pela perícia, aparenta ser resultado da capacidade de memória e de uso da linguagem de cada indivíduo.

O uso de feições interpretadas (Indicador 2) mostra uma relação mais aparente com a capacidade de reter informação por um tempo mais longo, conforme apresentado na Figura 6.7. O uso de feições interpretadas diminui à medida que decrescem os níveis da perícia. Muitos novatos não retiveram a informação através da interpretação de feições.

Deve-se considerar ainda que uma feição interpretada contém maior quantidade de informação do que uma feição descritiva. Sob solicitação, o especialista pode reportar as feições descritivas da rocha a partir daquela interpretada, resultando num volume real de informação maior do que o obtido pelos novatos, como sugerem os estudos sobre comparações entre especialistas e novatos discutidos no Capítulo 3.

Há evidências de que, ao reportar as feições descritivas encontradas na rocha um tempo após a sua observação, os especialistas descrevem aspectos não claramente visíveis na rocha, mas que são normalmente associados àquela interpretação. Isso sugere que os especialistas não estão utilizando efetivamente a memória para recuperar essa informação, mas sim seus modelos previamente armazenados. Esse fato sugere ainda que a coleta de informação não foi através das feições descritivas, mas como pacotes visuais já interpretados. Porém, esse comportamento não pode ser medido objetivamente neste trabalho, pelas dificuldades em definir quais as feições descritivas são efetivamente visíveis na rocha.

Porém, o fato de que os especialistas *reportaram* a amostra de rocha utilizando feições interpretadas não é um indicativo em si (de que essa informação foi *coletada* dessa maneira), como é proposto neste trabalho. Como o armazenamento na memória de longa duração é realizado após a filtragem e o processamento das informações, as feições descritivas coletadas no problema poderiam ter passado por um processo de inferência que aplica busca sobre os modelos do domínio, produzindo uma interpretação armazenada. Essa hipótese é descartada no Teste 3.

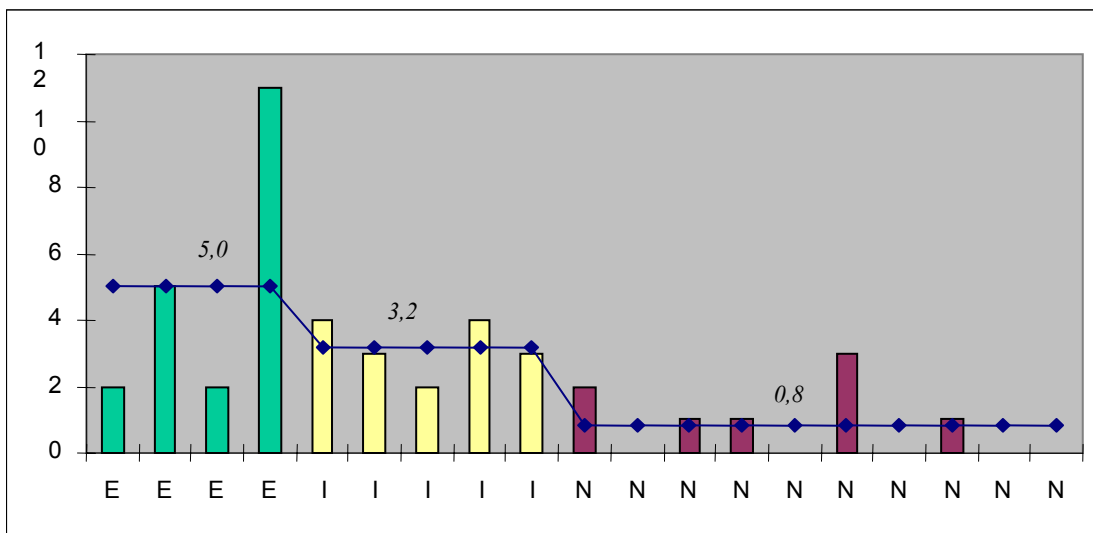


FIGURA 6.7 – Relação entre os níveis da perícia e quantidade de informação interpretadas, medida pelo número de ocorrências, retidas na memória de longa duração, medida através da quantidade de expressões de interpretação utilizadas. A linha rotulada representa a média para cada uma das classes da amostra (especialistas (E), intermediários (I) e novatos (N)).

Teste 2 - Demonstrativo da quantidade de conhecimento.

Uma lâmina de rocha foi exposta pelo tempo solicitado de forma que fosse observada e descrita no maior detalhe possível.

Testes de avaliação de vocabulário têm sido utilizados, como aqui, como uma medida da quantidade de conhecimento do domínio. Nesta avaliação, ao permitir que a descrição fosse feita ao mesmo tempo que a observação, o fator da qualidade da memória foi minimizado nos resultados.

Novamente, a quantidade de palavras utilizadas ou a quantidade de palavras significativas para o domínio, não mostram relação com a perícia. Embora na média especialistas usem mais palavras e palavras significativas do que intermediários e novatos, essa relação não decresce linearmente com a perícia, como demonstrado na Figura 6.8, onde intermediários aplicaram menos palavras significativas do que novatos.

Na realidade, o alto uso de palavras significativas, traduzidas pelos termos técnicos de Geologia por novatos nesse experimento, pode ter sido influenciado pelo fato de que estes estavam passando por um treinamento em Petrografia Sedimentar na fase em que o experimento foi realizado. Uma amostragem de novatos menos homogênea poderia mostrar menor uso de palavras significativas do que encontrado aqui.

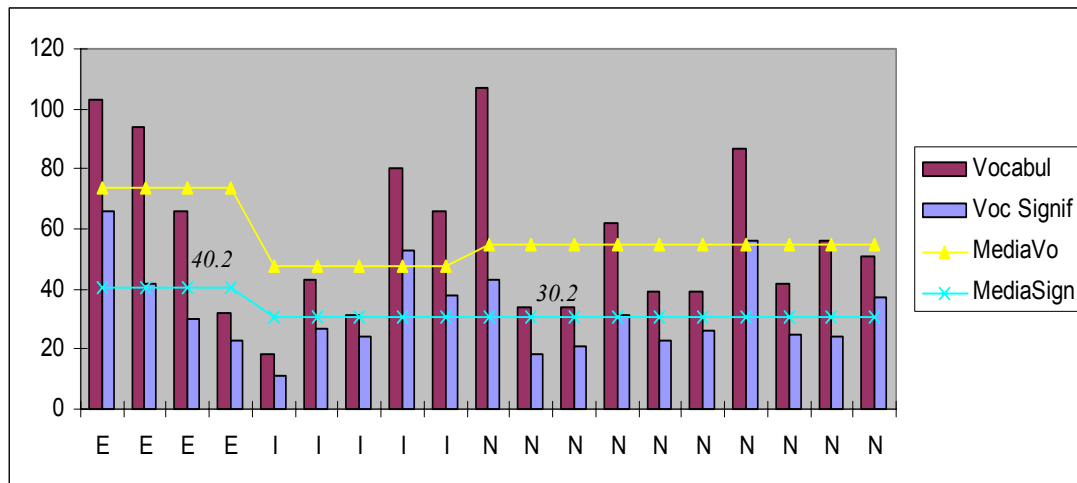


FIGURA 6.8 – Relação entre os níveis da perícia e quantidade de informação extraída de uma lâmina de rocha (medida pelo número de ocorrências) descrita durante a exposição da rocha. As linhas representam as médias de palavras (linha superior) e de palavras significativas (linha inferior) para cada uma das classes da amostra (especialistas (E), intermediários (I) e novatos (N)).

A relação entre os níveis da perícia e o uso de feições interpretadas (Indicador 2) em uma descrição livre é apresentada na Figura 6.9. Essa relação mostra o aumento do uso de feições interpretadas para descrição à medida que aumentam os níveis da perícia.

A hipótese desse experimento foi de que a aquisição de informações a respeito de um problema se dá através do casamento de pacotes visuais. O teste 3 foi construído de modo que os geólogos fossem pressionados pelo tempo reduzido a resolver o problema rapidamente, utilizando dessa forma o conteúdo da memória de curta duração e suas estruturas cognitivas mais eficientes.

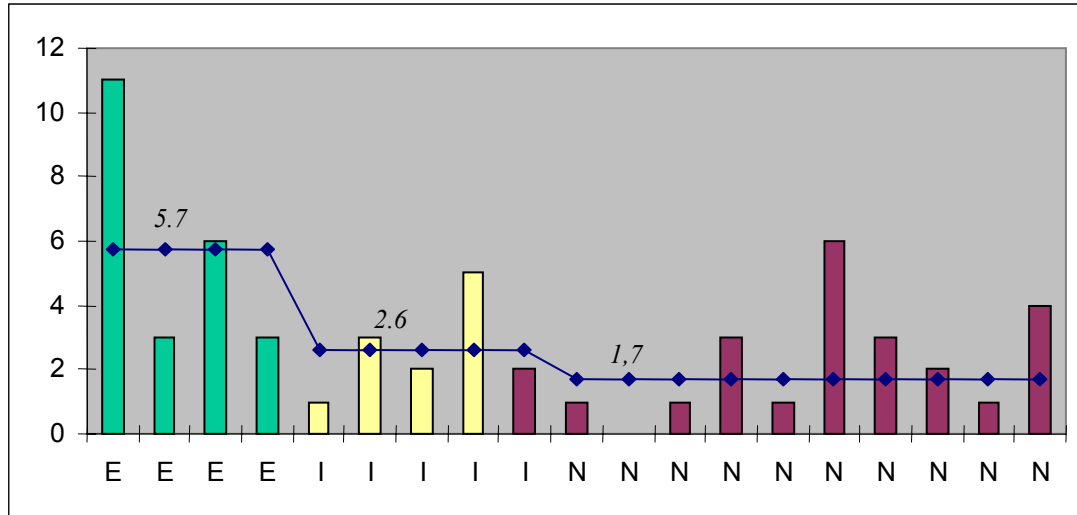


FIGURA 6.9 – Relação entre os níveis da perícia e uso de feições interpretadas para descrição de rochas. A linha rotulada representa a média para cada uma das classes da amostra (especialistas (E), intermediários (I) e novatos (N)). O eixo vertical representa o número de feições interpretadas descritas.

Teste 3 - Demonstrativo de pacotes visuais e memória de curta duração.

A relação aqui demonstrada fica mais evidente nos resultados obtidos com a Lâmina 3, incluída como um contra-teste. Nesse teste, a rocha apresentada é do tipo metamórfica, cuja descrição não pertence ao domínio em estudo. O novato de maior nível de perícia em Petrografia Sedimentar na sua categoria, no entanto, é um especialista em Petrografia Metamórfica.

Os resultados apresentados na Figura 6.11 mostram que, uma vez resolvendo problemas no seu domínio, o especialista em Petrografia Metamórfica utilizou grande número de feições interpretadas para descrever a amostra, enquanto os demais utilizaram número variável de feições, porém sem relação com a perícia, como havia ocorrido anteriormente. Para esse tipo de rocha, os especialistas e novatos deste experimento devem ser classificados como novatos e comportaram-se como tal, utilizando feições descritivas para descrever a amostra.

Foram expostas três seções de lâminas delgadas, uma de cada vez. Duas delas de rochas sedimentares e outra de rocha metamórfica. Cada uma delas foi mantida por 15 segundos apenas, sendo descrita em seguida.

Da mesma forma que nos testes anteriores, não foi encontrada uma relação forte para o Indicador 1, entre a quantidade de palavras ou de palavras significativas utilizadas. Já os resultados das primeiras duas lâminas apresentadas, para o Indicador 2, mostram uma relação clara entre o uso de feições interpretadas e os níveis da perícia, conforme mostra a Figura 6.10 (a) e (b).

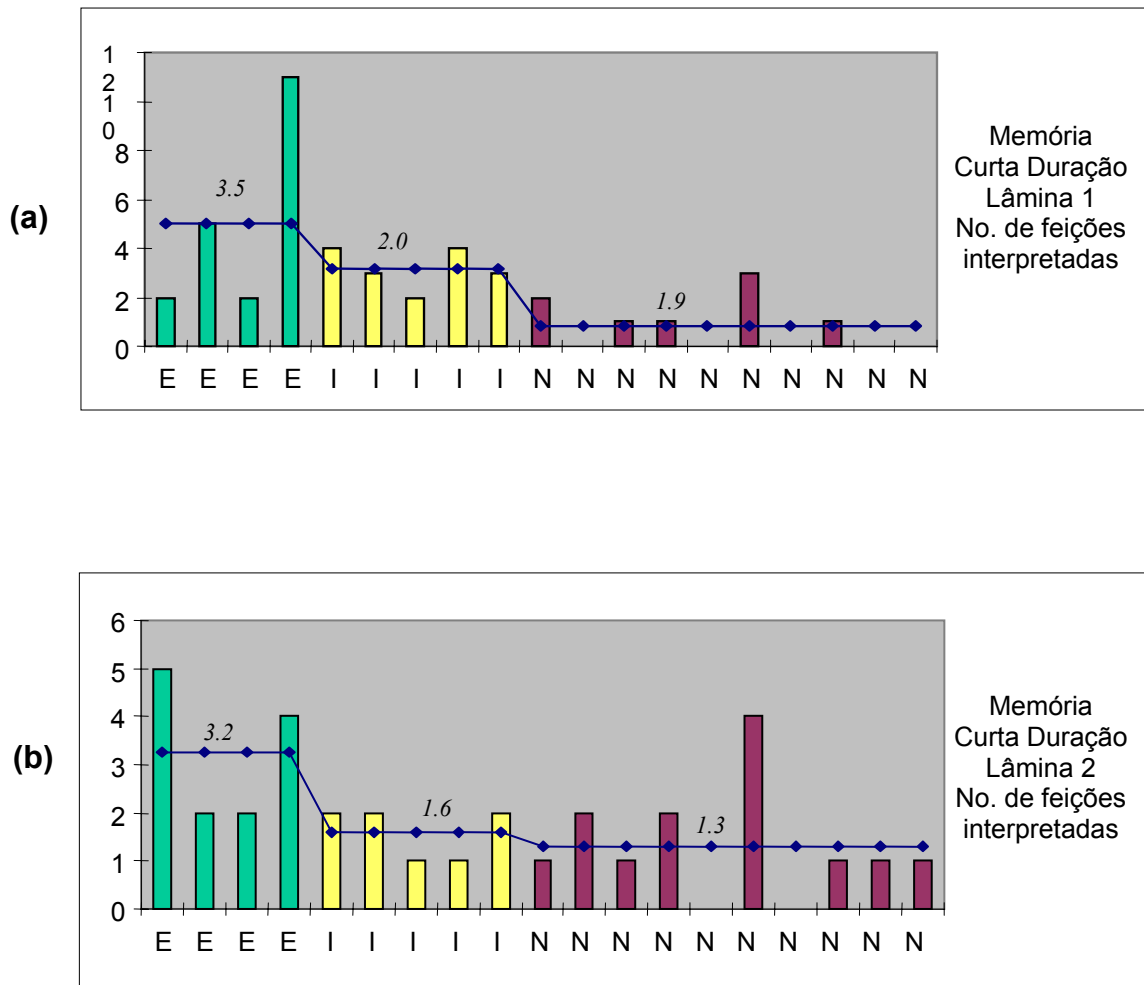


FIGURA 6.10 – Relação entre os níveis da perícia e uso de feições interpretadas para descrição de rochas utilizando a memória de curta duração. A linha rotulada representa a média para cada uma das classes da amostra (especialistas (E), intermediários (I) e novatos (N)). O eixo vertical representa o número de feições interpretadas descritas para a Lâmina 1 (a) e 2 (b).

O tempo limitado para a realização do teste tornou mais clara a relação entre os altos níveis da perícia e o uso de feições interpretadas. A capacidade de reconhecer rapidamente um grande conjunto de feições da rocha indica a utilização de uma forma de casamento de padrões ao invés de um exame sistemático da imagem da rocha. O fato de descrevê-la através de aspectos interpretados e não de feições efetivamente vistas indica que o casamento de padrões não é tampouco um processo de casamento de imagens, como pode-se supor a princípio. Tudo indica que as estruturas casadas, embora correspondam a níveis quase sensoriais, são *modelos* de como aqueles tipos de feições acontecem. Neste trabalho, essas estruturas foram chamadas de *pacotes visuais*, numa analogia às configurações de peças de xadrez num tabuleiro, estudadas por (DE GROOT, 1965; NEWELL e SIMON, 1972).

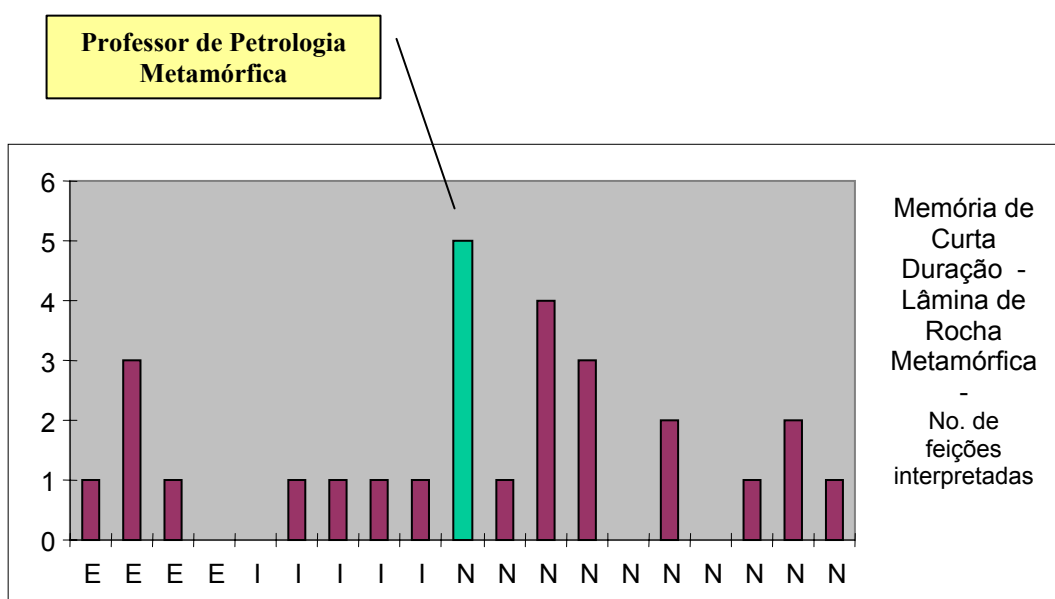


FIGURA 6.11 – Relação entre os níveis da perícia e uso de feições interpretadas para descrição de rochas utilizando a memória de curta duração num problema fora do domínio da perícia. Em destaque, um especialista em Petrologia Metamórfica, que foi classificado neste trabalho como novato.

Teste 4 - Demonstrativo da capacidade de memória

Foram apresentados dois conjuntos de fotos, um de cada vez. Um formado de objetos quaisquer (paisagens, carros, flores) e outro de imagens de lâminas de rochas sedimentares ao microscópio ótico. Cada um dos conjuntos foi exposto por 45 segundos. Imediatamente após, solicitou-se ao geólogo a descrição do que foi visto nas fotos, com o maior detalhe possível.

Neste experimento, não foi possível realizar medidas objetivas, uma vez que os resultados não possuem parâmetros mensuráveis. Assim, optou-se por descrever os padrões de comportamento observados.

Para o primeiro conjunto, o comportamento foi mais ou menos homogêneo ao longo de toda a amostra. A estratégia mais utilizada foi a de tentar lembrar-se das fotos segundo sua posição, da esquerda para a direita e de cima para baixo e descrevê-las em termos dos aspectos mais visíveis. Não existe relação entre o número de fotos lembradas ou o nível de detalhe em que foram lembradas e a perícia.

Para o conjunto de rochas, o comportamento difere entre os diferentes níveis da perícia. Os novatos repetiram o comportamento acima, tentando lembrar das fotos na ordem em que estas apareceram. As fotos foram descritas em termos de mineralogia, formato e contato do grão. Metade da amostra identificou algumas das fotos com aspectos interpretados como porosidade, cimentação e compactação.

Os intermediários e especialistas não consideraram a ordem em que as fotos apareceram. Aparentemente, a memorização foi feita agrupando as fotos por aspectos comuns importantes. Os agrupamentos foram feitos comumente a partir da classificação da rocha (obtida a partir da mineralogia), da porosidade, cimentação e retrabalhamento,

embora fossem mencionados aspectos mineralógicos igualmente. Todos os especialistas fizeram tentativas de lembrar das rochas a partir de aspectos absolutamente interpretados, como identificar o reservatório de origem da rocha (“*parece muito o conglomerado Carmópolis*”), ou o nível de metamorfismo que poderia ter atuado sobre ela (“*parece ser metamórfica ou metasedimentar*”). Esse comportamento não foi observado em nenhum dos novatos ou intermediários.

Finalmente, especialistas e intermediários lembraram mais detalhes na média do que novatos, demonstrando clara relação entre a perícia e a capacidade de reter informação.

O resultado do teste de memória deve ser visto como um demonstrativo da forma como especialistas organizam e indexam as informações. Ao adquirir novas informações, como o caso das fotos a serem memorizadas, especialistas buscam associá-las às estruturas internas através de seus índices. Este experimento demonstrou que, mesmo para o caso de armazenamento e simples recuperação, *especialistas optaram por indexar as imagens a partir de aspectos interpretados e não descritivos*. É razoável supor que esses sejam os índices mais importantes na organização da informação.

A tentativa de lembrar-se das imagens utilizando interpretações da unidade sedimentar, e não da amostra utilizada, sugere que a organização hierárquica do domínio não é feita pela composição mineralógica como ensinado nas escolas, mas sim pela interpretação genética da amostra. Mais genericamente, pode-se afirmar que especialistas organizam mentalmente o domínio de acordo com as classes de solução dos problemas de sua especialidade. Ou seja, especialistas em interpretação diagenética construirão a hierarquia de domínio segundo os ambientes diagenéticos. Especialistas em proveniência organizarão o domínio de acordo com os ambientes de origem dos sedimentos, e assim por diante.

Teste 5 - Demonstrativo de esquemas ou conhecimento profundo.

Três conjuntos de fotos, um de flores, um de paisagens e um de rochas foram apresentados, um de cada vez. Foi solicitado que o geólogo dividisse as fotos em grupos, descrevendo o critério utilizado para separação.

No teste com fotos de flores, onde os elementos das fotos eram bem definidos, os geólogos utilizaram indistintamente os critérios de cor, formato e uma aproximação da espécie. Todos os critérios utilizados referiram-se aos aspectos mais visíveis das fotos sob um exame rápido.

No teste com paisagens, repetiram-se o resultado de utilizar feições claramente visíveis da foto. Os critérios mais aplicados, tanto por especialistas como não-especialistas, foi a presença de árvores, de construções ou de animais. Secundariamente, foram utilizados critérios mais subjetivos, como beleza da paisagem, clima, aconchego, entre outros.

No mesmo teste de classificação utilizando fotos de rochas, o critério para separação se diferencia para os três grupos. A Tabela 6.2 mostra os quatro primeiros critérios para classificação das fotos de rochas por toda a amostra. Os campos sombreados indicam os critérios interpretativos das feições observadas na foto (cimentação/compactação da rocha, presença de porosidade, origem e classe composicional da rocha). Os demais critérios são observações diretas sobre a amostra de rochas, como cor da foto, forma de grão, texturas e mineralogia. A tabela demonstra que o uso de feições interpretadas aumenta com o nível da perícia.

Esses resultados reforçam aqueles do Teste 4 ao indicar que, com o aumento da perícia, a forma de organização do domínio baseia-se cada vez mais em feições interpretadas, e não nos aspectos visuais utilizados para classificação na literatura.

Outros indicadores foram aplicados sobre os dados dos testes anteriormente descritos, porém não foram demonstradas relações com os níveis da perícia e, portanto, não serão descritas em detalhe. Os indicadores são:

- Eficiência do vocabulário: Proporção entre o uso de palavras significativas para o domínio da Geologia e palavras de uso comum ao fazer a descrição;
- Riqueza do vocabulário: Os termos significativos foram classificados em vocabulário rico, médio e pobre. A classificação foi feita pelo especialista com base no quanto um determinado termo técnico é comum no domínio ou necessita um conhecimento mais profundo para ser utilizado.

TABELA 6.2 - Distribuição dos critérios de classificação utilizados por especialistas, intermediários e novatos. Os campos sombreados marcam critérios baseados na interpretação de feições.

CRITÉRIOS PARA CLASSIFICAÇÃO DE FOTOS DE ROCHAS NO TESTE 5					
Obs.	Classe	Critério1	Critério2	Critério3	Critério4
1	E	classe da rocha	classe da rocha	classe da rocha	classe da rocha
16	E	cor	Cimento	porosidade	classe da rocha
10	E	cimento	Cimento	argila infiltração	mineralogia
14	I	porosidade	Cimento	cimento	origem
18	I	porosidade	Porosidade	porosidade	porosidade
8	I	cimento	Porosidade	cimento	porosidade
17	I	porosidade	Cimento	cimento	cimento
19	I	classe da rocha	Cimento	forma de grão	porosidade
9	N	crescimentos	forma de grão	cimento	cimento
11	N	classe da rocha	classe da rocha	porosidade	cimento
13	N	crescimentos	Cimento	mineralogia	porosidade
7	N	crescimentos	Cimento	porosidade	porosidade
12	N	cor	Cor	cor	cor
6	N	cimento	Porosidade	porosidade	porosidade
5	N	cor	Textura	porosidade	porosidade
4	N	forma de grão	Fósseis	textura	textura
3	N	forma de grão	Mineralogia	textura	textura
2	N	mineralogia	Mineralogia	mineralogia	mineralogia

Cabe salientar que os resultados dos testes são influenciados significativamente pela memória do indivíduo, já que, na maioria dos testes, as amostras foram expostas e somente depois de ocultas deveriam ser descritas (com exceção do Teste 2). Já foi exaustivamente demonstrado que a capacidade de memória se reduz com a idade (STERNBERG, 1982; POSNER, 1989). Portanto, os geólogos mais novos, classificados como novatos, deveriam ser favorecidos por uma maior capacidade de reter informação quando comparados com os especialistas. Não foi possível determinar um fator de compensação para essas diferenças. Portanto, deve ser considerado empiricamente esse fator na utilização dos resultados deste estudo.

6.2.2 Comparação com o domínio da Fitopatologia

Essa tese propõe que especialistas em Geologia desenvolvem e aperfeiçoam pacotes visuais como uma estrutura cognitiva que suporta a inferência. Essa suposição está associada não ao domínio da Geologia em particular, mas ao fato que a solução de problemas neste domínio é fundamentalmente baseada na análise de imagens. Para verificar essa suposição, outro domínio que aplica solução de problemas baseado em imagens foi analisado, utilizando o mesmo experimento aplicado aos especialistas em Petrografia Sedimentar. Esse domínio foi o da Agronomia, na tarefa de identificação de Fitopatologias (doenças) em batatas. As doenças da batata são investigadas a partir de sintomas dessas doenças no tubérculo, que se mostram como cicatrizes, lesões purulentas, orifícios e podridões na casca ou no interior do tubérculo. Embora a amostragem não tenha sido de mesmo tamanho e existam diferenças significativas entre os domínios, especialmente quanto à maturidade da ontologia de domínio, as diferenças esperadas entre especialistas e novatos puderam ser verificadas.

Participaram do experimento quatro agrônomos, dois dos quais considerados especialistas no assunto, um intermediário e um novato. O primeiro é um professor e pesquisador do assunto na Faculdade de Agronomia da UFRGS e também responsável do Ministério da Agricultura pelos laudos de autorização de importação de batatas sem patógenos do Cone Sul. O segundo é agrônomo da EMBRAPA na região da Serra Gaúcha e Doutor em Fitopatologias de culturas pela Faculdade de Agronomia da UFRGS. O terceiro agrônomo é assistente de pesquisa no Departamento de Fitopatologia da Faculdade de Agronomia da UFRGS, realizando doutoramento em Fitopatologias. O quarto é assistente de pesquisa no mesmo departamento e poderia também ser classificado como intermediário. Não há estudantes na amostra. A classificação dos agrônomos participantes do experimento é apresentada na Tabela 6.3.

Neste experimento, constituído de seis etapas, as imagens de lâminas foram substituídas por lotes de batatas de diferentes espécies, coletadas em diferentes fontes (feiras, mercados, lavouras), e fotos de sintomas de patologias selecionadas. Para evitar conhecimento prévio de fotos contidas em atlas ou livros de fitopatologias, as fotos foram confeccionadas exclusivamente para este experimento.

Os indicadores aplicados aqui são os mesmos três descritos na Seção 6.2.1: quantidade de informação significativa, utilização de feições interpretadas e organização e indexação do domínio. Os resultados obtidos são descritos brevemente a seguir.

TABELA 6.3 - Classificação dos agrônomos participantes do experimento quanto ao nível da perícia.

COMPOSIÇÃO DA AMOSTRA PARA FITOPATOLOGIA					
Observação	Tempo Mestrado	Relação Dissert./Tese	Horas de trabalho	Formação	Classificação
1	mais de 10 anos	Muito	Mais de 40	5	Especialista
2	mais de 5 anos	Muito	Entre 1 e 10	3	Especialista
3	menos de 5 anos	Muito	Entre 1 e 10	5	Intermediário
4	-	-	Entre 10 e 40	5	Novato

Teste 1 - Avaliação da memória de longa duração

Um lote de quatro batatas foi apresentado durante um minuto. Após uma hora, os agrônomos deveriam descrevê-las em todos os detalhes lembrados.

Ambos especialistas descreveram as batatas como *doenças e não como tubérculos*, indicando que o armazenamento das informações na memória de longa duração se dá em termos de problemas e soluções e não em padrões observados. As feições mencionadas são utilizadas apenas para justificar o diagnóstico. São comuns também justificativas baseadas na descrição conhecida da doença, porém com feições que *não* foram vistas na amostra. Expressões como “*pode confundir com sarna comum da batata (Streptomyces scabies), mas a forma não confirma*” indicam o uso de modelo como suporte no reconhecimento de feições. Os especialistas praticamente não utilizaram expressões tipicamente descritivas como *manchas, cicatrizes* ou *perfurações*.

Os não-especialistas descreveram o lote de tubérculos a partir das feições observadas, utilizando expressões descritivas como *manchas escuras, perfurações* e *apodrecimento*. Algumas vezes, a descrição foi seguida de uma interpretação possível da causa da lesão.

Não foi possível observar diferenças significativas entre a quantidade de palavras ou palavras significativas entre especialistas e não-especialistas.

O teste sugere que especialistas armazenam a informação em termos de problemas a serem resolvidos, enquanto não-especialistas o fazem em termos de sintomas e aspectos observados. A recuperação da informação memorizada é fortemente dirigida por modelos no caso dos especialistas, demonstrado pela citação de feições não existentes nos lotes observados.

Teste 2 - Demonstrativo da quantidade de conhecimento

No teste de vocabulário, onde a descrição é realizada durante a observação e sem restrição de tempo, o comportamento de especialistas e não-especialistas se assemelha. Todos os participantes descreveram com detalhe os sintomas, associaram-nos a uma causa possível (patologia ou inseto) e justificaram, utilizando um modelo mais formal de descrição para esse domínio.

Como era de se esperar, especialistas identificaram maior número de aspectos da batata a serem descritos (sintomas e doenças) do que não-especialistas, indicando que possuem mais conhecimento do domínio.

Teste 3 - Demonstrativo de pacotes visuais e memória de curta duração

Esse teste foi realizado através da exposição de três lotes de batatas, um por vez. Cada lote foi exposto à observação por 15 segundos, sendo posteriormente descrito.

Os resultados para a memória de curta duração corroboram os testes anteriores quanto à organização do domínio. Especialistas reconhecem e descrevem o domínio em termos de interpretações e soluções. Nesse teste, os especialistas fizeram descrições breves dos lotes de batatas sem patologias importantes e descreveram os lotes doentes através das doenças. Tipicamente, os especialistas começam as descrições com “*tubérculo com sarna*” ou “*tubérculo com tecido corticóide típico de sarna*” enquanto não-especialistas descrevem como “*tubérculos com duas áreas necrosadas e perfurações*”.

À medida que aumenta a perícia, as observações de feições descritivas perdem a importância no processo de solução de problemas, quando comparadas ao incremento do uso de pacotes visuais que determinam atalhos para o diagnóstico.

Teste 4 - Demonstrativo de organização do domínio

Foram repetidos nesse domínio os testes de classificação de fotos realizados com geólogos, apresentando um conjunto de fotos de flores e outro conjunto de fotos de paisagens e solicitando que os agrônomos os agrupassem e expusessem o critério utilizado para o agrupamento. Depois, foi apresentado um conjunto de fotos com sintomas de patologias em batatas e novamente solicitado o agrupamento e critério. Exatamente como na amostra de geólogos, os agrônomos classificaram as fotos de flores pelos critérios de cor, formato e presença ou não de flores. O mesmo resultado foi encontrado para a classificação de fotos de paisagens. Os critérios de classificação foram a presença ou não de árvores, construções e animais, além de critérios mais subjetivos como ser uma paisagem bucólica ou ser uma área de lazer. Não houve diferença entre os critérios de especialistas ou não-especialistas.

Para o teste de classificação dos tubérculos, cujos resultados estão listados integralmente na Tabela 6.4, a diferença dos critérios de classificação torna-se aparente entre as categorias. Especialistas classificaram as fotos por doenças, pouco mencionando os sintomas visualmente aparentes nos lotes mostrados. Não-especialistas classificaram através dos sintomas visíveis, embora fizessem menção à possível doença quando do seu conhecimento.

A avaliação dos resultados coletados nesse domínio indica que à medida que se desenvolve a perícia no domínio de classificação de patologia de batatas, agrônomos paulatinamente deixam de utilizar feições descritivas e organização e indexação do domínio. Esse comportamento é semelhante àquele observado para o domínio da Petrografia Sedimentar, descrito na Seção 6.2.1.

Diferentemente do domínio da Petrografia, no entanto, especialistas em Fitopatologia *não* mantêm o vocabulário descritivo utilizado no início do aprendizado. Tampouco o ampliam, enriquecendo esse vocabulário como observado no Teste 1 do experimento com Petrografia, onde especialistas, mesmo quando instados a somente descrever uma amostra, utilizam um vocabulário mais rico do que intermediários e novatos.

Esse comportamento é evidenciado também pelo fraco formalismo descritivo do domínio, onde os mesmos termos (como *mancha*, *podridão*, *cicatriz*) descrevem feições nitidamente distintas em termos visuais e de significado. O domínio não dispõe de terminologia suficiente para explicitar as diferenças entre essas feições.

As causas da falta de desenvolvimento de uma ontologia descritiva própria para esse domínio podem ser apenas especuladas neste trabalho, uma vez que seria necessária uma pesquisa mais apropriada para serem compreendidas. São elas:

- o domínio não é suficientemente complexo para inibir a comunicação entre seus agentes e motivar o desenvolvimento de uma ontologia mais sofisticada;
- a identificação de patologias é facilmente aprendida pelos novatos, sendo que esse diagnóstico substitui o uso de uma ontologia particularmente descritiva, o que não é possível em se tratando de Petrografia Sedimentar;
- o domínio não é suficientemente maduro cientificamente para permitir que uma ontologia se desenvolvesse naturalmente.

TABELA 6.4 – Critérios utilizados por especialistas e não-especialistas para classificação de informação no domínio. Os campos sombreados indicam o uso de feições interpretadas para classificação.

CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO DO DOMÍNIO EM FITOPATOLOGIA					
Obs.	Classe	Critério 1	Critério 2	Critério 3	Critério 4
1	E	Fusarium - mofo branco	Streptomices (sarna comum) e problema fisiológico (rachadura)	Sarna prateada	Rizoctonia (esclerodios)
2	E	Tuberculo com pelicula branca com esclerotinia	Tuberculo com pelicula rosa com sarna	Tuberculo com pelicula branca com sarna	Tuberculo com pelicula rosa com fungo oportunista (fuzarium)
3	I	perfuracoes por inseto, patogeno ja' invadiu e causou apodrecimento	necrose por apodrecimento	manchas escuras (pretas) superficiais	manchas marrons necrosadas e deprimidas
4	N	porcoes escuras de terra aderida (Rizoctonia)	Insetos e problemas fisiologicos	fusarium e sarna: fusarium com podridao seca (2 tuberculos). Sarna - lesoes corticosas com formato estrela (2 tuberculos).	-

6.2.3 Análise dos resultados

Os resultados aqui apresentados corroboram estudos teóricos desenvolvidos anteriormente, porém sem demonstração experimental. VanLehn sugere que especialistas demonstram memória excepcional no seu domínio e que organizam as informações segundo feições mais estruturadas do que novatos (VANLEHN, 1989). Essas hipóteses são suportadas pelos dados aqui coletados para o domínio da Petrografia Sedimentar e também sugerem comportamento similar para o domínio da Fitopatologia.

Este trabalho amplia a compreensão anterior sobre percepção e organização do domínio ao demonstrar de que forma as informações utilizadas para a organização do domínio se relacionam com as informações perceptuais utilizadas por não-especialistas.

A primeira característica marcante desse domínio é a necessidade de múltiplas formas de representação de conhecimento para suportar a tarefa, de modo a refletir o conhecimento do domínio. Foram definidos a hierarquia de conceitos, os grafos de conhecimento, os pacotes visuais e os triângulos de classificação composicionais, além de estruturas simples de armazenamento, como as tabelas de composição mineralógica das amostras.

Ficou demonstrado aqui que muitas estruturas taxonômicas transmitidas durante o processo de aprendizado, não são efetivamente utilizadas para solução de problemas embora tenham importante papel na comunicação do domínio. Por exemplo, as hierarquias de classificação de rochas siliciclásticas baseadas em composição mineral são utilizadas para denominação da rocha (ou seja, contribuem com o processo de externalização do conhecimento), porém não desempenham nenhum papel significativo na solução do problema⁹. Mais significativo é o fato de que os especialistas identificam a classe composicional da rocha, sem medir a proporção mineralógica dos constituintes, mas apenas utilizando pacotes visuais que incluem texturas típicas e composição aparente.

O papel dessas estruturas e outras identificadas na ontologia do domínio, se não aplicadas na solução de problemas, ainda permanece obscuro. Mas pode-se considerar que os modelos reais sejam talvez muito complexos para serem externalizados, reforçando o papel das ontologias de domínio na transmissão do conhecimento e não apenas na solução de problemas.

As características cognitivas da perícia em Petrografia Sedimentar são analisadas com maior profundidade no Capítulo 7, a seguir.

6.2.4 Etapas do método de aquisição de conhecimento

A experiência obtida neste trabalho pode ser formalizada através de uma seqüência de etapas e técnicas para aquisição e modelagem de conhecimento em domínios complexos que utilizam raciocínio baseado em imagens. Todas as etapas passaram pela validação do especialista e usuários e são descritas a seguir.

⁹ Essa afirmação pode não ser verdadeira para outras tarefas, como verificação de proveniência de arenitos.

Etapa 1 : Familiarização com o domínio e com a tarefa

Imersão na literatura e entrevistas no local onde a tarefa é realizada são utilizadas para obter uma compreensão geral do domínio. As entrevistas são realizadas com gerentes e usuários, mais do que com os especialistas. O objetivo é compreender melhor a realidade do domínio, identificando a percepção de diferentes profissionais que trabalham no ambiente.

Etapa 2 : Coleta de problemas resolvidos

O estudo de casos resolvidos, quando eles estão disponíveis, permite obter uma série de informações sobre o problema: nível de conhecimento do usuário, recursos envolvidos, complexidade da solução, entre outros. Os casos são particularmente úteis para que sejam coletados os termos do domínio, pois refletem exatamente o vocabulário utilizado na solução de problemas.

Etapa 3 : Construção da ontologia do domínio

O esforço de pesquisa aplicado recentemente no desenvolvimento de ontologias é uma boa medida da complexidade do tema. Neste trabalho, o componente descritivo da ontologia do domínio foi construído inicialmente através da estrutura e termos do domínio obtidos dos casos. Os atributos foram posteriormente detalhados através de entrevistas com o especialista, de forma a definir o domínio dos atributos da maneira mais completa possível, o que mostra ser fundamental para a construção de uma aplicação. Os atributos selecionados foram exaustivamente revisados através de entrevistas concorrentes.

A hierarquia do domínio foi obtida diretamente do especialista, utilizando técnicas de classificação. A partonomia, que mostrou ser a estrutura mais utilizada para execução da tarefa, foi obtida a partir dos casos e detalhada por entrevistas. Os triângulos de classificação foram obtidos na literatura, segundo seleção e orientação do especialista, que forneceu o algoritmo de funcionamento através de entrevistas.

Etapa 4 : Extração das relações causais

As relações causais foram obtidas através dos grafos de conhecimento, com o suporte de uma ferramenta especialmente construída para esse fim no projeto. Essa ferramenta permite definir cada uma das interpretações possíveis no domínio, construindo o respectivo grafo de conhecimento de modo a associá-la com os termos da ontologia, respeitando o respectivo nível cognitivo em que se dá a associação. A ferramenta é disponibilizada apenas na interface do especialista e prevê as funções descritas a seguir.

Definição de um novo grafo. O usuário descreve a interpretação e o limiar a ser utilizado (embora o sistema sempre sugira o limiar de 6 para cada grafo, ele pode ser alterado pelo usuário). Um identificador único é gerado pelo sistema. A janela da interface de modificação ou criação dos grafos de conhecimento da ferramenta é apresentada na Figura 6.12. A janela *GraphName* recebe a descrição da interpretação associada ao grafo. O identificador único (*GraphId*) é gerado pelo sistema assim como é sugerido o limiar (*Threshold*) de 6, que pode ser modificado pelo usuário.

Definição dos pacotes. O usuário denomina e, se desejar, descreve o pacote atribuindo-lhe um peso entre 1 e 6. O sistema gera automaticamente o identificador único do pacote e a relação causal com a interpretação do grafo. O usuário então define quais

pacotes visuais (*Chunks*) estarão associados à interpretação. Cada um dos pacotes aqui definidos será detalhado na seqüência de interação com a interface.

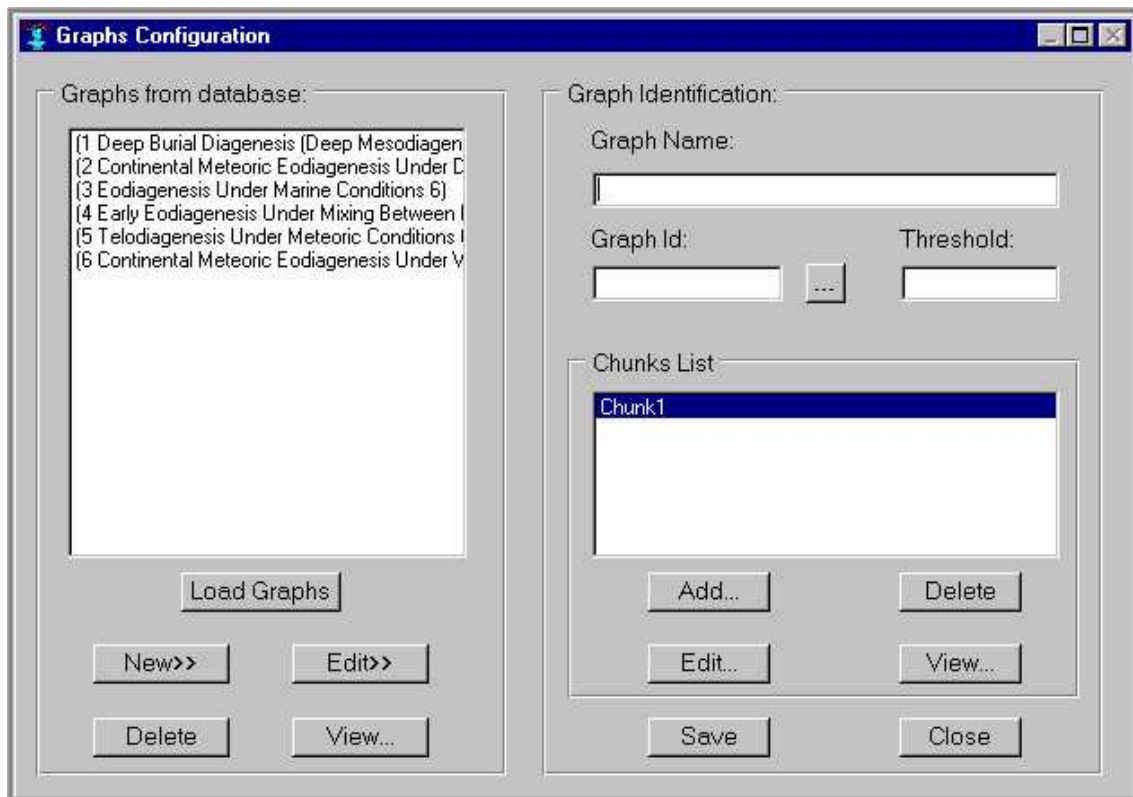


FIGURA 6.12 – Interface do especialista para criação e definição de grafos de conhecimento.

Seleção das partes do pacote. Para cada um dos pacotes gerados pelo usuário, o sistema disponibiliza o modelo da ontologia do domínio, no nível de externalização, ou seja, na forma dos termos, seus atributos e valores possíveis. A Figura 6.13 apresenta a interface de definição do pacote. A interface utiliza o mesmo modelo do conhecimento do sistema, sendo que qualquer modificação no esquema do modelo será dinamicamente refletida aqui. O usuário seleciona inicialmente o termo do domínio (janela *description attributes*) e o sistema mostra os atributos associados (janela *attribute name*) ao termo selecionado. O usuário seleciona o atributo e o sistema apresenta a lista de valores possíveis (janela *attribute values*), permitindo que o usuário selecione um ou mais dos valores. Para cada termo-atributo-valor selecionado, o sistema gera o identificador único e a respectiva associação com o pacote criado pelo usuário. A qualquer momento, o usuário pode entrar novos atributos ou valores não definidos previamente na ontologia. No final da construção do pacote, é atribuído o peso adequado e a interface gera e salva a respectiva representação do pacote no modelo da ontologia, de forma que possa ser logicamente interpretada e aplicada na interpretação.

Etapa 5 : Aquisição do conhecimento de inferência

A compreensão da forma de solução de problemas dos especialistas do domínio, descrita detalhadamente no Capítulo 7, foi obtida graças ao estudo cognitivo do

domínio, que ressaltou as formas distintas com que especialistas e novatos tratam a informação.

A definição das estruturas de inferências aplicadas no reconhecimento de pacotes visuais, interpretação diagenética e classificação composicional foi realizada com o auxílio das bibliotecas de métodos de solução de problemas de Common KADS, descritas em (GARDNER et al., 1998; SCHREIBER et al., 1999). Cada uma das estruturas de inferência foi comparada ao método de solução de problemas do especialista para buscar aquela que mais se ajustava ao seu processo cognitivo. A estrutura selecionada foi sucessivamente comparada à forma de solução observada em entrevistas concorrentes e redesenhada para refletir as particularidades da tarefa.

A estrutura assim obtida reflete a forma de raciocínio do especialista, mas não é passível de implementação. A adaptação das estruturas eliciadas para um modelo computacional exigiu a proposição de um conjunto de suposições a respeito do domínio. Entre elas, foi necessário definir a classe de usuários potenciais do sistema, a qualidade e quantidade de informações que devem ser fornecidas ao sistema, as variações de problemas tratado pelo modelo e outras definições que caracterizam o escopo do domínio (descritas nas Seção 8.5, Competência da tarefa). Também foram definidas as competências do modelo da tarefa, quais sejam: disponibilizar a terminologia necessária à descrição em um nível adequado a um usuário classificado como novato no domínio, realizar a classificação composicional da rocha aplicando um diagrama triangular e sugerir a proveniência e processos diagenéticos que geraram a amostra analisada. O método de adaptação da estrutura de inferência cognitiva dessa aplicação para um modelo computacional está descrito em (SILVA, 2001).

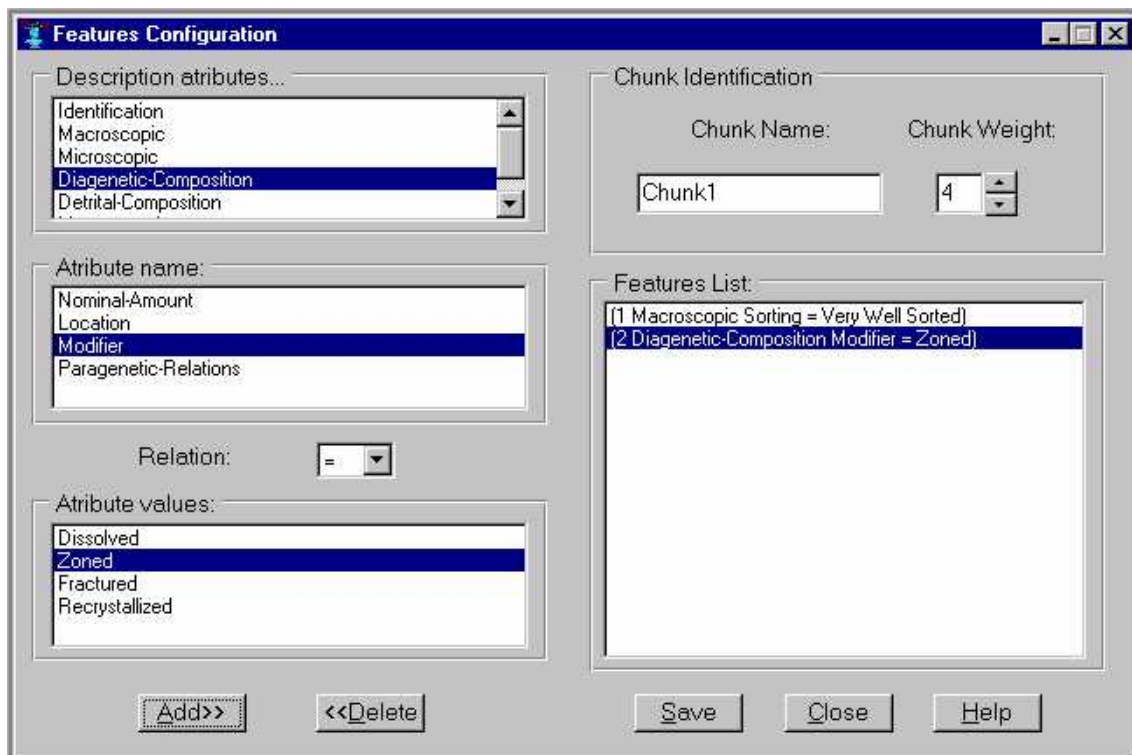


FIGURA 6.13 - Interface do especialista para detalhamento dos pacotes visuais que compõem o grafo de conhecimento.

A partir das estruturas de inferência assim obtidas e da compreensão da forma de trabalho do especialista, foram definidos posteriormente os modelos das tarefas para classificação composicional e interpretação diagenética. Os modelos cognitivos do domínio são descritos no Capítulo 7 e o modelo computacional de inferência no Capítulo 8.

A avaliação dos métodos de aquisição aqui descrita deve ser analisada nas condições do projeto. Três fatores especialmente devem ser levados em conta. O primeiro é a grande familiaridade do autor com o domínio da Geologia e Petrografia em geral (mas não com a Petrografia Sedimentar), minimizando o problema inicial de compreensão dos termos e, principalmente, dos métodos de solução de problemas usualmente aplicados no domínio. Segundo, a familiaridade com o especialista, o que facilitou a alocação dos extensos períodos de tempo necessários ao desenvolvimento do projeto. Terceiro, o fato do especialista ministrar habitualmente aulas práticas de Petrografia Sedimentar. Essa prática permite um exercício constante do processo de externalização do conhecimento, justificando aos alunos decisões de interpretação no momento em que são tomadas. Essas condições especiais facilitaram o processo de aquisição de conhecimento, podendo mesmo ser uma pré-condição para tê-lo tornado possível.

Não obstante os resultados obtidos, muitos componentes do processo de inferência ainda permanecem obscuros. As dificuldades são ampliadas por diversos fatores inerentes à inferência humana: (1) inúmeros processos mentais são executados em paralelo, enquanto o especialista deve descrevê-los de modo seqüencial; (2) grande parte desses processos são perceptuais ou automatizados e, portanto, não são percebidos de forma consciente pelo especialista; e (3) a avaliação das informações que suporta esse processo é realizada através de analogia e lógica nebulosa, e não através da lógica binária onde se pretende que sejam modelados.

Uma avaliação geral dos métodos permite concluir que a literatura descreve alternativas adequadas para a aquisição do conhecimento declarativo em domínios complexos. A aplicação de diversas técnicas, com objetivos previamente definidos para cada uma, garante uma boa cobertura sobre a maioria das representações mentais humanas. Porém, nenhum dos métodos aplicados é capaz de expor os métodos de inferência do especialista quando o conhecimento tácito está envolvido na solução ou é planejado especificamente para isso. Apesar da ativa pesquisa atual em métodos de solução de problemas (CLANCEY, 1989; WIELINGA et al., 1992; VELDE, 1993; SCHREIBER et al., 1999), os resultados em termos de técnicas eficientes para eliciar conhecimento inferencial são insipientes. Compreender e extrair os métodos e inferências necessárias para solução de problemas que aplicam raciocínio baseado em imagens é ainda uma tarefa puramente investigativa que carece de ferramentas formais para auxiliá-la.

6.3 Sumário do capítulo 6

- Especialistas no domínio da Geologia realizam interpretação apoiados por um modelo mental em dois níveis cognitivos distintos: o nível da externalização e o nível da inferência.
- No nível da externalização são representados os termos do domínio necessários à transferência do conhecimento, como as feições descritivas, nomes de minerais e demais nomenclaturas formais do domínio.

- No nível da inferência são representados os pacotes visuais adquiridos com a experiência e aplicados para o reconhecimento inicial do domínio e dirigir a inferência.
- A aquisição de conhecimento do domínio foi realizada em cinco etapas: familiarização com o domínio e com a tarefa, coleta de problemas resolvidos construção da ontologia do domínio, extração das relações causais e aquisição do conhecimento de inferência.
- A análise da perícia foi desenvolvida para identificar o papel do componente visual do conhecimento no processo de solução de problemas e o quanto esse componente está associado à perícia.
- Os geólogos estudados nesse domínio foram classificados como especialistas, intermediários e novatos. Novatos são estudantes ou geólogos que receberam pelo 100 horas de treinamento em Petrografia Sedimentar. Intermediários são geólogos que utilizam a Petrografia Sedimentar como instrumento de trabalho, sem que seja sua atividade fim. Especialistas possuem pelo menos dez anos de experiência com Petrografia Sedimentar e a utilizam diretamente mais de 10 horas por semana.
- Os experimentos foram construídos de modo a medir a associação de três indicadores da perícia com as classes nas quais os geólogos foram distribuídos.
- Os indicadores utilizados foram: quantidade de informação significativa nas respostas dadas pelos geólogos, intensidade de uso de feições interpretadas e termos utilizados para organização e indexação do domínio.
- Os resultados demonstraram que especialistas não utilizam significativamente maior volume de palavras nas suas respostas, ou mesmo maior volume de palavras significativas do que intermediários e novatos.
- Especialistas consistentemente utilizam mais feições interpretadas - que representam os pacotes visuais - para reconhecer, descrever ou resolver problemas no domínio do que os intermediários o fazem, e estes as utilizam mais do que novatos.
- Especialistas não demonstram maior capacidade de memorização em geral do que intermediários e novatos, porém demonstram muito mais memória quando testados no seu domínio de perícia.
- Especialistas classificam o domínio utilizando feições interpretadas, enquanto novatos o fazem utilizando feições descritivas.
- As taxonomias formais não foram mencionadas durante o processo de solução de problemas e aparentam ter utilidade para externalização do conhecimento, mas não para inferência.
- No experimento reaplicado no domínio da Fitopatologia, os especialistas classificaram o domínio pelos diagnósticos alcançados (ou seja, pela solução) e não pelas feições observadas. Novatos classificaram o domínio a partir de aspectos descritivos.
- Os pacotes visuais e as hierarquias de domínio, construídas a partir das classes de problemas resolvidos, mostraram-se os componentes mais importantes para o reconhecimento inicial do problema e para dirigir o processo de solução.

- Os métodos de aquisição de conhecimento e de solução de problemas em domínios complexos que utilizam raciocínio baseado em imagens devem prever formas de aquisição, modelagem e aplicação de pacotes visuais.

7 A perícia em Petrografia Sedimentar

A perícia em Geologia compreende duas habilidades principais que demandam recursos cognitivos distintos. A primeira é a tarefa de *reconhecer* o produto resultante de um fenômeno geológico particular, à qual utiliza habilidades sensórias e reconhecimento de padrões. A segunda é a *compreensão* de como o produto foi gerado e por qual processo. Os aspectos reconhecidos e sua compreensão são formalizados através de uma teoria sobre processos geológicos. O desenvolvimento de tal teoria exige uma capacidade de abstração e inferência nos mais altos níveis da atividade mental.

Neste capítulo, são examinados a evolução do aprendizado e a forma um geólogo realiza a tarefa de solução de problemas em seu domínio. Embora a Geologia seja uma atividade tipicamente desenvolvida em campo, e não em laboratório como a Petrografia, considera-se a tarefa de descrição petrográfica como representativa do domínio da Geologia como um todo. A interpretação de amostras de rocha exige as habilidades essenciais do trabalho do geólogo num formato melhor estruturado, permitindo atingir melhores resultados num estudo sistemático.

Este estudo evidenciou a multiplicidade das formas de representação de conhecimento que suportam a interpretação geológica e revelou a importância dos pacotes visuais no processo de inferência. Os métodos de solução reconhecidos no domínio aplicam primeiramente o reconhecimento visual numa curta busca progressiva e, apenas secundariamente, busca regressiva através de inúmeras hierarquias de classes, de minerais, de ambientes, de texturas e outras feições geológicas, que não parecem ser refletidas nas hierarquias formais descritas na literatura do domínio.

Essas características cognitivas se refletem nas diferenças identificadas entre especialistas e novatos. Novatos utilizam feições geológicas descritivas para descrever o domínio e, sob solicitação, evidenciam um caminho de busca com muitos passos de raciocínio progressivo e regressivo alternados. Especialistas utilizam feições interpretadas para descrever e classificar o domínio e demonstram utilizar conhecimento tácito para aplicar um método de solução de problema por casamento de padrões, praticamente sem busca.

Esses resultados são detalhados ao longo deste capítulo e fornecem o suporte para o proposição de sistemas que utilizem conhecimento especialista na solução de problemas, além de contribuir para a proposta de novas formas de educação e aprendizagem nas tarefas de interpretação geológica. Embora grande parte das características cognitivas aqui descritas não sejam passíveis de implementação no momento, este estudo fornece subsídios para a busca de alternativas, a médio prazo, que viabilizem Sistemas Especialistas que apliquem raciocínio baseado em imagens.

7.1 O aprendizado

Convencionalmente, estudantes iniciam por estudar as leis gerais da Geologia em cursos, livros e através de outros métodos educacionais tradicionais. Dessa forma, aprendem a forma geral de como os continentes surgiram e o que são e como se formam as rochas ígneas, sedimentares e metamórficas.

Nesse ponto, um geólogo pode ser considerado um *novato*, embora essa classificação seja muito dependente do domínio. Nas fases iniciais de aprendizado, os novatos têm modelos muito gerais para descrever os conceitos do domínio e tendem a armazenar e

aplicar as informações no formato de regras de produção. As regras são dependentes uma das outras ou aplicadas isoladamente. Ao ser solicitado, o novato é capaz de verbalizar uma grande quantidade dessas regras e definir os diversos contextos onde podem ser aplicadas. Porém, apresenta dificuldades em explicitar as cadeias de interdependências na aplicação dessas regras. O conhecimento ainda está fracamente estruturado em sua mente.

À medida que aumenta a experiência, os geólogos verificam e selecionam as leis aprendidas, melhorando-as e construindo um modelo próprio geral de ocorrência dos conceitos e processos do domínio. As regras passam a ser substituídas progressivamente por formas de organização mais estruturadas (Figura 7.1). Aprendem ainda que as leis adquiridas devem ser aplicadas de um modo flexível para obter interpretações plausíveis para as ocorrências geológicas que eles estudam.

Essa flexibilidade começa a ser incorporada na construção do modelo que será utilizado como um estereótipo do domínio. O modelo individual do domínio desenvolvido nessa fase de transformação de pré-novatos em novatos é baseado, tipicamente, em atributos perceptuais imediatos (granulometria, mineralogia, cimento), como foi demonstrado nos experimentos 2 e 4 descritos no Capítulo 6. Esses atributos são utilizados para definir as classes e também para acessá-las. Dessa forma, o estudante agrupará rochas sedimentares baseadas em tamanho de grão, tipo de constituintes ou quantidade de cimento. O novato é praticamente incapaz de produzir inferências úteis para resolver problemas, mas já detém uma boa compreensão do domínio.

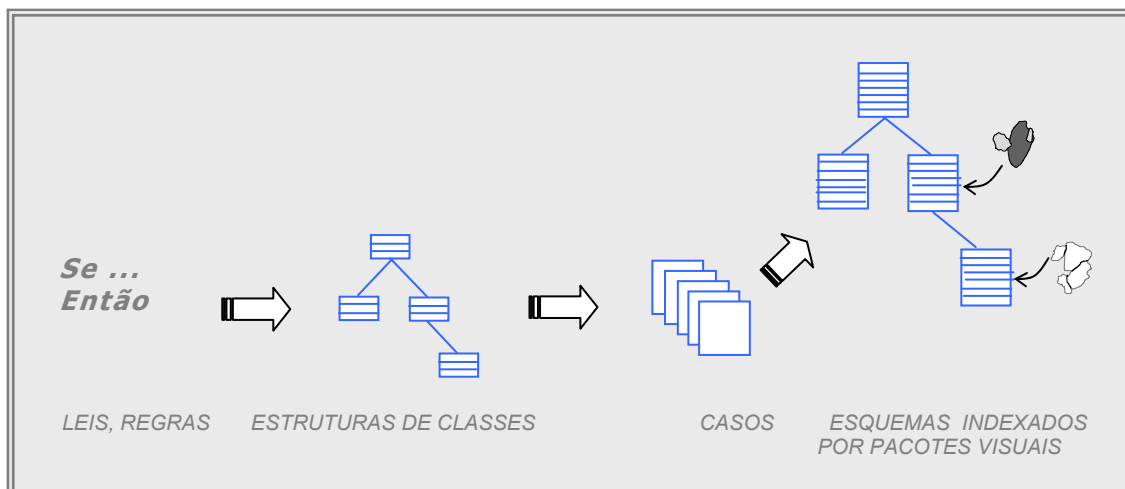


FIGURA 7.1 - Evolução esquemática das estruturas de representação de conhecimento no processo de aprendizado de um geólogo.

Posteriormente, o processo de aprendizado prossegue com uma fase de tentativa de aplicação do conhecimento obtido na solução de problemas. O conhecimento do domínio se expande com a coleta de *casos* na forma de descrições detalhadas daquelas ocorrências geológicas encontradas no campo e laboratório. Casos, como descrito na Seção 5.2.1 - Raciocínio baseado em casos - referem-se à descrição de instâncias de problemas reais associados à solução que foi aplicada para resolvê-los.

Complementando a aquisição de casos, o sistema perceptual dos geólogos trabalha por examinar os estímulos visuais associados a um caso, casando-os com outras estruturas previamente armazenadas em memória e que também representam imagens (HILDRETH e ULLMAN, 1989). Se não houver casamento possível, o cérebro irá criar

uma nova estrutura para representar esse estímulo e irá colocá-lo na hierarquia armazenada para posterior utilização (VANLEHN, 1989). Esse processo é chamado *empacotamento*¹⁰ na literatura de Psicologia.

O termo empacotamento, introduzido anteriormente na Seção 4.3.2, Organização e indexação do conhecimento, é utilizado neste trabalho com o significado *do processo de gerar uma representação abstrata de baixo nível de um estímulo sensorio, com um significado associado*, seguindo a definição de (VANLEHN, 1989), a despeito de ser citado com significados alternativos em publicações relacionadas ao tema. Empacotamento é sugerido como um processo de aprendizado em (NEWELL e SIMON, 1972), ou nas unidades de conhecimento de (DE GROOT, 1965; CHASE e SIMON, 1973) ou ainda na recuperação de padrões da memória para resolver tarefas, descritas em (PATEL e GROEN, 1991).

A Figura 7.2 ilustra o reconhecimento de texturas e estruturas de rochas em lâmina delgada, quando vistas ao microscópio ótico sob luz polarizada. Os experimentos 3a, 3b e 3c, descritos no Capítulo 6, sugerem que o aspecto como os grãos estão distribuídos na rocha, seus contatos e o material intergranular estimula a recuperação de padrões visuais similares, armazenados na memória do geólogo, que auxiliam no reconhecimento da rocha. Cada padrão é mais provavelmente uma representação mental associada a algum objeto do mundo externo do que uma imagem particular observada anteriormente (HOROWITZ, 1978; KOSSLYN, 1994). Essa representação, aqui chamada de *pacote visual*, é sintetizada no cérebro a partir de diversas imagens reais vistas anteriormente e posteriormente associadas com aquele significado geológico particular.

Petrógrafos, como geólogos em geral, retém um número muito grande de padrões visuais representando feições de rochas em sua memória, em uma forma similar àquela encontrada em bons jogadores de xadrez (NEWELL e SIMON, 1972). No xadrez, as informações relevantes não são as peças e suas posições apenas, mas como as posições de diversas peças se relacionam e o quanto essa configuração afeta o jogo. O jogador, no entanto, *percebe* essa configuração do jogo e sua importância de forma atômica e não como a composição de diversos objetos. Analogamente, na Petrografia, não são os minerais ou texturas que consistem no conhecimento estratégico dos pacotes visuais, mas uma combinação particular de minerais, texturas e relacionamentos, e o significado dessa combinação, também enxergado como uma entidade única. Essa constatação, obtida neste trabalho, permite compreender o processo de interpretação geológica de uma forma inovadora em relação a como vinha sendo feito em trabalhos anteriores, a exemplo dos projetos Propector (GASCHNIG, 1981) e Syshiphus (GAINES, 1998). Nestes trabalhos, a interpretação baseia-se na influência de feições texturais individuais sobre as conclusões, o que reflete apenas parcialmente a eficácia demonstrada por especialistas ao realizar interpretações.

Embora o processo de empacotamento em si seja mal compreendido pela Ciência da Cognição, pode-se aceitar que o cérebro retém algum tipo de *representação* do estímulo sensorio (como descrito em (KOSSLYN, 1994)) vinculada uma indicação de significância. Portanto, esse não é estritamente um processo perceptual, mas inclui ainda componentes conceituais mais abstratos (COOKE, 1992). Este significado inferido,

¹⁰ Tradução livre para o termo *chunking*, constante na literatura de Ciência da Cognição, significando o agrupamento de padrões sensoriais em pacotes de informações que, como um todo, possuem um significado particular. Da mesma forma, o termo *chunk* será traduzido para *pacote* neste texto.

embora limitado, tem um importante papel para selecionar os caminhos apropriados durante a busca da solução.

Não existe consenso entre os estudiosos de Ciência da Cognição se a mente humana armazena representações mentais de imagens reais como imagens e representações pictóricas, ou se, ao contrário, é gerada uma representação completamente proposicional (ou verbal) daquilo que é visto. Existem fortes argumentos para ambas as tendências, demonstrando que o consenso ainda está longe de ser atingido (GLASGOW, 1993; KOSSLYN, 1994); (BURTON, BRUCE e HANCOCK, 1999; DEL BIMBO, 1999). Independente da controvérsia de como as imagens são adquiridas e aplicadas pelo cérebro, é aceito que muito do desempenho superior de especialistas na solução de problemas pode ser explicada por empacotamento de estímulos sensoriais. Chase and Simon (CHASE e SIMON, 1973) explicam que o fato de que especialistas podem *ver* mais do que novatos, como verificado nos experimentos aqui conduzidos, pode ser explicado através de uma maior quantidade de pacotes.

Na seqüência do processo de aprendizado em Geologia, os casos reais vistos durante as tarefas de solução de problemas e pacotes visuais são incorporados de um modo passivo e desestruturado. A medida que os geólogos vêem mais exemplos, seus mecanismos cognitivos de alto nível processam o total de casos e pacotes de forma a gerar uma representação abstrata e uma categorização dos conceitos aprendidos (ERICSSON e HASTIE, 1994).

A *Lei da Prática* (NEWELL e ROSENBLOOM, 1981; VANLEHN, 1996) afirma que o tempo necessário para fazer uma tarefa decresce na proporção do número de tentativas feitas anteriormente. Acionados pela repetição e pela Lei da Prática, os mecanismos naturais da mente desenvolvem *casos paradigmáticos* (RIESBECK e SCHANK, 1989), como abstrações do conjunto dos casos vistos. A evolução para estruturas cada vez mais abstratas produzem, por sua vez, os *esquemas*. Esquemas são gerados pela repetição da mesma ocorrência, um tipo de rocha ou uma feição textural, por exemplo, de tal modo que o cérebro irá preservar as feições *comuns* entre todos os exemplos e registrar o modo geral no qual estas feições podem variar de uma ocorrência para outra. No entanto, um esquema nunca irá representar uma instância específica de uma ocorrência geológica, mas sim as feições que geralmente ocorrem em todas as instâncias da mesma classe. Um esquema representa o conhecimento de categorias de acordo com uma estrutura construída de *slots*¹¹ (MATTOS, 1991), uma noção emprestada da Inteligência Artificial para modelar e melhor compreender como as pessoas raciocinam sobre conceitos.

O caso apresentado na Figura 7.2 é reconhecido e armazenado na mente do geólogo seguindo uma estrutura geral de um esquema. O esquema corresponde a uma abstração com um caráter mais sentencial do que pictórico, quando comparado com os objetos reais que o geólogo encontra no domínio. O esquema estabelece as feições (ou atributos) que caracterizam um termo do domínio e tem a capacidade de expressar todos os possíveis valores que esses atributos podem assumir para alguma instância particular. Quando descrevendo uma amostra, o geólogo pode reconhecer e declarar todos os atributos assumidos pelo conceito arenito ou apenas aqueles necessários para descrever o caso particular. Ele irá lembrar-se desse caso, ou amostra, pelo tempo que for interessante para representar uma feição especial ou ocorrência geológica.

¹¹ Os termos *frame* e *slot*, ambos estrangeirismos anglicanos, não apresentaram até o momento tradução satisfatória para a Língua Portuguesa. Serão utilizados no texto, a partir deste ponto, sem o uso de itálico e mantendo a grafia original.

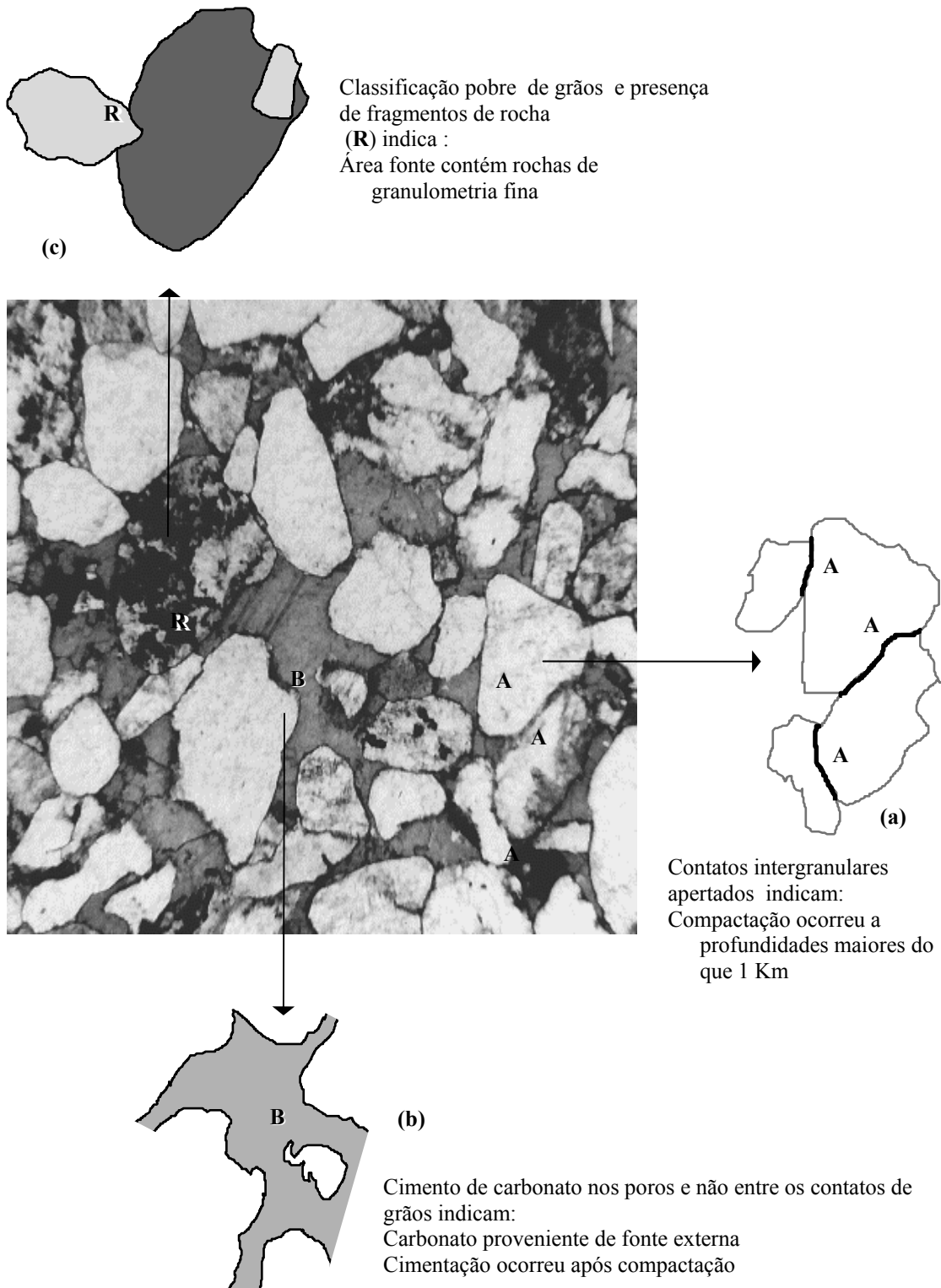


FIGURA 7.2 - O sistema perceptual irá examinar o novo estímulo, como as texturas de rochas mostradas em (a), (b) e (c), e irá tentar casá-las contra os pacotes visuais armazenados na mente. Se nenhuma correlação razoável for possível para os aspectos vistos na rocha, um novo pacote será criado para representar o estímulo.

A medida que o significado especial de uma ocorrência particular perde sua significância - porque o geólogo vê mais exemplos dela posteriormente, por exemplo - suas características irão ser incorporadas como uma variação do modelo do conceito *rocha* e o geólogo não será capaz de lembrar os detalhes dessa ocorrência particular. Mas reterá em sua mente o *modelo geral* de ocorrência de rochas que lhe permite reconhecer outras ocorrências no futuro, prever feições que deverão ser encontradas em rochas do mesmo tipo e complementar informações quando necessário trabalhar com descrições parciais do problema. (Esse modelo deve se aproximar à descrição do conceito Amostra representada no modelo do conhecimento deste trabalho, descrito no Anexo 4). Esse mecanismo é o que permite que especialistas possam descrever em detalhe amostras de rochas que foram vistas apenas por alguns segundos, como descrito no Capítulo 6. Parte dos aspectos descritos no experimento 3 foi recuperada do modelo mental contra o qual alguns padrões visuais da rocha foram casados e não das observações efetivamente realizadas.

Os esquemas, gerados pela abstração de casos, são a forma de representação mental proposta neste trabalho para os conceitos do domínio na mente do especialista. Esquemas representam tipos de rochas, estruturas, texturas, minerais e demais objetos do domínio reconhecidos pelo especialista. O processo de aprendizado aperfeiçoa a estrutura de esquemas por, progressivamente, incluir mais conceitos e torná-la mais enxuta. O processo de enxugamento se dá por redefinir as classes dos conceitos modelados com base em atributos cada vez mais abstratos, cujos valores demandam curtos processos de inferência para serem produzidos. Estruturas de esquemas construídas a partir de atributos abstratos armazenam, de fato, maior quantidade de informação. A *quantidade de informação* não é utilizada aqui no senso computacional, como algo que ocupe maior espaço de armazenamento, mas no senso cognitivo, descrito na Seção 4.3.1. Quantidade de Conhecimento.

De fato, os experimentos que mediram quantidade de conhecimento, descritos no Capítulo 6, não identificaram correlações entre o número de palavras das descrições de especialistas, intermediários e novatos (Figura 6.6). Porém especialistas desenvolveram descrições com maior número de termos técnicos do domínio, em especial os termos que denotam uma interpretação sobre os aspectos cognitivos observados. Assim, especialistas retêm maior quantidade de conhecimento, embora suas representações abstratas sejam mais econômicas do que as representações baseadas em atributos puramente sensórios. Por isso, especialistas demonstram menos memória geral (que tende diminuir efetivamente com a idade) porém retêm maior *quantidade* de conhecimento, como demonstrado nos experimentos.

Como consequência, um estudante de Petrografia classifica as rochas vistas por suas texturas, como tamanho de grão, porosidade ou quantidade de cimento. Já um especialista, classificaria as mesmas rochas por seu nível de porosidade, processos envolvidos em sua formação ou classificação composicional (Teste 4, descrito na – Construção do instrumento de investigação 6.2.1), características essas que são deduzidas a partir das mesmas feições texturais primárias utilizadas pelos novatos para organizar seu conhecimento. Estruturas de esquemas assim construídas são potencialmente mais versáteis para casar com diferentes casos reais encontrados no domínio, melhorando a capacidade de solução de problemas do geólogo.

O processo de aprendizado, portanto, centra-se em três processos concorrentes:

- desenvolvimento e progressivo aperfeiçoamento de estruturas de esquemas;

- a incorporação de pacotes visuais associados a essa estrutura;
- aperfeiçoamento da capacidade analítica e habilidade criativa.

O desenvolvimento da estrutura de esquemas se dá:

- pela incorporação de termos técnicos que descrevem feições e conceitos cada vez mais abstratos do domínio;
- pela inclusões de relacionamentos cada vez mais complexos entre os conceitos conhecidos.

A identificação dos processos acima é uma das contribuições deste trabalho e permite suportar a proposição de novas formas de ensino na Petrografia Sedimentar, dirigidas ao treinamento no reconhecimento e aplicação de pacotes visuais na interpretação geológica.

7.2 O conhecimento declarativo do especialista em petrografia

De acordo com as informações eliciadas do especialista, o conhecimento geológico parece ser suportado por uma estrutura hierárquica, que organiza os conceitos do domínio - tipos de rochas e feições geológicas - pelos processos geoquímicos que produzem as feições, e pelos ambientes sedimentares e diagenéticos. Os conceitos retidos mentalmente pelo especialista podem ser representados por uma estrutura semelhante a exemplificada na Figura 7.3, que detalha o conceito rocha (no modelo representado como *amostra*). A figura representa a estrutura de um arenito eliciado do especialista em Petrografia sedimentar (ABEL et al., 1995). Os slots representam atributos ou feições que os geólogos utilizam para descrever a rocha, tais como *tamanho de grão*, *classificação de tamanho de grão*, *arredondamento*, *modificadores do arredondamento*. Aos slots estão associados seu significado e/ou todos os possíveis valores associados, como, respectivamente, *areia grossa*, *pobremente classificado*, *arredondado*, *pressão de dissolução*, etc.

Estes valores podem ser perceptuais, como *classificação de grão*, *cor* e *geometria*, ou simbólicos, como *pressão de dissolução*, *processo deposicional* ou *proveniência*, que resultam de algum breve processo de inferência, aplicado sobre as feições puramente perceptuais observadas. Quanto maior o nível da perícia, mais abstratos são os atributos que definem os conceitos. Os slots e respectivos valores tem significância e suficiência distintas uns dos outros em relação ao conceito representado pelo esquema. Embora não aparentem ter uma tradução numérica para esses índices, é evidente que a mente humana avalia esses componentes e os utiliza para dirigir o processo de inferência pelos caminhos mais promissores baseado nos atributos mais significantes.

Os esquemas representam casos e feições perceptuais da rocha, como no exemplo acima, facilmente identificadas no domínio, mas representam também outros conceitos mais abstratos, como os processos geológicos que produzem estas feições e as teorias que os suportam. Os conceitos estão ligados por um grande número de relacionamentos e associações com denominações diversas.

<p>Identificação</p> <p><i>Identificação da amostra:</i> arenito</p> <p><i>E-Um:</i> rocha siliciclástica</p> <p><i>Unidade:</i> nome da unidade sedimentar</p> <p><i>Bacia:</i> nome da bacia sedimentar</p> <p><i>Campo:</i> nome do campo petrolífero</p> <p><i>Poço/Profundidade:</i> Identificação do poço de exploração e da profundidade de onde a amostra foi extraída</p> <p><i>Localização:</i> local, estado e país do campo</p> <p><i>Uso:</i> Lista de [caracterização de : reservatório, proveniência, sistema deposicional, estratigrafia, paleogeografia/paleoecologia, modelos diagenéticos]</p> <p>...</p> <p>Descrição microscópica:</p> <p><i>Textura:</i></p> <p><i>Tamanho de grão:</i> lista de [cascalho, areia muito grosseira, areia grosseira, areia média, areia fina, areia muito fina, silte, argila];</p> <p><i>Classificação de grão:</i> um de [muito bem classificado, bem classificado, classificado, moderadamente classificado, pobremente classificado];</p> <p><i>Arredondamento:</i> um de [bem arredondado, arredondado, sub-angular, angular];</p> <p><i>Modificadores de arredondamento:</i> lista de [deformação, dissolução de pressão, corrosão/substituição, crescimentos];</p> <p><i>Esfericidade:</i> índice modal;</p> <p><i>Fabrica</i></p> <p><i>Orientação:</i> um de [homogeneo, heterogeneo, orientação paralela, imbricado];</p> <p><i>Empacotamento:</i> um de [frouxo, normal, apertado];</p> <p><i>Índice de empacotamento:</i> percentagem;</p> <p><i>Contatos:</i> lista de [puntual, longo, côncavo-convexo, suturado];</p> <p><i>Suporte:</i> um de [grão, matriz, cimento];</p> <p>...</p>
--

FIGURA 7.3 - Uma representação parcial da estrutura de representação do conceito *arenito* eliciado de um especialista. As características do conceito estão representadas como frames e slots contendo os atributos e todos os seus possíveis valores.

A Figura 7.4 mostra a hierarquia do domínio simplificada, com os principais objetos envolvidos (ABEL, REATEGUI e CASTILHO, 1996), que é construído principalmente pelas relações *é-um* (objeto é membro de uma classe), e *parte-de* (objeto é uma partição de um objeto mais complexo, ou parte de uma agregação). Um objeto como o representado na Figura 7.3 é inicialmente incorporado ao modelo como um *caso* associado à classe *arenito*. Através dos relacionamentos *é-um* definidos na estrutura, pode-se percorrer a hierarquia como um todo, e verificar que essa amostra é também uma rocha clástica e sedimentar.

A estrutura hierárquica do domínio é utilizada para fazer classificações aproximadas de novas amostras, baseadas em poucas feições rapidamente percebidas, e julgar se o problema em questão está no escopo dos problemas que é capaz de resolver. Os experimentos demonstraram que as hierarquias utilizadas pelo petrógrafo possuem um número muito maior de classes e critérios de organização do que o verificado na literatura de Petrografia Sedimentar. Um exemplo foi dado pela tentativa de um especialista de associar a amostra de arenito apresentada a uma classe "*Conglomerado Carmópolis*". Ou seja, o critério de classificação utilizado não foi textural, já que não seria possível associar arenitos que são de granularidade fina a conglomerados, que são grosseiros, mas sim de origem ou aspecto visual geral, que não são critérios formalizados no domínio para definição de classes. Aparentemente, apenas uma parte da taxonomia efetivamente utilizada por geólogos foi formalizada no domínio através da literatura.

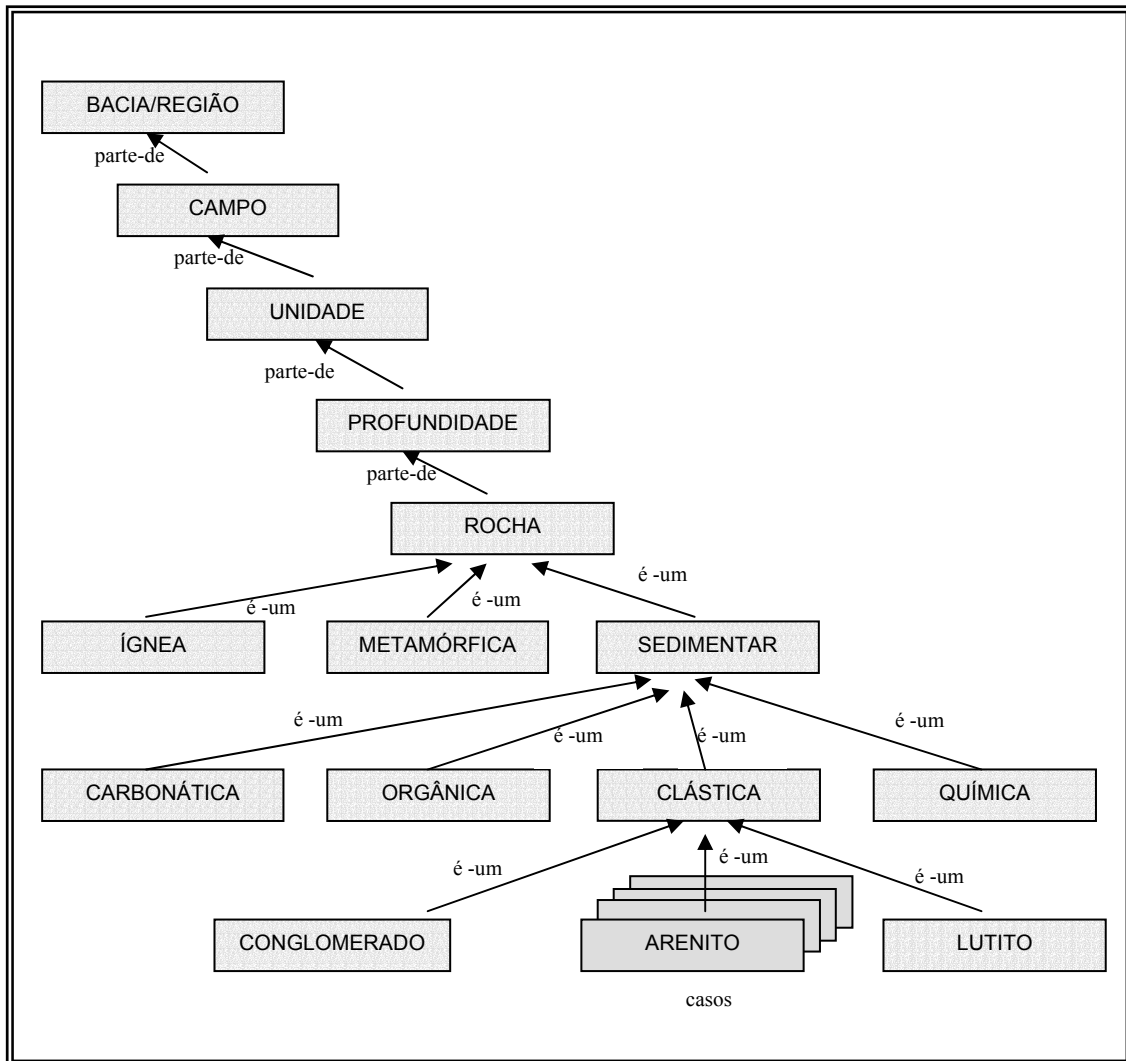


FIGURA 7.4 - Hierarquia de objetos do domínio do conhecimento em Petrografia Sedimentar construído pelos relacionamentos de partição e generalização.

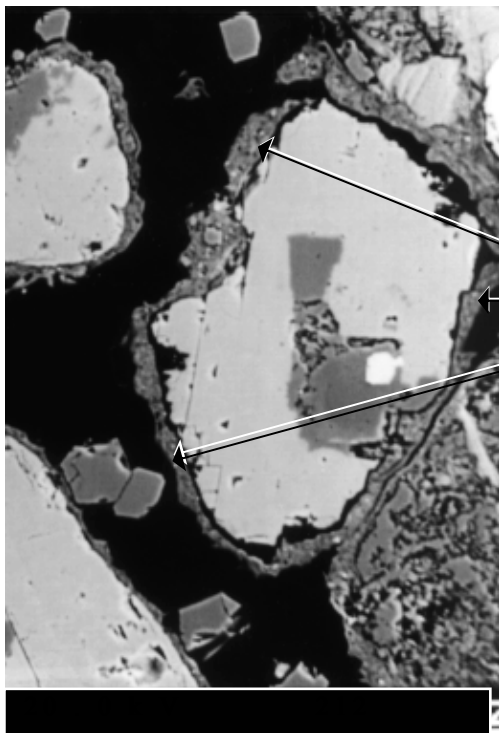
Além de relacionamentos facilmente eliciados como as relações *é-um* ou *parte-de*, outros menos óbvios podem ser observados na estrutura de esquemas. Ambientes *geram* processos que *produzem* feições, feições *estão associadas*, feições *evoluem para* outras feições, feições *ocorrem* em certos minerais são exemplos de relacionamentos freqüentemente utilizados por geólogos para percorrer a estrutura de esquemas. É evidente que certos relacionamentos são mais *fortes* do que outros. Esses são utilizados com mais freqüência para orientar a inferência, embora não seja claro se esta escolha resulta de serem relacionamentos mais confiáveis, mais freqüentes, ou algum outro fator que otimize a busca de solução.

Uma parte dos relacionamentos eliciados que se mostraram fundamentais para o processo de inferência foi explicitamente modelada neste trabalho, embora não tenha recebido denominação que expressasse a semântica desses relacionamentos. São as

associações entre as feições perceptuais e os ambientes diagenéticos que produziram a rochas, as quais foram modeladas como grafos de conhecimento (que serão descritos na Seção 8.1.3- Grafos de conhecimento). Outros relacionamentos percebidos, embora importantes para o processo de inferência, não foram modelados pela impossibilidade de explicitá-los com a necessária clareza. A dificuldade é resultado da inadequação dos métodos de aquisição de conhecimento em eliciar processos aplicados pelo especialista que aplicam conhecimento tácito.

Não é possível comprovar, experimentalmente, que o modelo eliciado seja de fato semelhante às representações mentais do especialista, mas é provável que estejam próximos. Até o momento, sabe-se que os modelos mentais são abstrações *sentenciais* e não *imagens* mentais. A mente humana aparenta não ser capaz de gerar imagens de abstrações mentais, tais como classes de conceitos, mas somente de suas instâncias concretas (KOSSLYN, 1994).

Mesmo os casos vistos e incorporados no modelo mental do geólogo não correspondem eles mesmos a imagens ou modelos pictóricos, porém suas instâncias possuem imagens mentais associadas, que são lembradas quando o caso é evocado. Essas imagens podem ser posteriormente selecionadas como representativas de certos valores de atributos da classe de conceitos a qual o caso pertence. Desta forma, cria-se uma ligação semântica entre a *representação mental da imagem* originalmente relativa ao caso real, com os respectivos atributos que definem as classes no subsequente processo de abstração (Figura 7.5). Ou seja, se o problema descreve uma instância de um *quartzarenito*, pode surgir uma ligação entre a representação da imagem e esta classe.



Eodiagênese: Um constituinte diagenético que ocorre nos espaços entre a maioria dos grãos foi precipitado antes de qualquer compactação substancial.

FIGURA 7.5 - Os pacotes visuais associam um significado sobre a interpretação da rocha ao padrão da feição visualizada na rocha. Este significado irá ajudar a construir a interpretação final da amostra analisada.

Este é o mecanismo geral proposto neste trabalho para a associação de imagens, ou *pacotes* visuais, com o modelo abstrato do domínio. Os pacotes não são as imagens, e não é possível determinar se a representação armazenada é pictórica ou sentencial. Como dificilmente o geólogo consegue descrever ou denominar essa imagem, sugere-se que a representação *não* seja sentencial. Porém a flexibilidade com que ele é capaz de casar essa representação com inúmeras imagens diferentes indica que o casamento é feito contra um modelo e não contra um padrão.

Este trabalho identifica a multiplicidade de formas de representação de conhecimento aplicada por um geólogo na interpretação geológica. Um geólogo adquire o conhecimento primeiramente como padrões visuais e regras de aplicação das leis geológicas. Os padrões visuais são associados a algum significado, compondo os *pacotes visuais*, como demonstrado no exemplo da Figura 7.5. Por sua vez, os pacotes são associados com casos, isto é, descrições completas de alguma ocorrência geológica e as eventuais interpretações em termos de processos geológicos. Subseqüentemente, o processo de abstração na mente do geólogo gera os modelos dos casos e os objetos comuns do domínio, então construindo a estrutura de esquemas como uma organização hierárquica através do relacionamento de generalização. O relacionamento *é-um* é usado para suportar a *herança de atributos*, o processo de inferência básico na hierarquia de esquemas usada principalmente para ajudar no reconhecimento de objetos do domínio ou na classificação de novos objetos encontrados. A estrutura de esquemas também inclui muitos outros tipos particulares de relações aplicados no desenvolvimento de formas de raciocínio menos genéricas, tais como construir associações e suportar raciocínio analógico.

7.3 A inferência no domínio da Petrografia

O raciocínio na maioria das tarefas em Geologia pode ser visto como um processo *imagístico* (YIP e ZHAO, 1996), isto é, o resolvidor de problemas aplica primariamente o reconhecimento visual e apenas secundariamente utiliza a busca ou métodos analíticos. A dificuldade intrínseca em compreender o mecanismo que liga a visão humana e o raciocínio (ALLPORT, 1989; HILDRETH e ULLMAN, 1989), adicionado à natural complexidade do domínio da Geologia, explica a escassez de pesquisa frutífera no assunto, a despeito da importância econômica e o interesse geral na automatização da interpretação geológica por computador. Alguns resultados da aplicação da Inteligência Artificial à interpretação geológica pode ser visto em (PITAS e VENETSANOPOULOS, 1993), (BRAUNSCHWEIG et al., 1995) e (MIHAGUTI e PEDROSA, 1995) e, especialmente, no Projeto Sisyphus III (GAINES, 1998).

A importância dos pacotes visuais no suporte da perícia tornou-se claro, neste trabalho, através dos experimentos que utilizaram protocolos concorrentes durante a análise de amostras de rochas ao microscópio. Especialistas verbalizam rapidamente interpretações das feições reconhecidas, raramente citando-as ou descrevendo-as explicitamente. Intermediários e novatos descrevem feições perceptuais da rocha (cor, texturas, estruturas) e verbalizam passo-a-passo o processo de interpretação geológica dessas feições, quando são capazes de interpretá-las. O processo de busca de solução de não-especialistas é aparente na verbalização, enquanto especialistas demonstram *conhecer* a solução sem precisar buscar por ela. Esse rápido desempenho é explicado através dos pacotes visuais que selecionam os esquemas com interpretações completas dos diferentes tipos de rochas.

O processo de busca mostrou ter papel secundário na inferência, quando comparado ao casamento simbólico de padrões, ou seja, na comparação seletiva de estruturas mentais com aspectos observados no domínio. Esse processo será tanto mais eficiente quanto melhores e mais complexos forem os esquemas de representação do domínio na mente do especialista, e mais desenvolvidas sua capacidade analítica e habilidade criativa.

Numa tarefa de descrição sistemática de amostras, a busca progressiva é utilizada para a descoberta de dados no problema que possam ser comparados com as estruturas mentais. A seleção desses dados, principalmente condicionada aos pacotes visuais armazenados pelo geólogo, é um aspecto essencial da solução de problemas. O processo de seleção inclui a identificação das feições geológicas relevantes, a filtragem dos aspectos não importantes da feição, a compensação de granularidade para que as feições ajustem-se ao modelo e, finalmente, a comparação dos aspectos selecionados com as representações mentais. Se o casamento não for possível, as feições são subdivididas e recombinadas, repetindo o processo até que um casamento aceitável aconteça.

O casamento de certos pacotes visuais dispara a investigação de um ou mais esquemas, considerados como hipóteses. Busca regressiva é então disparada à procura dos outros pacotes associados aos esquemas. Os pacotes encontrados definem quais os esquemas que mais casam com o problema.

A tarefa de descrição petrográfica inicia com uma visão geral do problema e os pacotes visuais são comparados às feições identificadas na rocha nos primeiros instantes da descrição. Estes pacotes guardam um significado associado que irá determinar a principal classificação hierárquica da rocha: *terrígena*, *carbonática*, *química* ou *orgânica*. Esta seleção inicial de esquemas é feita nos estágios iniciais de execução da tarefa e é justificada apenas pelos significados associados aos padrões visuais.

A recuperação do esquema adequado a partir das dicas dadas por um conjunto limitado de feições é atingido através de um processo de casamento parcial e raciocínio analógico (CAMPBELL e WOLSTENCROFT, 1990). Essas ferramentas cognitivas permitem ao ser humano encontrar similaridades entre domínios completamente distintos, como é o caso de estudar o modelo do átomo de Rutherford tendo como base o comportamento dos astros no Sistema Solar (VOSNIADOU e ORTONY, 1989).

No caso da interpretação de amostras de rochas, o especialista recupera esquemas ativados por pacotes visuais particulares reconhecidos inicialmente na amostra, considerando o esquema como uma hipótese a ser tentada. Para confirmá-la, ele coloca as partes (ou atributos) do esquema selecionado em correspondência com as feições reconhecidas na amostra e os outros pacotes visuais associados ao esquema disparam uma busca regressiva, buscando determinar se as demais feições também podem ser encontradas na amostra de rocha. Se houver correspondência entre a amostra observada e o esquema recuperado, a interpretação associada aquele esquema será atribuída à amostra.

Como exemplo, na Figura 7.6, a presença de carbonato recobrimdo grãos detríticos - feição observada - (Figura 7.6 (a)) indica uma substituição química de carbonato sobre o mineral em questão - pacote visual -, que por sua vez sugere a hipótese de que o carbonato foi suprido por alguma fonte externa (esquema recuperado). O geólogo suspende o exame sistemático sobre a amostra, procurando outros aspectos que confirmem sua suposição, sugeridos pelos pacotes visuais associados ao esquema recuperado. Numa busca regressiva, a hipótese é confirmada pela presença de cimento de carbonato na rocha, como mostrado na Figura 7.6 (b). A rede de inferência

representando a seqüência de passos de inferência dessa busca e parte do esquema, cujos atributos são associados com os pacotes visuais, são demonstrados na Figura 7.7.

Embora o processo possa ser modelado por uma rede de inferência, ele é guiado completamente pela estrutura de esquemas na busca do melhor casamento possível, considerando os níveis de significância, suficiência e relevância dos atributos reconhecidos em relação ao objeto considerado para comparação. Ainda que seja possível reconhecer passos de inferência progressiva, a partir dos pacotes iniciais reconhecidos, e regressiva, dirigida pelos esquemas recuperados, é bastante evidente que o casamento simbólico de padrões (ou seja, o componente progressivo da inferência) é responsável pela maior parte das informações inferidas da amostra.

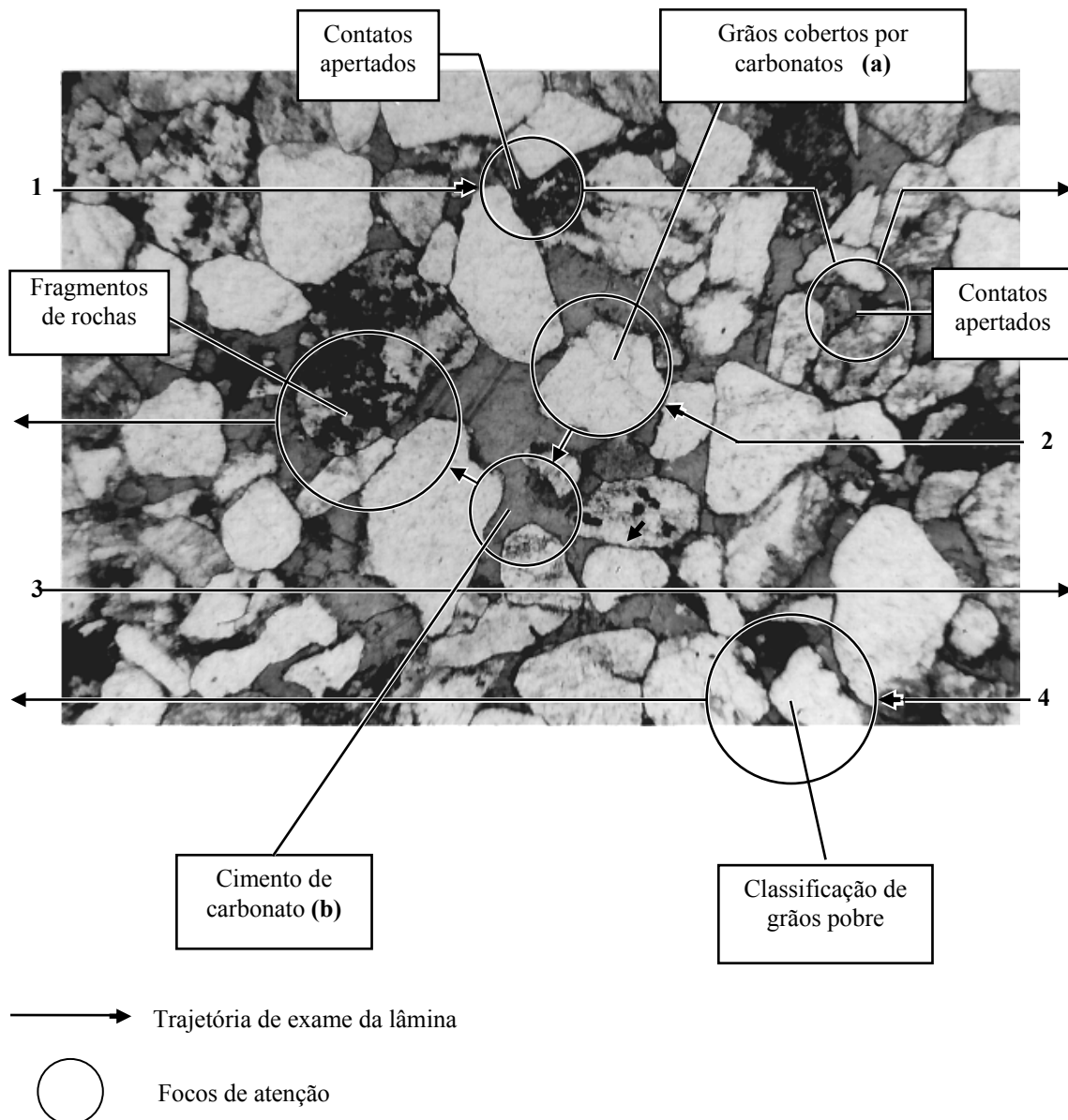


FIGURA 7.6 - A seqüência de exame sobre a lâmina delgada de rocha segue uma trajetória semi-sistemática (1-4), algumas vezes desviada por feições particulares que chamam a atenção do geólogo. Quando (a) é identificado, o geólogo procura conscientemente por (b).

Esta seqüência de passos de inferência é claramente elucidada no processo de eliciação do conhecimento. Ao ser mostrada uma lâmina de rocha apenas parcialmente (cerca de um quarto da área), foi solicitado ao especialista que interpretasse a amostra. Ele deveria descrever todas as feições importantes da amostra e todas as possíveis interpretações que ele poderia inferir considerando apenas as feições que foram visíveis. Posteriormente, foi solicitado que ele mencionasse que outras feições ele poderia esperar encontrar na porção não examinada da amostra. As feições mencionadas referiram-se sistematicamente a cada esquema de representação eliciado e que representam as interpretações previamente descritas. De fato, quando algum aspecto da rocha sugere o casamento com um esquema particular, o especialista irá procurar pelos outros atributos do mesmo esquema ainda não reconhecidos, desenvolvendo um processo de inferência regressiva para isso. A interpretação final da rocha é alcançada combinando-se os significados individuais associados com os pacotes visuais mais os significados sentenciais associados com os esquemas.

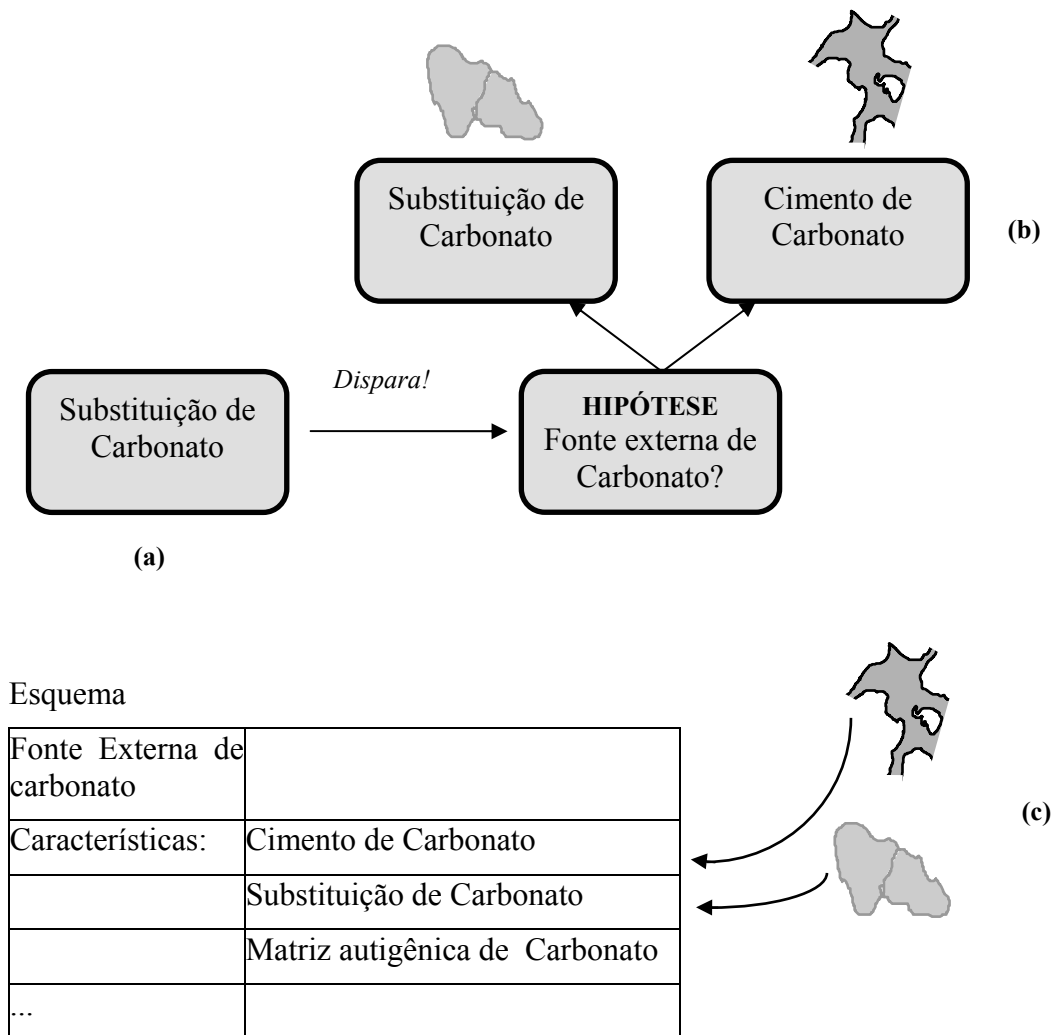


FIGURA 7.7 - Rede de inferência mostrando um breve processo de inferência regressivo. O geólogo vê uma feição (a) na lâmina que recupera um pacote visual particular. Esse pacote dispara alguma hipótese sobre a origem da rocha, baseada num esquema que descreva aquela feição. Para comprovar a hipótese, o geólogo irá procurar na lâmina por outra feição (b) que irá suportar a hipótese. O esquema que associa os pacotes visuais com a interpretação geológica é mostrado em (c).

O processo cognitivo de interpretação diagenética de rochas sedimentares clásticas, eliciado neste trabalho foi reconhecido pelo autor como uma estrutura de inferência similar à *avaliação* (ou *assessment*), descrita em (SCHREIBER et al., 1999). *O casamento de pacotes visuais* em si, inclui uma modificação sobre essa estrutura e, constitui-se por sua vez, uma estrutura de inferência nunca anteriormente descrita na literatura.

O processo de extração de estruturas de inferências a partir de requisitos eliciados do domínio e seu posterior detalhamento e adaptação para modelos computacionais, foi posteriormente estudado por Silva em (SILVA, 2001), utilizando os dados deste trabalho. A estrutura de inferência cognitiva obtida a partir deste detalhamento e o modelo da tarefa que descreve o conhecimento de controle, modelados no formalismo da metodologia Common KADS são apresentados a seguir na Figura 7.8 (SILVA, 2001) e 7.9, respectivamente.

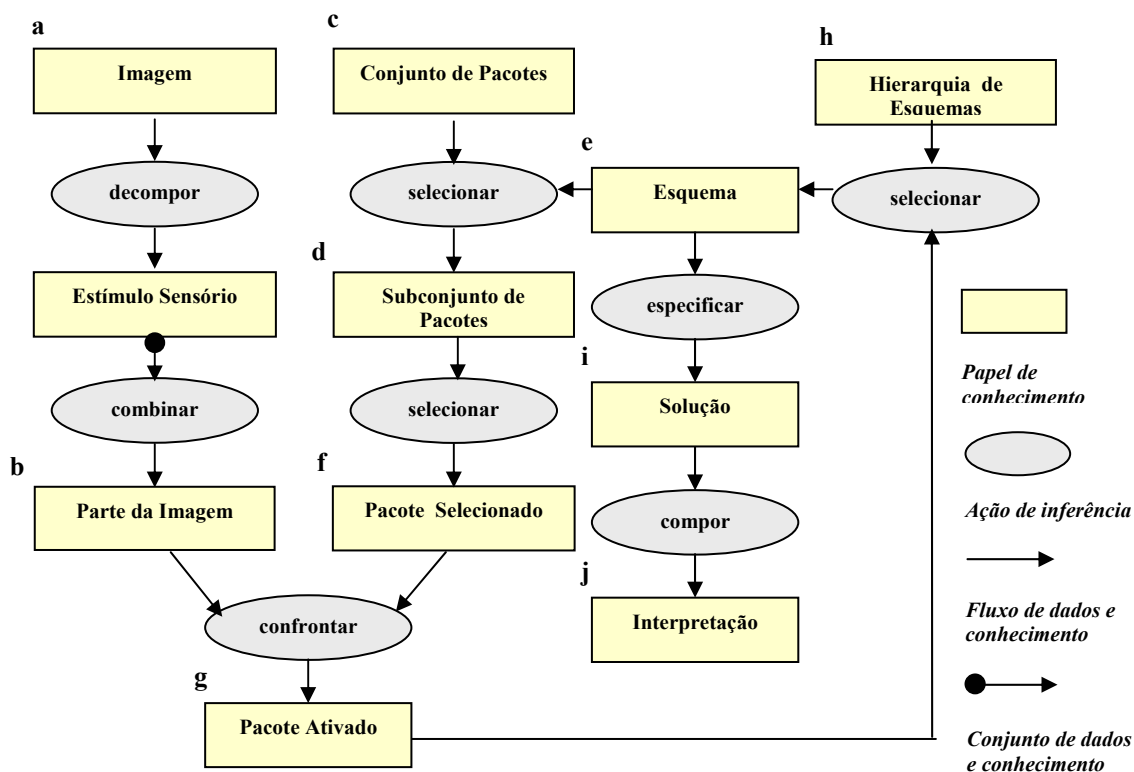


FIGURA 7.8 - Estrutura de inferência do PSM Interpretação de Ambientes Diagenéticos.

Uma amostra de rocha é traduzida mentalmente como um conjunto de estímulos visuais (Figura 7.8 (a)). Esses são selecionados e combinados de diversas maneiras para compor partes da imagem a serem comparadas (Figura 7.8 (b)). A seleção e combinação é repetida, utilizando a habilidade criativa típica da perícia, até que alguma das combinações possíveis seja reconhecida como um pacote. Na mente do petrógrafo, a partir do conjunto de pacotes visuais conhecidos (Figura 7.8 (c)), alguns são

selecionados (Figura 7.8 (d)) para comparação. Se não houver nenhum conhecimento prévio a respeito da rocha que permita ordenar hipóteses de interpretação, como saber de que unidade sedimentar veio, a seleção dos pacotes será aleatória ou definida pela probabilidade a priori de que eles existam na rocha. Se houver conhecimento prévio, os pacotes para comparação serão aqueles associados aos esquemas das rochas típicas (Figura 7.8 (e)) daquele tipo de unidade sedimentar. Os pacotes desse subconjunto selecionado (Figura 7.8 (f)) são confrontados com os estímulos visuais da rocha (Figura 7.8 (b)). Os pacotes similares aos estímulos visuais são *ativados* (Figura 7.8 (g)) e utilizados como índices de busca sobre a hierarquia de esquemas (Figura 7.8 (h)), selecionando aqueles que servirão como hipóteses (Figura 7.8 (e)). Esses novamente selecionam os pacotes associados do conjunto total de pacotes (Figura 7.8 (c)), que irão ser sucessivamente comparados até que nenhuma comparação nova seja possível. Quando nenhuma comparação nova for possível, as soluções (Figura 7.8 (i)) associadas aos esquemas comparados com sucesso serão combinadas para compor a interpretação final (Figura 7.8 (j)). A seleção das soluções e sua combinação dependem de medidas de similaridades e limites aceitáveis na avaliação da similaridade, que irão determinar o quanto um ambiente sedimentar influenciou a geração das feições geológicas observadas na rocha. Essa avaliação de similaridade não é representada na estrutura de inferência.

```

InterpretaçãoAmbientesDiagenéticos(output interpretação, input conjDeEsquemas,
input conjDePacotes, input conjDeEstímulosSensórios)
begin
esquema := ∅; pacoteAtivado := ∅; { inicialmente nenhum esquema selecionado e nenhum
pacote ativado}
repeat
selecionar(output parteDaImagem, input conjDeEstímulosSensórios);
selecionar(output subconjDePacotes, input conjDePacotes, input esquema);
repeat
selecionar(output pacoteSelecionado, input subconjDePacotes);
confrontar(output pacoteAtivado, input pacoteSelecionado, input parteDaImagem);
until CasamentoÚtil(output saída, input pacoteAtivado);
selecionar(output esquema, input conjDeEsquemas, input pacoteAtivado);
gerar(output solução, input esquema);
until TodosEsquemasSelecionados(output saída, input conjDeEsquemas);
combinar(output interpretação, input solução);
end

```

FIGURA 7.9 . Especificação de controle do PSM Interpretação de Ambientes Diagenéticos

A interpretação da amostra é obtida quando um conjunto mínimo de pacotes visuais associados ao esquema é encontrado. Essa avaliação considera também a significância e suficiência desses pacotes em relação a interpretação. Ou seja, mesmo que apenas um dos pacotes visuais seja encontrado na amostra, se for uma feição muito diagnóstica, essa feição única suportará a interpretação. A complexidade desse processo de validação é ainda maior pelo fato de que uma rocha passa por uma seqüência de processos sedimentares e diagenéticos em sua existência. Cada um desses processos imprime seu

registro na amostra. A correta interpretação da amostra necessita identificar que feições estão associadas com determinada interpretação.

Como exemplo, podemos considerar um sedimento que foi depositado e iniciou seu processo de consolidação num ambiente marinho. Um soerguimento da crosta, transformou aquele ambiente expondo a rocha a um ambiente continental com clima seco. Cada um dos ambientes imprimiu suas ações na rocha e minerais e texturas resultantes de diagênese marinha e continental seca coexistem na mesma amostra. A correta interpretação dessa amostra exige a identificação da influência dos dois ambientes, em que ordem elas aconteceram (*seqüência diagenética*, não tratada neste trabalho) e que feições indicam cada um deles. A interpretação aparentemente contraditória da amostra (origem marinha e continental), portanto, *não* identifica um conflito.

A estrutura de esquemas dos modelos mentais preenche o papel de um arcabouço para o processo de inferência, suportando a busca e preenchendo as lacunas onde os dados foram imperfeitamente coletados. A estrutura de esquemas é completada, ainda, por um conjunto de regras gerais do domínio, que serão aplicadas a problemas novos ou desconhecidos na experiência do geólogo. Ao não obter nenhum casamento útil com suas estruturas internas de esquemas, os especialistas fazem uso das regras e de processos de inferência baseados em busca, na tentativa de gerar soluções possíveis ao problema. Nesse caso, seu desempenho cai aos mesmos níveis de intermediários e novatos.

Muitos passos do processo de raciocínio descritos acima permanecem pouco compreendidos. O papel do casamento de pacotes visuais durante as fases iniciais de solução do problema e a seleção dos caminhos de busca dirigida pelos esquemas pode ser facilmente demonstrado durante a coleta de protocolos e experimentos de aquisição de conhecimento. No entanto, o modo no qual a informação pictórica é representada na mente e o processo de comparação com os objetos reais enxergados guarda muitas questões sem resposta. Como o especialista armazena os pacotes visuais de forma a permitir o casamento nebuloso e parcial contra milhares de aspectos levemente distintos vistos no mundo real?

A compreensão do raciocínio aplicado sobre a estrutura de esquemas é ainda mais difícil de ser atingida. É evidente que especialistas aplicam formas estruturadas flexíveis e complexas para representar os objetos do domínio e também para gerenciar todas as variações que o domínio impõe sobre esses objetos. Estas estruturas assemelham-se a esquemas, que mostram-se como um modelo adequado para suportar busca e raciocínio analógico, mas podem ser mesmo mais complexas do que o modelo descrito neste trabalho.

Ao percorrer a estrutura hierárquica que relaciona um objeto a outro através das relações *é-um*, os especialistas são capazes de classificar, com, pelo menos, relativa certeza, qualquer novo objeto que eles encontrem. Além de generalização, outros tipos de relacionamentos são mantidos na mente do especialista agrupando objetos com a mesma origem, tamanho, texturas, uso, etc. Essas relações permitem navegar pelo conjunto das informações associando objetos, usando raciocínio indutivo para inferir novos fatos, resolver conflitos, preencher lacunas do conhecimento e construir soluções onde elas não existiam anteriormente.

O mecanismo de representação de conhecimento e sua aplicação pela inteligência do especialista em domínios complexos são ainda escassamente compreendidos pela Ciência. Poucas fontes de resultados experimentais existem para evidenciar como

geólogos, ou outros profissionais cuja solução de problema tem um forte componente visual, abstraem e organizam o volume de informação visual que eles demonstram possuir. Mais ainda, existem poucas ferramentas de Engenharia de Conhecimento viáveis para eliciar informação pictórica ou ainda objetos associados por muitos tipos diferentes de relacionamentos. A proposição e realização sistemática de novos experimentos associados com ferramentas de aquisição de conhecimento adequadas poderia fornecer uma melhor compreensão de como especialistas utilizam conhecimento com múltiplas formas de representação mental e contendo grande parte de componentes pictóricos.

7.4 Sumário do capítulo 7

Neste capítulo foram discutidos os principais recursos cognitivos aperfeiçoados no processo de aprendizagem e aplicados por geólogos que trabalham com Petrografia Sedimentar na solução de problemas.

No processo de aprendizado, podem ser reconhecidas as seguintes etapas com esperadas variações entre indivíduos:

- Aquisição de conhecimento através de leis e regras gerais do domínio que definem a forma como as ocorrências de rochas acontecem. Neste ponto, os modelos são genéricos e de pouca utilidade na solução de problemas reais;
- Verificação e seleção das regras e modelos aprendidos para construção de um modelo particular do domínio. Aperfeiçoamento dos métodos de aplicação dessas regras e modelos para tornar sua aplicação mais flexível;
- Coleta de casos na forma de problemas reais. Aquisição de uma biblioteca de representações de estímulos visuais - os *pacotes* - associados aos casos;
- Abstração dos casos em uma estrutura de *esquemas*, ou estereótipos de ocorrências de rochas, ambientes e feições geológicas, que substituem as regras na condução da inferência;
- Substituição progressiva do processo de inferência através de busca, por um processo de casamento de padrões simbólicos, com curtos processos de inferência regressiva dirigidos pelos esquemas;
- Desenvolvimento de esquemas cada vez mais complexos e abstratos e de processos de inferência cada vez mais baseados em analogia e casamento de pacotes visuais.

As principais estruturas cognitivas utilizadas para armazenar o conhecimento que suporta a perícia em petrografia são:

- Os conceitos do domínio, representados como estereótipos ou *esquemas*, caracterizados pelos atributos que os identificam e pelos os domínios de valores. São a menor unidade de representação;
- Os esquemas são, por sua vez, organizados em diversas estruturas de generalização/especialização para as diferentes classes de conceitos úteis à inferência, como classes de ambientes deposicionais, de processos, de feições, etc.

- Essas classes são, por sua vez, interligadas ainda por muitos outros tipos de relacionamentos que associam objetos da estrutura através de propriedades diversas, como ser parte de um objeto mais complexo, possuir mesma origem ou mesmo tipo de porosidade;
- Pacotes visuais, que são representações mentais de imagens reais com um significado particular, são associados a atributos de esquemas e servem como gatilhos para esses esquemas no processo de inferência;
- Regras gerais do domínio que complementam o conhecimento quando o problema cai fora dos limites do conhecimento do especialista.

O processo de inferência desenvolvido por especialistas em Petrografia Sedimentar:

- Caracteriza-se por ser um processo imagístico, aplicando primeiramente reconhecimento visual e secundariamente métodos analíticos;
- O reconhecimento visual é baseado no casamento das imagens do domínio com os pacotes visuais associados aos esquemas. O casamento pode ser parcial e complementado por raciocínio analógico, que compensa as diferenças entre as representações mentais e as imagens reais;
- O processo de solução é genericamente de busca progressiva;
- Os pacotes selecionam, ou *disparam*, os esquemas que serão testados como hipóteses e validados em curtos processos regressivos;
- A solução final é construída a partir da ordenação e integração de todas as conclusões parciais obtidas, considerando os índices de significância e suficiência dos pacotes ativados.
- Quanto mais fracamente representado for um problema na mente do geólogo, maior a importância das regras gerais do domínio e dos processos de busca para encontrar a solução.

Especialistas e novatos podem ser diferenciados por :

- Novatos descrevem o domínio utilizando feições perceptuais, como texturas, forma de grão, tipo de contorno, minerais de fácil reconhecimento. Especialistas descrevem o domínio em termos de feições interpretadas diretamente associadas à solução do problema.
- Durante a eliciação do conhecimento, novatos explicitam um caminho de busca de muitos passos utilizando raciocínio progressivo e regressivo combinados a partir das feições perceptuais, inferindo algumas feições interpretadas e, a partir delas, propondo as interpretações possíveis. Especialistas utilizam conhecimento tácito para dirigir a inferência e não são capazes de explicitar o caminho de busca. A inferência reconhecida aparenta ser um simples casamento de padrões com a interpretação geológica associada.
- Novatos justificam suas conclusões utilizando poucos tipos de conhecimento (basicamente, minerais e feições texturais, e regras). Especialistas apresentam um sem número de formas de organização do conhecimento (associações, correlações múltiplas, tabelas progressivas, diagramas triangulares, entre muitas outras) para justificar suas conclusões.

8 Construção do modelo do domínio

Neste capítulo serão detalhados os modelos do domínio para a interpretação diagenética de amostras de rochas siliciclásticas. Aqui serão apresentadas contribuições inéditas à Engenharia de Conhecimento, na forma de novas primitivas de modelagens, como os pacotes visuais e grafos de conhecimento, que prevêm a representação de conhecimento no nível da inferência e também no da externalização. Ainda são propostos primitivas e métodos formais para tratar conhecimento incompleto do domínio, não previstos originalmente na metodologia Common KADS. São originais também as estruturas de inferência aqui propostas (interpretação de ambientes, classificação composicional e, especialmente, reconhecimento de pacotes visuais) que podem ser adaptadas para integrar bibliotecas de métodos de solução de problemas, em especial a última, facilmente reaplicável em outros domínios que aplicam raciocínio baseado em imagens.

O estudo da perícia em Petrografia Sedimentar, cujos resultados são descritos nos Capítulos 6 e 7, proporcionou uma compreensão de como o geólogo aplica seus mecanismos cognitivos para realizar a interpretação genética de amostras de rochas. A automatização desses mecanismos, no entanto, não corresponde uma reprodução pura e simples dos modelos mentais do especialista, mas a adaptação desses modelos às limitações do computador e às necessidades de eficiência do sistema de conhecimento.

O modelo aqui construído busca reproduzir as principais formas de representação de conhecimento aplicadas pelo especialista e evidenciadas neste estudo. As formas estruturadas modeladas são os *pacotes visuais*, as *associações entre pacotes e interpretações geológicas* e os *triângulos de classificação*. Não obstante a multiplicidade de representações, todos os formalismos baseiam-se na unidade de representação que é a unidade *conceito-atributo-valor*.

As principais adaptações entre o modelo cognitivo e o modelo no nível do conhecimento podem ser resumidas por:

- A estrutura de esquemas demonstrada pelo especialista constitui-se numa hierarquia de classes e subclasses de conceitos com inúmeros relacionamentos (além da generalização e especialização) entre eles. Esses conceitos incluem tipos de rochas, de ambientes, feições, minerais e outros distribuídos nas respectivas categorias. Essa estrutura complexamente interrelacionada foi simplificada numa hierarquia de classes de rochas, similar a descrita na literatura especializada. Nos experimentos não foi possível detectar alguma utilidade para essa hierarquia de rochas particular, exceto auxiliar a compreensão do domínio pelos novatos.
- Outros conceitos do domínio (texturas, estruturas, processos, ambientes) foram todos descritos como atributos destas classes. A exceção foi a representação do conceito *constituente mineral* como uma classe independente, devido a sua importância e complexidade.
- A hierarquia de rochas, sinteticamente descrita na Figura 7.4, inicialmente representada no modelo, acabou por ser abstraída na versão final. Apenas uma classe é efetivamente utilizada, a classe das *Sedimentares Clásticas* e representação de suas subclasses não contribuem com a solução de problemas nesta tarefa. O modelo manteve as primitivas para representação da hierarquia de generalização com a única finalidade de suportar uma futura expansão, incluindo as rochas carbonáticas, também importantes como reservatórios de petróleo.

- A classe das Rochas Sedimentares Clásticas, por sua vez, foi representada como uma *agregação* de esquemas. Os esquemas agrupam atributos pelo critério da técnica utilizada para a observação. Assim, a partição *Macroscopia* agrupa os atributos que são coletados através de uma análise a olho nu da amostra, enquanto *Microscopia*, identifica texturas descritas com auxílio do microscópio ótico, e *Totais* representa os minerais descritos com o auxílio da platina de contagem de pontos. Essa partição reflete a forma de trabalho do petrógrafo, permitindo que os atributos relacionados, cujos valores são obtidos num mesmo momento sejam representados juntos no modelo. Esse modelo identifica uma forma inédita de representar o conhecimento geológico, opondo-se a organização hierárquica de tipos de rochas tradicionalmente encontrada na literatura
- Dessa forma, os esquemas cognitivos eliciados do especialista são mapeados neste modelo tanto para *conceitos* como para *atributos*, dependendo apenas das necessidades da inferência do sistema. Unidade sedimentar e bacia sedimentar são assim representadas como atributos da amostra, embora sejam conceitos cognitivos independentes para o especialista.
- Os pacotes visuais que suportam a perícia, identificados e propostos originalmente neste trabalho, são modelados como agregações de feições perceptuais previstas para serem descritas por intermediários ou novatos. O significado particular para a interpretação é atribuído pelo modelo. A diferença de granularidade da informação tratada pelo especialista e por novatos evidenciou o problema de construir inferências sobre informação distintas daquelas buscadas por especialistas ao resolver problemas. O modelo busca explicitamente resolver esse diferença conceitual permitindo utilizar as inferências do especialista sobre informações coletadas por intermediários ou novatos.
- As regras não foram modeladas no sistema, por corresponderem a um conhecimento muito geral do domínio, portanto, pouco operacional. A capacidade humana de lidar com problemas novos e desconhecidos é algo que ainda não pode ser simulado no computador. O sistema é capaz de solucionar problemas no seu domínio de conhecimento: classificação e interpretação de ambiente diagenético de rochas sedimentares clásticas. Problemas fora desse domínio, identificados pelo baixo grau de casamento com o modelo, não terão nenhuma solução proposta pelo sistema.
- Nem todas as informações modeladas na base de conhecimento são efetivamente aplicadas para inferência. Cumprindo o papel de banco de dados, além de sistema de conhecimento, algumas informações da rocha são descritas e armazenadas apenas para serem consultadas posteriormente. Em futuras expansões, essas informações também poderão ser utilizadas para extrair inferências úteis.

Refletindo essas adaptações, o modelo descritivo do domínio pode ser descrito como uma *partonomia*, cujo conceito principal, representado pela agregação, é *Amostra*, o objeto da descrição. A estrutura dessa partonomia tem forte correspondência com o formato de descrição de amostras utilizado pelo especialista. O conhecimento inferencial é descrito como relações entre pacotes visuais e interpretações, descritas através de grafos de conhecimento, e como gráficos triangulares que representam como as proporções de constituintes da rocha definem sua classificação composicional.

Para uma melhor compreensão dos papéis envolvidos na solução de problemas, os modelos serão descritos no nível do conhecimento, segundo a classificação de modelos

proposta na metodologia Common KADS (SCHREIBER et al., 1999). O modelo do conhecimento é descrito em três categorias:

- conhecimento do domínio, que descreve o conhecimento declarativo e inferencial do domínio da aplicação;
- conhecimento de inferência, que descreve as dependências entre os passos básicos de raciocínio que o sistema deve realizar para resolver o problema;
- conhecimento da tarefa, que descreve quais os objetivos que devem ser alcançados, que informações ou conhecimentos devem ser obtidos para alcançá-los e quais inferências devem ser feitas para atingir esses objetivos.

Os *tipos epistemológicos* que constroem o universo dos termos reconhecidos no modelo são os *conceitos do domínio*, *relações* (ambos definidos para a metodologia KADS), *pacotes*, *grafos* e *triângulos* (propostos neste trabalho). Conceitos e relações representam o conhecimento estático do domínio, enquanto grafos e triângulos desempenham o papel de regras e definem como as inferências são obtidas. Pacotes representam uma nova dimensão no nível do conhecimento, como discutido na Seção 5.1.4. A funcionalidade de cada um deles será descrita a seguir, bem como enumeradas as ocorrências desses tipos no domínio.

Outras primitivas definidas neste modelo e não suportadas por KADS são índices de significância e limiares de inferência, que serão detalhadas nas próximas seções.

8.1 O Conhecimento do domínio da aplicação

No modelo do domínio da Petrografia Sedimentar, a base de conhecimento contém instâncias de constituintes minerais, de grafos de conhecimento (que incluem pacotes) e de triângulos de classificação composicional.

8.1.1 Conceitos do domínio da aplicação

Representam conjuntos de objetos ou entidades do domínio, ou ainda instâncias destes objetos, que compartilham de características similares. (Correspondem a objetos do modelo orientado a objeto, ou às entidades do modelo relacional). Podem representar objetos concretos do domínio, como um mineral, ou abstratos, como uma interpretação de uma rocha. Os conceitos extraídos no processo de aquisição de conhecimento podem ser:

- *atômicos*, que não admitem decomposição em outros conceitos.
- *compostos*, construídos pela agregação, ou associação de conjunto ou associação por outros tipos de relações de conceitos primitivos.

As características dos conceitos são definidas através de *atributos* associados ao conceito. Um atributo possui um valor de um tipo pré-definido e muitas vezes selecionado de um conjunto de valores pré-determinados. Os valores dos atributos são definidos através da *nomenclatura* do domínio. Quando não explicitamente definida, a cardinalidade dos atributos é de 0 ou 1, embora alguns atributos particulares tenham outras cardinalidades definidas no modelo.

Os atributos dos conceitos têm tipos pré-definidos. Este modelo suporta os tipos:

- *real*, um valor numérico qualquer, como a profundidade de um poço de exploração;

- numérico, dado em percentuais, como nos percentuais dos minerais de uma rocha;
- imagens, em formato bitmap;
- cadeias de caracteres, para nomes de unidades, de locais, etc.;
- simbólicos, que possuem valores simbólicos previamente definidos e descritos na Nomenclatura do modelo. São referenciados no modelo pelas primitivas *um-de* quando apenas um dos valores definidos é aceito, ou *lista-de*, quando mais de um valor é aceito;
- derivados, construídos pela agregação, ou associação de conjunto ou associação por outros tipos de relações de tipos primitivos;
- informais, que são apresentados textualmente, cujo significado e semântica não são tratadas, até o momento, no modelo. O tipos informais devem evoluir para tipos derivados com o desenvolvimento do modelo.

8.1.2 Relações

Expressam os relacionamentos estáticos entre os conceitos do modelo. As relações são definidas através de seu nome e de sua cardinalidade. No modelo, as relações não possuem atributos, apenas associam conceitos com semântica própria e são utilizadas como primitivas para a construção de estruturas de representação mais complexas que suportam a inferência. As relações do modelo utilizadas para inferência são parte-de, forma, restringe, adiciona, implica e *fica-em*. A Figura 8.1 apresenta esquematicamente os conceitos do domínio para Petrografia Sedimentar e a forma como esses conceitos ser relacionam para suportar a inferência. Na figura, os retângulos representam os conceitos, enquanto os arcos representam as relações entre esses conceitos, com a respectiva cardinalidade da relação. A descrição de todos os conceitos do domínio, de seus atributos e domínios de atributos, e a semântica das relações são apresentados no Anexo 4, que descreve o modelo do domínio.

8.1.3 Grafos de conhecimento

A proposta deste trabalho de utilizar grafos de conhecimento como um modelo no nível do conhecimento evoluiu a partir da ferramenta proposta por (LEÃO, 1988) para eliciação de conhecimento de especialistas em Cardiologia.

Os grafos de conhecimento são árvores que representam graficamente as associações entre as feições geológicas e respectivas interpretações diagenéticas. Mais exatamente, neste modelo, grafos representam relações de implicação entre instâncias de um tipo particular de conceito, o *pacote visual*, e uma única instância de outro conceito, interpretação (Figura 8.2). Os pacotes correspondem às feições geológicas no nível da inferência, enquanto as feições descritas na ontologia do domínio estão no nível de externalização. Cada pacote visual representado no grafo é rotulado por um peso que quantifica o quanto aquele pacote influencia na confirmação da interpretação associada. Os grafos representam, no modelo, o papel de regras, que orientam as inferências possíveis do sistema, porém representam as informações de forma mais estruturada. A semântica de um único grafo, se fosse representado através de regras exigiria mais de 20 regras para ser representada.

Conceitos e Relacionamentos do Modelo do Domínio em Petrografia Sedimentar

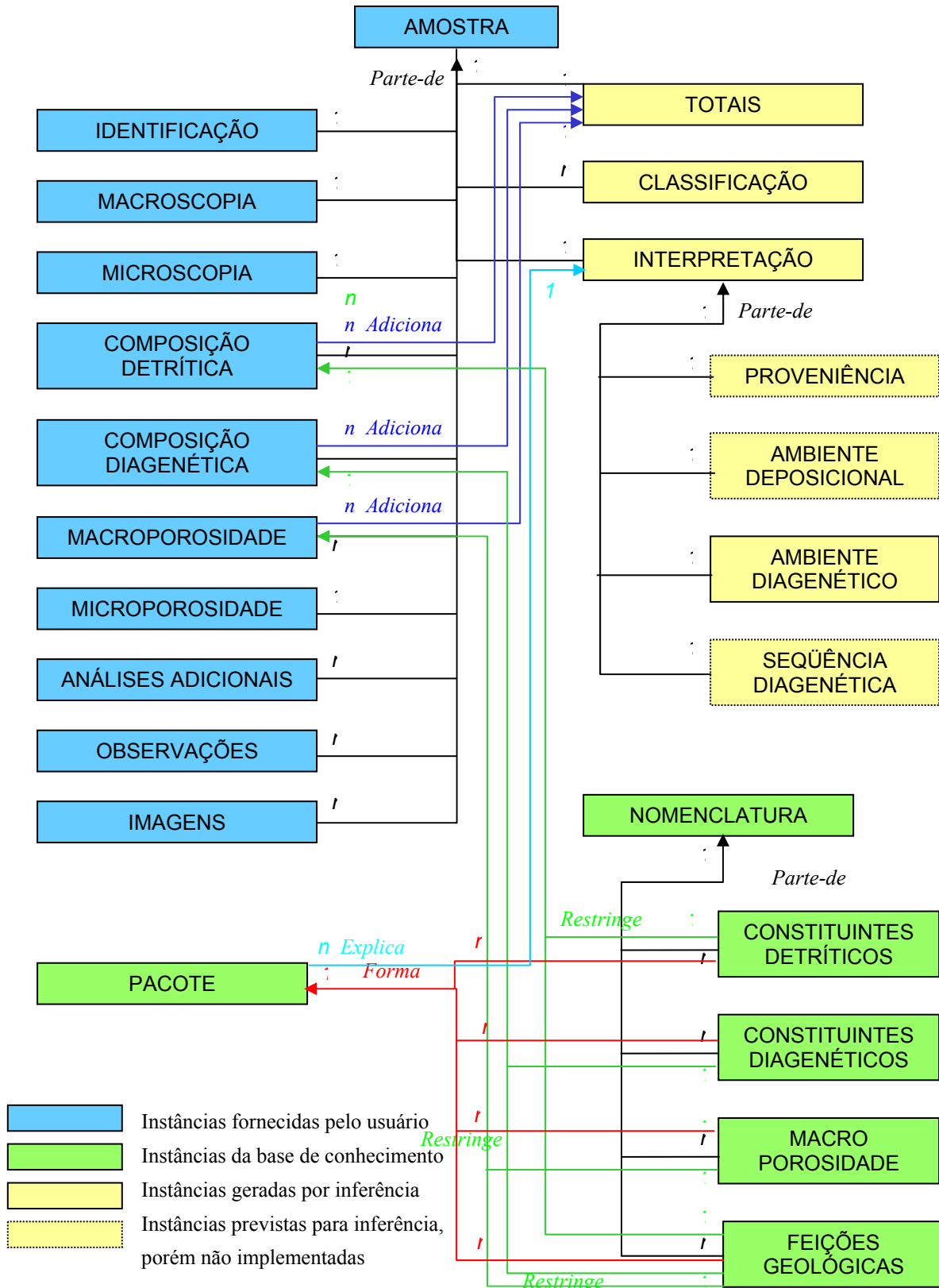


FIGURA 8.1 Modelo do conhecimento para Petrografia Sedimentar.

Um grafo é composto por:

- uma interpretação associada à raiz;
- um limiar que define um mínimo de informação encontrada para confirmar a interpretação;
- um conjunto de nós intermediários, todos no primeiro nível, que representam os pacotes visuais;
- um peso que rotula cada pacote e que indica o índice de influência da presença daquele pacote em uma possível interpretação;
- um conjunto de instâncias de feições geológicas combinadas que, juntas, identificam um pacote, representadas como subárvores de cada pacote visual no grafo.

Os pesos associados a cada evidência variam de 1 a 6 e crescem não linearmente. Neste intervalo, o especialista utilizou apenas os valores 1, 3, 5 e 6 como representativo das influências dos pacotes sobre as interpretações. Não é possível afirmar que o mesmo especialista utilizaria esse intervalo e esses valores em outra tarefa. Tampouco é provável supor que outro especialista utilize a mesma escala.

1 = possivelmente conclusão é verdadeira;

3 = provavelmente conclusão é verdadeira;

5 = muito provavelmente conclusão é verdadeira;

6 = certamente conclusão é verdadeira.

Grafos do Modelo do Domínio da Petrografia Sedimentar

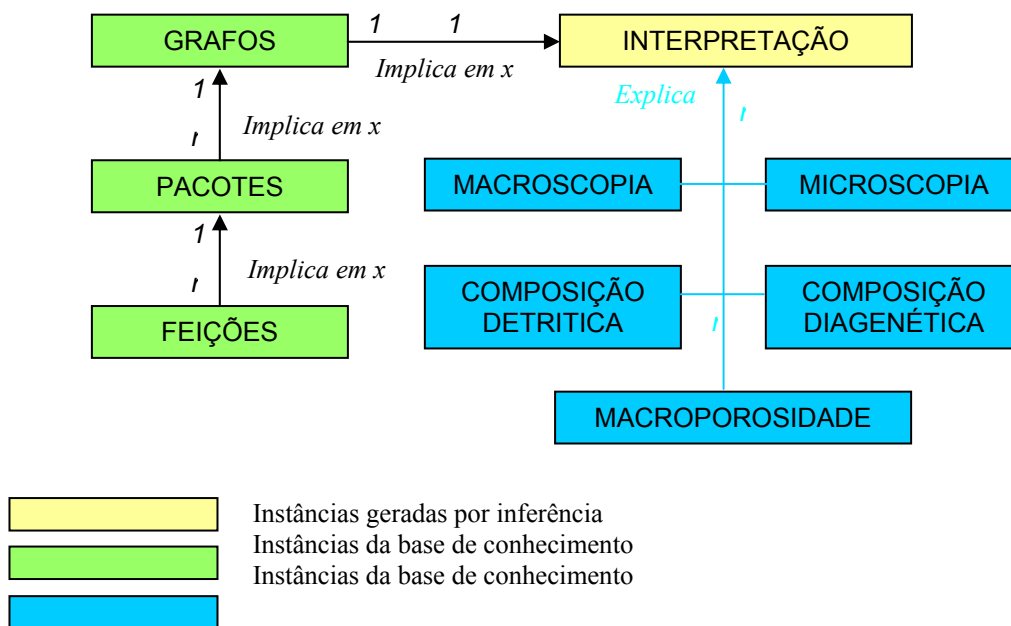


FIGURA 8.2 - Relações de implicação entre pacotes visuais e interpretações representadas em grafos de conhecimento.

Uma conclusão será verdadeira se o peso das evidências comprovadas for igual ou maior do que 6. Poucas feições são diagnósticas o suficiente para indicar um ambiente de forma isolada. Normalmente, duas ou mais feições são exigidas para identificar um ambiente diagenético.

Esse limiar foi proposto pelo especialista através de múltiplas simulações sobre as feições modeladas verificando quais as conclusões possíveis de serem atingidas. Essa forma empírica de definir o tratamento numérico sobre coeficientes de influência foi também observada em (ABEL, 1988), onde um especialista em ambientes sedimentares definiu o mínimo de feições aceitáveis para identificar depósitos turbidíticos. Nada na forma de definir os limiares permite afirmar que outros grafos de conhecimento utilizariam os mesmos limiares, ou que outro especialista não proporia escalas numéricas distintas. Um estudo mais aprofundado da forma de associar evidências poderia expor o método de solução de problemas comum nessa forma de raciocínio.

A Figura 8.3 detalha a estrutura interna de um grafo de conhecimento. Em 8.3 (a) são apresentadas as relações de implicação entre pacotes e respectivos pesos com a interpretação. Cada um dos pacotes (que recebeu um nome genérico do principal constituinte envolvido na feição) indica a interpretação associada ao grafo.

Cada um dos pacotes, por sua vez, está associado a uma agregação de instâncias de feições geológicas por relações de mesmo tipo (Figura 8.3 (b)). As feições são combinadas através de conectivos lógicos para construir os pacotes visuais. Cada instância de uma feição corresponde a um conceito e um atributo com valor (ou valores) definido (Figura 8.3 (c)).

Esse grafo poderia ser interpretado como:

A presença de caolin com hábito lamelar ou booklet ou vermicular (ou todos) preenchendo poros entre os grãos indica ambiente diagenético continental úmido.

Esse pacote corresponde à instância do conceito Composição Diagenética, com o atributo Nome do Mineral = caolin, o atributo Hábito = lamelar ou Habito = booklet ou Hábito = vermicular e o atributo Localização = preenchimento de poros entre os grãos.

8.1.4 Triângulos

Da mesma forma que os grafos, os triângulos são construtores que representam relações entre instâncias do conceito totais com instâncias de classificação, como apresentado na Figura 8.4. A semântica da relação representada nos triângulos é mais complexa do que uma relação de implicação, uma vez que considera as diferentes proporções numéricas dos atributos das instâncias na definição da classificação. O tipo triângulo modela métodos de classificação composicional de arenitos, como os descritos em (TUCKER, 1991).

Um triângulo é construído a partir de três vértices e um conjunto de polígonos. Os vértices representam a quantidade de um determinado constituinte na rocha, ou o somatório das quantidades de um conjunto de constituintes, previamente definido para cada método de classificação composicional. Os polígonos são definidos por 3, 4 ou 5 pontos internos ao triângulo e representam a classe (ou nome) da rocha. Os polígonos são disjuntos e o somatório das suas áreas deve ser igual a área do triângulo. Tanto os constituintes, representados nos vértices do triângulo, como os polígonos são definidos de acordo com o método de classificação escolhido.

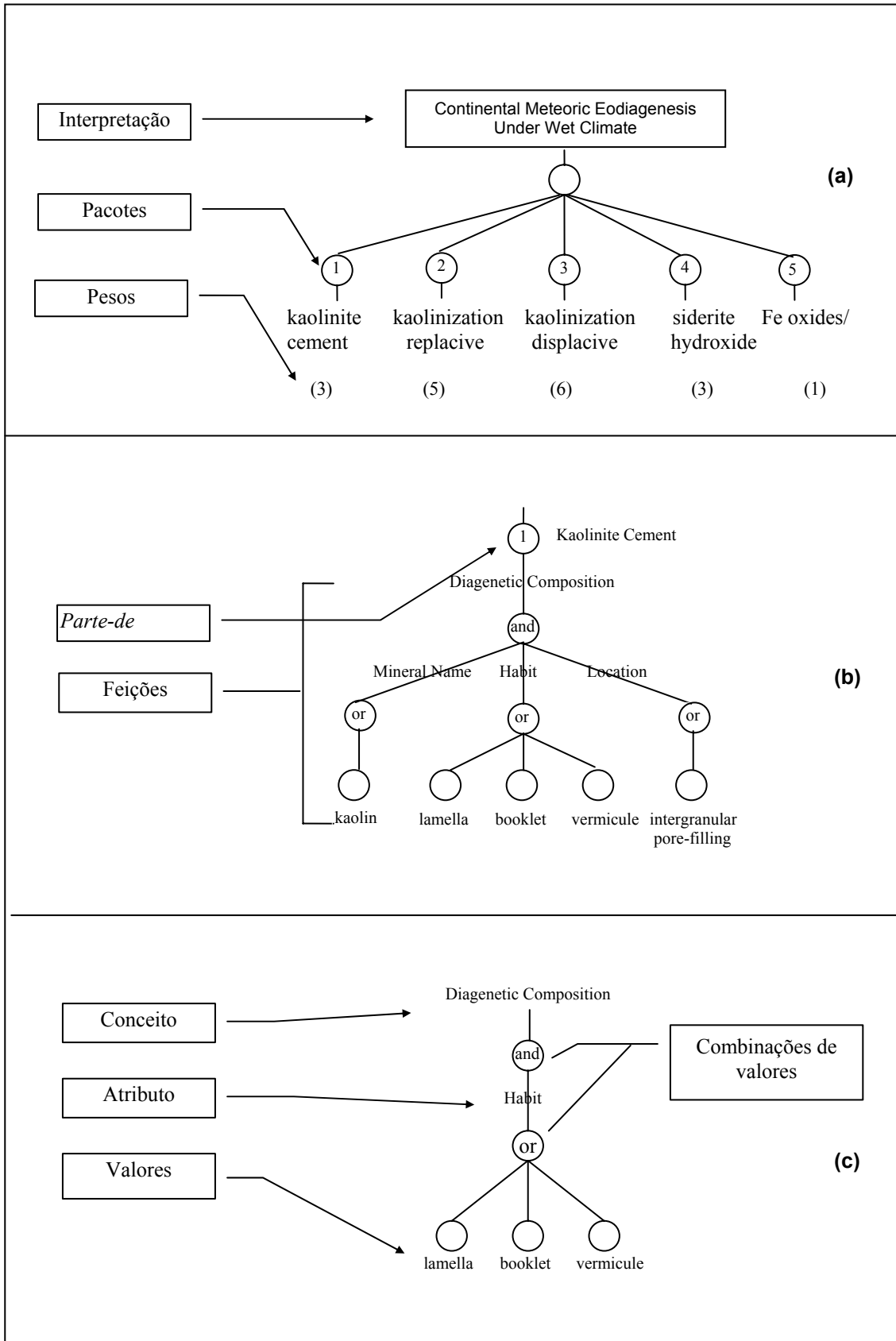


FIGURA 8.3 - Morfologia dos grafos de conhecimento da base de conhecimento de Petrografia Sedimentar.

Triângulos do Modelo do Domínio da Petrografia Sedimentar

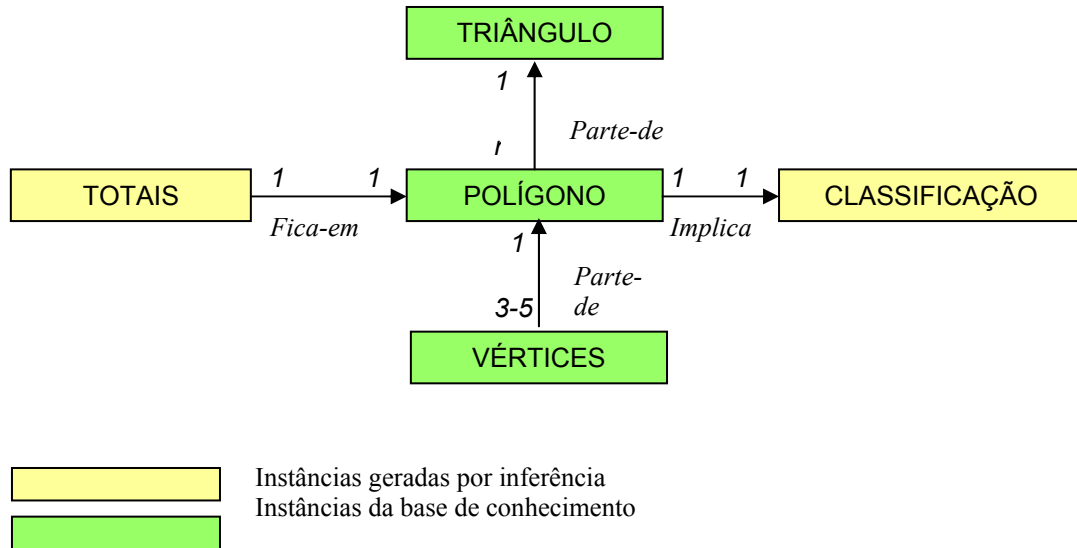


FIGURA 8.4 – Modelo das relações de implicação entre os conceitos Totais e Classificação representadas em triângulos de classificação.

O exemplo a seguir descreve um triângulo de classificação que representa o método de classificação de McBride (MCBRIDE, 1963). Numa determinada amostra, para os constituintes detríticos foram quantificados 10% de fragmentos de rochas, 55% de quartzo, chert e quartzito e 35% de feldspatos, proporções estas que estão representadas pelas linhas tracejadas na Figura 8.5 (extraído de (MCBRIDE, 1963)).

O ponto de cruzamento das linhas indicativas das proporções minerais define a classe da rocha. No exemplo da 8.5, para a classificação de McBride, essa rocha seria um Arcósio Lítico, uma vez que a proporção de seus minerais foi posicionada dentro do polígono correspondente a essa classe.

A base de conhecimento possui, até o momento, seis instâncias de triângulos, cada uma delas representando um método de classificação. São elas:

Classificação composicional de Dickinson (DICKINSON, 1970);

Classificação composicional original de Dickinson;

Classificação composicional de Folk (FOLK, 1974);

Classificação composicional original de Folk;

Classificação composicional de McBride (MCBRIDE, 1963);

Classificação composicional original de McBride.

A classificação pela composição original da rocha utiliza os constituintes minerais originados do processo de deposição da rocha, antes da geração dos minerais diagenéticos e da porosidade secundária. Essa composição original é determinada por

adicionar os minerais de substituição e determinados tipos de porosidade aos constituintes detríticos da rocha. A determinação de quais minerais e poros eram originalmente minerais detríticos é feita de acordo com o conhecimento do especialista.

Triângulos de Classificação Composicional de Arenitos

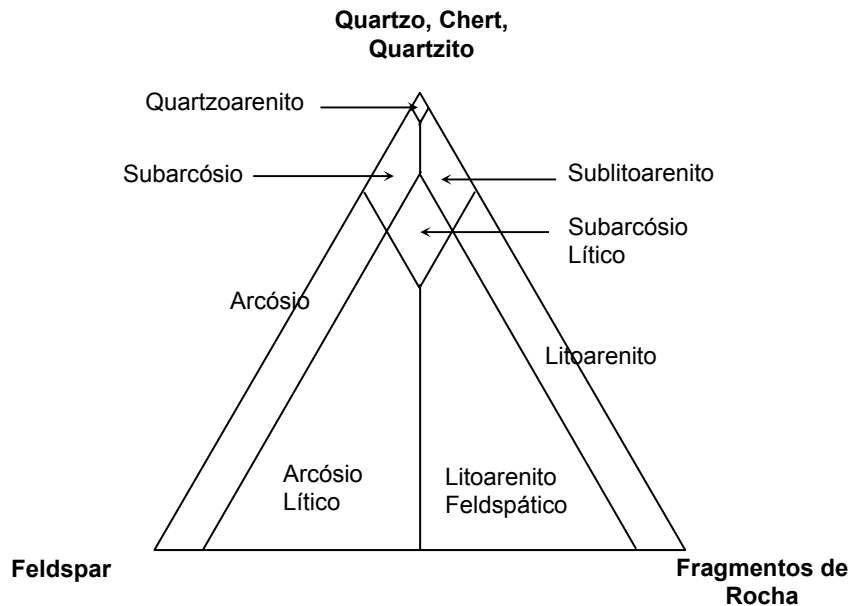


FIGURA 8.5 - Triângulo de classificação composicional de arenitos segundo McBride.

8.2 Conhecimento de inferência da aplicação

Os conceitos, relações, grafos e triângulos descritos nas seções anteriores representam o conhecimento declarativo do domínio da Petrografia Sedimentar, ou seja, o quê são as coisas, como elas se relacionam ou influenciam umas às outras. Este conhecimento do domínio é descrito como uma estrutura de informação ou conhecimento estático da aplicação, ou ainda, como a ontologia do domínio. Já o conhecimento de inferência descreve como essas estruturas estáticas devem ser utilizadas para suportar o processo de raciocínio.

O reconhecimento de quais são e como são os mecanismos de inferência humanos utilizados durante a solução de problemas é um processo mais complexo do que a identificação de quais conceitos ou relações de dependência são utilizados durante o raciocínio. Quanto maior o nível da perícia, mais direto e também mais obscuro parece ser o método de inferência. Em um domínio que aplica inferência predominantemente baseada em imagens, como é o da Petrografia, muitos componentes do processo cognitivo que suporta a inferência simplesmente não podem ser reproduzidos e permanecem ainda pouco compreendidos.

Entre esses componentes, a habilidade criativa que permite combinar os estímulos visuais das mais diferentes granularidades e maneiras, até obter pacotes visuais significativos, são das mais intrigantes. Esse processo é representado esquematicamente na estrutura de inferência da Figura 8.6, embora não seja viável de ser implementado. A limitação não se refere à combinação das partes das informações, mas sim às sucessivas seleções e combinações, com ajustes de granularidade, feitas sobre as informações possíveis de serem adquiridas em uma amostra de rocha. Nenhuma interface de sistema conhecida até o momento permitiria tal flexibilidade na entrada de dados.

Modelo da Inferência do Especialista para o Reconhecimento de Pacotes Visuais

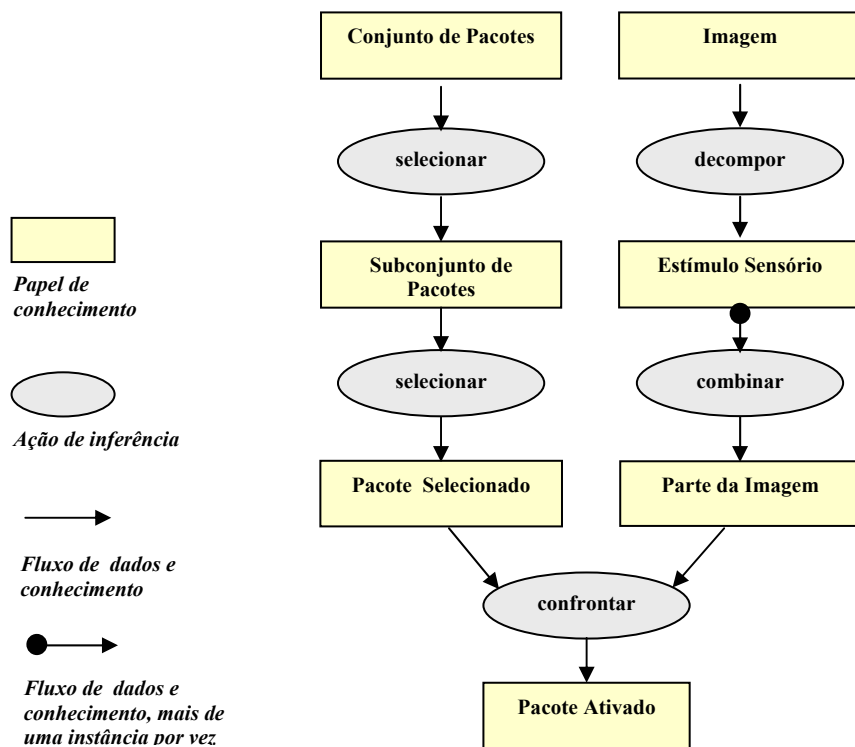


FIGURA 8.6 - Estrutura de inferência para o reconhecimento de pacotes visuais.

Da totalidade dos processos de raciocínio do especialista identificados no processo de aquisição de conhecimento e descritos no Capítulo 6, foram modelados para implementação apenas duas tarefas: a classificação composicional da rocha e a interpretação do ambiente diagenético que a gerou. A classificação composicional é obtida por um raciocínio simples de classificação contra as normas da classe, seguido de especificação. Esse mesmo raciocínio é utilizado para determinar a proveniência dos sedimentos da rocha. Já a forma de inferência aplicada para a interpretação de ambiente diagenético, detalhada a seguir, deverá suportar também outras tarefas de descrição petrográfica

8.2.1 A interpretação de ambiente diagenético

A estrutura de inferência para interpretação de ambiente diagenético a partir de um caso é apresentado na Figura 8.7. A estrutura geral de inferência pode ser comparada a estrutura de avaliação¹² apresentada por (SCHREIBER et al., 1999), uma vez que, em ambas as estruturas de inferência, um caso é confrontado com um conjunto de normas para determinar uma solução. Nessa aplicação, as normas são fornecidas pelas associações entre pacotes visuais e seus significados particulares e os ambientes deposicionais que os geraram. Essas associações estão representadas no modelo através dos grafos de conhecimento. Além de representar o modelo causal que dirige a inferência, os grafos também ajustam a granularidade das informações, agrupando-as e dando-lhes significado.

A inferência descrita na Figura 8.7 é disparada por opção do usuário. Um caso já descrito e armazenado é o objeto da interpretação (8.7(a)). Feições geológicas descritas são selecionadas de acordo com os grafos de conhecimento do modelo do domínio (8.7(b)). O conjunto de grafos de conhecimento assume o papel de normas na inferência. Cada um dos grafos é selecionado (8.7(c)) e decomposto (8.7(d)) em pacotes, que correspondem as premissas das normas. Cada um dos pacotes que compõe um grafo é selecionado por vez (8.7(e)) para comparação. Esse pacote é decomposto em feições geológicas (8.7(f)) para ajustar a granularidade da informação àquela descrita pelo usuário. As feições descritas pelo usuário e representadas pelos grafos são então sucessivamente comparadas (8.7(g)). Se o conjunto de feições geológicas comparadas com sucesso com a amostra do usuário for maior do que o limiar exigido para validar o grafo (8.7(h)), então a interpretação associada ao grafo é confirmada (8.7(i)).

A Figura 8.8 detalha o método de comparação entre pacotes e feições descritas pelo usuário, evidenciando a forma de tratamento de incerteza através da comparação de valores alternativos de feições geológica e atribuição de pesos aos pacotes.

Nos grafos de conhecimento, os pares conceito-atributo estão associados a todos os valores alternativos aceitáveis para aquela interpretação de ambiente, como demonstrado na Figura 8.3 (b) e (c). Esses valores são selecionados e comparados com os valores descritos pelo usuário para aquela feição geológica (Figura 8.8 (a)). As feições geológicas confrontadas positivamente são combinadas (Figura 8.8 (b)) de modo a confirmar se o conjunto das feições identifica ou não um pacote visual. Embora sejam admitidos valores alternativos para cada uma das feições (descritos por um nodo OR nos grafos de conhecimento), todas as feições (como *nome do mineral*, *hábito* ou *localização*, por exemplo) associadas a cada um dos pacotes por um nodo AND devem ser identificadas. Ou seja, ou um pacote é identificado positivamente ou, mesmo pela ausência de uma única feição, ele não está presente. Se o pacote for identificado, seu peso é acrescentado ao valor do grafo (Figura 8.8 (c)). Se a soma dos pacotes identificados superar o *Limiar* definido pelo especialista o grafo é validado e o ambiente associado é acrescentado à interpretação final (Figura 8.8 (d)).

A confiabilidade da conclusão será tanto maior quanto maior o número de pacotes de identificados, porém nem sempre isso é verdade. Os pacotes podem indicar as variações de composição original da rocha quando submetida a um determinado ambiente diagenético, sendo assim, auto-exclusivos.

¹² *Assessment* no original em Língua Inglesa.

Estrutura de Inferência para Interpretação de Ambiente Diagenético

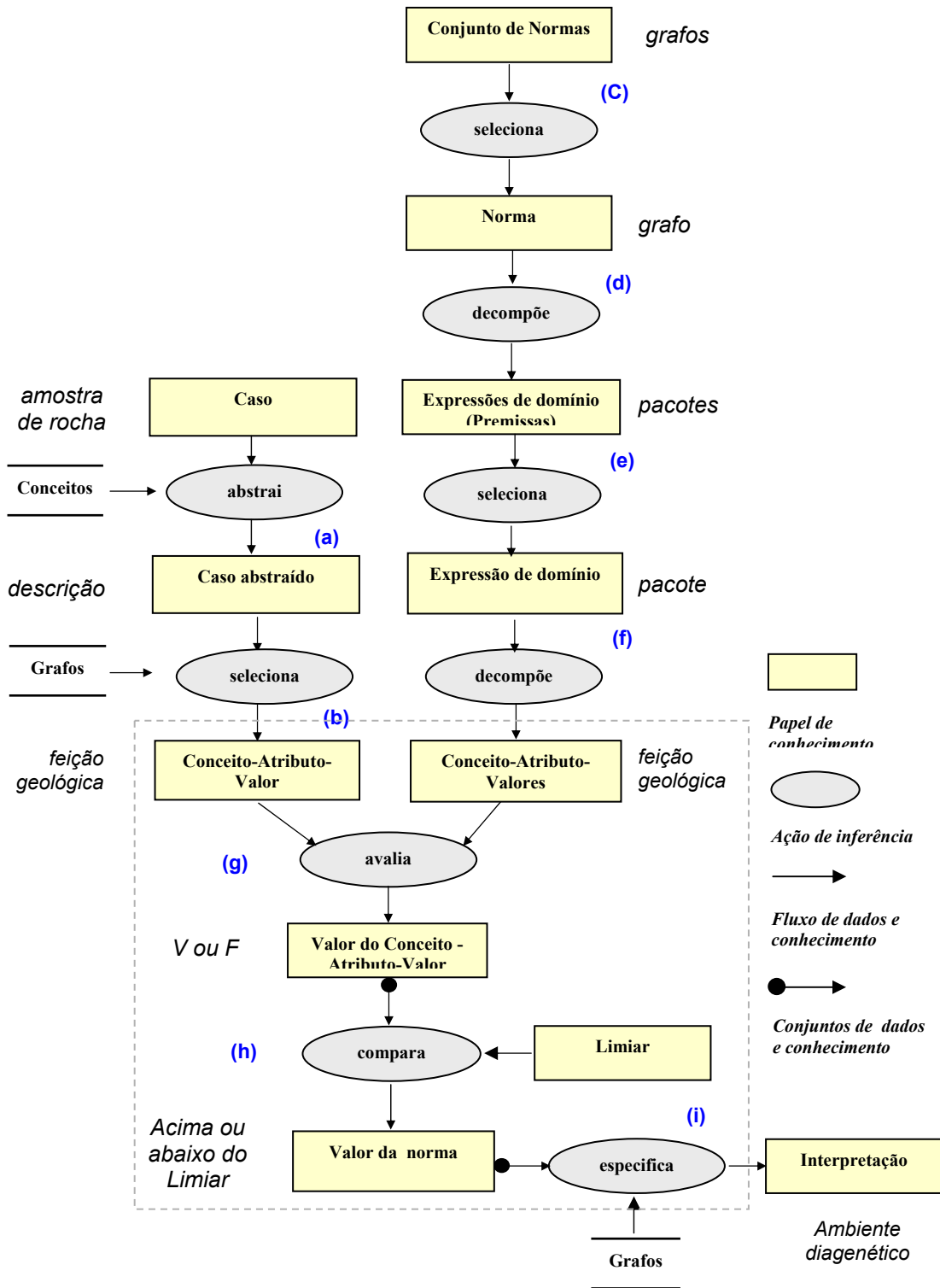


FIGURA 8.7 - Estrutura de inferência da interpretação de ambiente diagenético dirigido por grafos de inferência.

Avaliação dos Pesos dos Grafos de Conhecimento

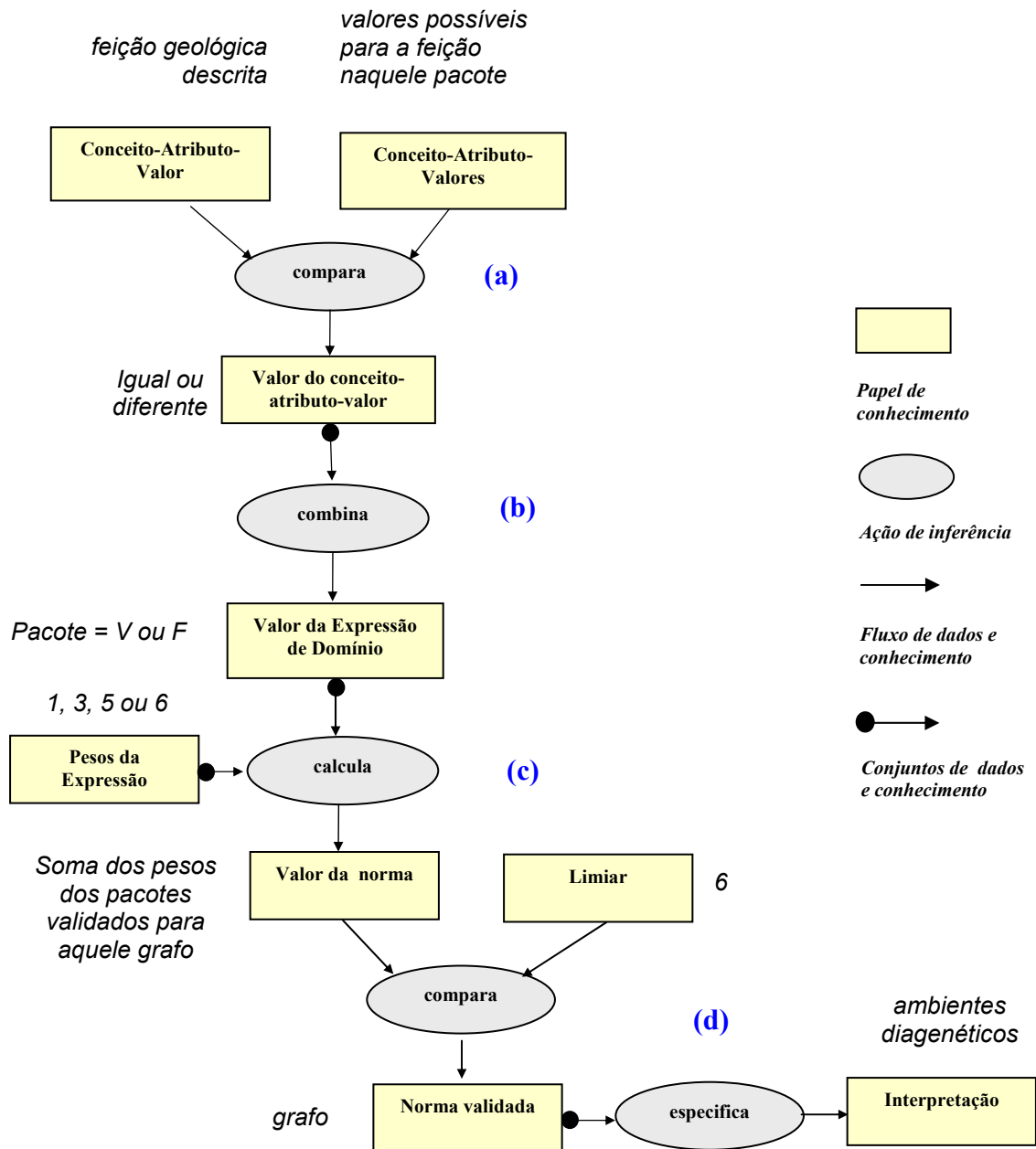


FIGURA 8.8 - Estrutura de inferência para o tratamento de incerteza por valores alternativos e pesos associados a pacotes visuais.

No exemplo da Figura 8.3, por exemplo, a caulinição dos pacotes de 1 a 3 poderia indicar o efeito das condições químicas do ambiente diagenético sobre uma rocha carbonática, enquanto a siderita e ferro dos pacotes 4 e 5, indicariam o efeito das mesmas condições sobre uma rocha originalmente mais férrea. Neste caso, não é esperado que a natureza coloque todos os pacotes visuais indicativos do mesmo ambiente na mesma rocha. Mesmo com essa limitação, o reconhecimento de um maior

número de pacotes (em torno de 2 ou 3) de um grafo em uma amostra descrita é utilizado neste modelo como uma medida de confiabilidade.

No entanto, uma medida de confiabilidade mais adequada para a interpretação de uma única amostra poderia ser indicada pela quantidade de *instâncias* de um pacote encontrados na amostra. Ou seja, se aparecer muita caulinição em uma amostra descrita, é provável que o ambiente diagenético seja do tipo Continental Úmido. Porém, embora os *constituintes* sejam quantificados através do Contador de Pontos, os *pacotes visuais* não o são, não sendo possível utilizá-los para cálculo de confiabilidade da conclusão, até o momento.

De fato, uma medida real de confiabilidade da interpretação suportada pelo modelo do domínio poderia ser obtida pela avaliação de um conjunto de amostras vindas de uma mesma unidade sedimentar. Como o ambiente diagenético é dominante em grandes extensões geográficas, é esperado que as amostras obtidas em uma mesma unidade apresentem respostas a esse ambiente para qualquer composição original. Assim, se diversas amostras de mesma unidade obtiverem um bom casamento com um determinado grafo de conhecimento, a confiabilidade desta conclusão deverá aumentar. Essa funcionalidade foi prevista como requisito da aplicação e será contemplada na expansão deste modelo.

8.2.2 A classificação composicional baseada em diagramas triangulares

Os diagramas triangulares dirigem a inferência de classificação composicional por definirem um segundo nível de abstração (Figura 8.9 (a)) sobre os dados descritos pelo usuário. Essa abstração seleciona diferentes constituintes minerais dos dados das amostras de acordo com cada método representado nos modelos (McBride (MCBRIDE, 1963), Folk (FOLK, 1974), etc.) e seus vértices. Esses constituintes serão adicionados e comporão as instâncias do conceito TOTAIS de cada amostra. Os TOTAIS são classificados (Figura 8.9 (b)) de acordo com a posição que eles ocupam no triângulo do método, definindo o polígono interno ao triângulo que, por sua vez, especifica a classe da rocha (Figura 8.9 (c)) através das associações definidas na ontologia do domínio (os conceitos do domínio que definem os triângulos são representados na Figura 8.4)

8.3 Conhecimento da tarefa da aplicação

A seguir, é detalhado o conhecimento da tarefa para as estruturas de inferência de interpretação de ambiente diagenético e de classificação composicional descritas anteriormente. A convenção de descrição utilizada é a da metodologia KADS, descrita em (SCHREIBER et al., 1999).

O conhecimento da tarefa permite operacionalizar descrições de domínio e de inferência, determinando a seqüência de execuções necessárias para atingir os objetivos propostos na tarefa e associando essas execuções com os *papéis* de conhecimento (conceitos ou instâncias do modelo) necessários.

Inferência para Classificação Composicional baseada em Diagramas Triangulares

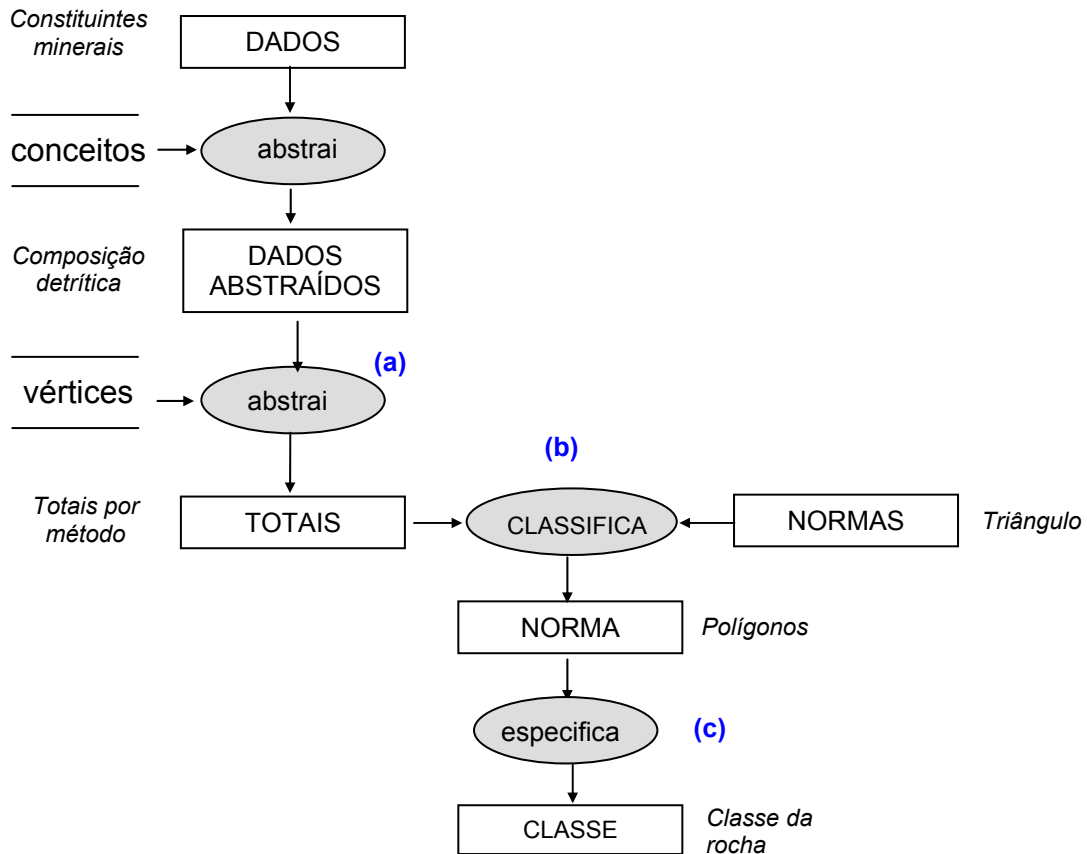


FIGURA 8.9 - Estrutura de inferência para classificação composicional das amostras de rocha baseada em diagramas triangulares.

A interpretação de ambiente diagenético é produzida por geração e teste (Figura 8.10). Os dados da amostra são comparados sucessivamente a cada um dos grafos e, em cada um dos grafos, a cada um dos pacotes. O processo é não determinístico. Dependendo das feições que o usuário decidiu descrever, o sistema vai comparar sucessivamente com as respectivas feições descritas nos pacotes dos grafos, cortando a busca sempre que for possível descartar um pacote. A conclusão final é definida pelo conjunto das interpretações associadas aos grafos validados. Nenhuma interpretação é excluída ou modificada pela confirmação de outras interpretações.

A especificação da tarefa é apresentada na Figura 8.10:

```

TAREFA interpretação de ambiente diagenético por geração e teste;
PAPEIS:
    ENTRADA: caso: "Amostra a ser interpretada"; ;
             conjunto de normas: "Grafos de conhecimento"
    SAIDA: interpretação: "Lista de ambientes diagenéticos";
FIM TAREFA avaliação;

MÉTODO DA TAREFA interpretação por encadeamento progressivo;
REALIZA: interpretação;
DECOMPOSIÇÃO:
    INFERENCIAS : abstrai, seleciona, avalia, decompõe, especifica, compara;
PAPEIS:
    INTERMEDIÁRIOS:
    caso-abstraido: "Dados da amostra selecionados pela interface"
    conceito-atributo-valor: ""Feições geológicas"
    conjunto de normas: "Conjunto dos grafos de conhecimento
    norma: "Grafo selecionado para avaliação"
    expressões de domínio: "Pacotes visuais"
    expressão de domínio: "Pacote selecionado para comparação"
    pesos da expressão de domínio: "Peso do pacote no grafo"
    valor do conceito-atributo-valor: "Feição encontrada ou não encontrada"
    valor da expressão de domínio: "Pacote encontrado ou não encontrado"
    valor da norma: "Grafo validado ou não validado"
ESTRUTURA DE CONTROLE:
    abstrai (caso -> caso abstraído)
ENQUANTO TEM-GRAFOS
DO
    seleciona ( conjunto normas -> norma);
    decompõe (norma -> expressões de domínio);
ENQUANTO TEM-PACOTES
DO
    seleciona (expressões de domínio -> expressão de domínio);
    decompõe (expressão de domínio -> conjunto de conceito-atributo-valor)
ENQUANTO valor do conceito-atributo-valor <> falso
DO
    seleciona (conjunto de conceito-atributo-valor -> conceito-atributo-valor)
    seleciona (caso abstraído -> conceito-atributo-valor)
    se conceito-atributo-valor <> nulo; "Usuário descreveu a feição
        geológica"
    então decompõe (conceito-atributo-valor -> valores)
        valor do conceito atributo valor := compara (valor = valores) ;
    valor da expressão de domínio := valor do conceito atributo valor ;
    calcula (valor norma := soma (pesos das expressões de domínio) );
    se valor norma > limiar
        então especifica (interpretação := conclusão da norma)
    FIM ENQUANTO
    FIM ENQUANTO
    FIM ENQUANTO
FIM METODO DA TAREFA interpretação por encadeamento progressivo.

```

FIGURA 8.10 - Descrição da tarefa de interpretação de ambiente diagenético.

A determinação da classe composicional é um processo determinístico (Figura 8.11). Os constituintes quantificados na descrição são agrupados de acordo com o método de classificação composicional escolhido pelo usuário e classificados de acordo com as

normas desse método. A norma (ou polígono) identificada como contendo a composição da rocha especifica qual o nome da classe.

Em ambos métodos das tarefas, não existe funções de transferência, refletindo a ausência de intervenção do usuário durante o processo de inferência. De fato, uma vez que a descrição da amostra foi obtida, a inferência é disparada uma única vez sobre a descrição já armazenada. O resultado dessa inferência é associado à amostra, juntamente com as feições que a justificam.

```

TAREFA "classificação baseada em diagramas triangulares"
  PAPEIS:
    ENTRADA: dados "Dados quantitativos da amostra";
             normas "Triângulos de classificação";
    SAIDA: classe : "Classe composicional da rocha";
  FIM TAREFA classificação;

    totais: "Dados adicionados de acordo com os vértices"
  MÉTODO DA TAREFA classificação por raciocínio progressivo;
  REALIZA: classificação composicional;
  DECOMPOSIÇÃO:
    INFERENCIAS : abstrai, classifica, especifica;
  PAPEIS:
    INTERMEDIÁRIOS:
      dados abstraídos: "Dados quantitativos da amostra selecionados pela interface"
normas: "Triângulo que modela o método de classificação composicional"
norma: "Polígono onde o composição da rocha se localiza no triângulo"
classe: "Classe composicional da rocha"
ESTRUTURA DE CONTROLE:
  abstrai (dados -> dados abstraídos);
  abstrai (dados abstraídos -> totais);
  classifica (totais + normas -> norma);
  especifica (norma -> classe);
FIM MÉTODO DA TAREFA.

```

FIGURA 8.11 - Descrição da tarefa de classificação composicional de rochas sedimentares clásticas.

8.4 Suposições e competência do modelo de inferência

O método de inferência aqui proposto parte de um conjunto de suposições sobre o conhecimento do domínio e a utilização desse conhecimento por um sistema. Essas suposições influenciaram as decisões de modelagem e, portanto, serão aqui descritas.

8.4.1 Suposições sobre o modelo do conhecimento

- O método de inferência do sistema pode ser considerado um método bem informado. Praticamente cada um dos passos de inferência definido demanda conhecimento de domínio para funcionar.
- O modelo foi construído pressupondo a reusabilidade do conhecimento descritivo e também do métodos de solução de problemas em outras tarefas. Para isso, o modelo

do conhecimento descritivo contém muito mais informação do que a necessária para a classificação composicional e interpretação de ambiente diagenético, que são os objetivos das tarefas modeladas. Esse modelo deve suportar outros tipos de correlações geológicas de interesse à caracterização de um reservatório de petróleo. Por outro lado, as estruturas de inferência propostas para extrair conclusões de grafos de conhecimento e triângulos, devem suportar também outros modelos de classificação e interpretações para rochas siliciclásticas.

- Todos os ambientes diagenéticos existentes estão representados nos grafos de conhecimento. Sendo assim, não existe conhecimento usado pelo método de raciocínio que não está expresso e disponível no modelo do conhecimento.
- Os pacotes visuais descritos nos grafos de conhecimento, no entanto, representam adequadamente apenas rochas de composição siliciclástica, ou seja, cujos constituintes formadores de rocha são principalmente quartzo, feldspato e fragmentos de rochas siliciclásticas, que compõem mais de 90% das rochas sedimentares clásticas do planeta. Rochas com composições exóticas, resultados de proveniência ou ambientes deposicionais incomuns são corretamente classificadas pelo sistema, porém a interpretação de seus ambientes diagenéticos é prejudicada pelo grande controle que os grãos não-siliciclásticos e altamente reativos imprimem sobre os processos diagenéticos (e.g., arenitos constituídos por fragmentos de rochas carbonáticas, ou evaporíticas), e não é adequadamente representada no modelo.
- A estrutura de inferência foi construída para derivar conclusões para entradas de informações realizadas pelo usuário de forma *completa*. O modelo da interface, no entanto, possui uma suposição diferente, permitindo que o usuário descreva as amostras de forma apenas parcial e simplificada. *Se os dados das amostras foram descritos de forma incompleta, o sistema pode não encontrar interpretação aplicável à amostra.*
- A estrutura de inferência foi construída para derivar conclusões para entradas de informações realizadas pelo usuário de forma *correta*. A correção das descrições (o correto reconhecimento e descrição dos constituintes e feições pelo usuário do sistema) é um pressuposto necessário ao modelo de inferência. *Se os dados foram corretamente descritos, o sistema irá produzir classificações e interpretações confiáveis.*
- Considerando as suposições acima, o pior caso previsto para o sistema é uma descrição completa de uma amostra cuja composição mineralógica seja extremamente incomum na Natureza. Nesse caso, o modelo pode não conter interpretação compatível, ou mesmo sugerir um ambiente diagenético errado.
- O caso prático esperado para o sistema é a interpretação de rochas com composição mineralógica siliciclástica, que serão corretamente classificadas e interpretadas.
- O modelo suporta a interpretação diagenética de uma única amostra de rocha por vez. Embora essa interpretação seja consistente com as feições descritas para essa amostra, não é recomendável estender a interpretação de uma única amostra para um reservatório inteiro com dimensões de centenas de quilômetros. A interpretação diagenética de um reservatório é obtida através da análise de diversas amostras geograficamente dispersas pelo reservatório cujas interpretações são combinadas. A interpretação integrada de diferentes amostras é uma importante funcionalidade prevista para desenvolvimento nas próximas fases deste projeto.

8.4.2 Suposições sobre o modelo do usuário

- O modelo do conhecimento prevê a entrada de informação por um petrógrafo com um nível de perícia classificado como *intermediário*, segundo os níveis de perícia apresentados no Capítulo 3 deste trabalho. Embora o sistema tenha como um dos objetivos reduzir o tempo de treinamento necessário para um geólogo tornar-se apto a descrever arenitos de reservatório, não é esperado que um novato em Petrografia seja capaz de conhecer a terminologia descritiva utilizada no modelo ou reconhecer em uma amostra as feições que elas representam.
- O modelo do conhecimento prevêem que uma descrição petrográfica deva ser realizada em etapas e não em uma única interação com o sistema. A inferência sobre as informações descritas deve ser disparada espontaneamente pelo usuário assim que ele considerar a descrição completa. Novas informações sobre a amostra incluídas posteriormente podem provocar a modificação das interpretações anteriormente obtidas, sendo que apenas a última será preservada.

8.4.3 Competência da tarefa

- O modelo do domínio e de inferência deve disponibilizar toda a terminologia técnica necessária para descrição petrográfica por um geólogo de nível intermediário, bem como sugerir quais informações devem ser descritas e em que ordem.
- O modelo do domínio e de inferência deve classificar corretamente qualquer rocha sedimentar clástica segundo os métodos de classificação baseados em triângulos de composição representados no modelo ou definidos pelo usuário.
- O modelo do domínio e de inferência deve fornecer uma interpretação confiável para os ambientes diagenéticos aos quais a rocha siliciclástica descrita foi submetida, desde que a amostra seja corretamente e completamente descrita.

8.5 Validação do modelo de conhecimento da aplicação

O modelo do conhecimento descrito neste capítulo foi validado através da implementação de uma aplicação de banco de dados inteligente para apoio a descrição e interpretação de rochas sedimentares siliciclásticas, o Sistema *PetroGrapher*.

O modelo do conhecimento aqui descrito teve seu componente descritivo integralmente mapeado para o modelo entidade-relacionamento e implementado em um banco de dados relacional. Os métodos de solução de problemas e os modelos da tarefa foram implementados através de um sistema simbólico que raciocina sobre os objetos do banco de dados garantindo a manutenção da semântica de acordo com o modelo.

A validação do modelo do conhecimento e do sistema foi realizada de forma qualitativa através de três diferentes procedimentos. O primeiro foi a validação contínua do modelo pelo especialista; o segundo através de uma amostragem do que devem vir a ser os usuários finais do sistema; o terceiro através da utilização do sistema sob supervisão do especialista. A descrição dos resultados dessa avaliação é fornecida no Anexo 5 deste trabalho.

8.6 Sumário do capítulo 8

- Os componentes principais do modelo do conhecimento, que correspondem a contribuições inéditas deste trabalho, são os pacotes visuais, os grafos de conhecimento e respectivos modelos de inferência e da tarefa sobre eles definidos.
- Esse trabalho propõe de forma original a modelagem do domínio em dois níveis: o de externalização do conhecimento, utilizado para comunicação entre profissionais do domínio e o de inferência, associado aos altos desempenhos da perícia.
- O modelo cognitivo reconhecido através dos experimentos realizados com geólogos sofreu adaptações para a definição do modelo do conhecimento.
- O conhecimento descritivo é representado, no nível do conhecimento, por uma ontologia formada por uma paronímia de conceitos, um conjunto de grafos de conhecimento e um conjunto de triângulos de classificação composicional.
- Os grafos de conhecimento representam os tipos-regra do modelo, especificando os relacionamentos entre as feições geológicas descritas pelo usuário e as possíveis interpretações diagenéticas.
- Os triângulos composicionais representam conhecimento procedural de como os percentuais de constituintes da amostra definem o tipo da rocha, de acordo com diferentes autores ou por triângulos definidos pelo próprio usuário.
- O conhecimento inferencial é representado, no nível do conhecimento, pela estrutura de inferência de avaliação (*assessment*) adaptada e pelo conhecimento da tarefa que define como a estrutura de inferência utiliza o conhecimento do modelo para obter conclusões úteis.
- O conhecimento inferencial explora o reconhecimento de *pacotes visuais* nas feições descritas pelo usuário, de modo a dirigir a inferência através da identificação do possível ambiente diagenético formador da rocha.
- Os modelos foram construídos para um usuário classificado como intermediário em relação ao conhecimento prévio do domínio.
- Os três níveis do modelo do conhecimento já executados foram validados por três diferentes grupos de teste: o próprio especialista, um grupo de profissionais representativos dos usuários finais do sistema e um grupo de estudantes de geologia com treinamento em Petrografia Sedimentar.

9 Conclusão

A exploração de petróleo é uma atividade humana estratégica que demanda grandes quantidades de conhecimento especialista para ser realizada. Há décadas tem sido uma aspiração da comunidade de Inteligência Artificial compreender e automatizar as tarefas envolvidas na identificação e caracterização de depósitos de petróleo. Uma dessas tarefas é a interpretação de rochas-reservatórios, que é desenvolvida com o auxílio da Petrografia Sedimentar.

A Petrografia Sedimentar busca caracterizar as rochas sedimentares que servem como reservatórios de petróleo através de suas feições texturais e mineralógicas, observadas em amostras de mão ou em seções delgadas analisadas sob um microscópio. O reconhecimento dessas feições e a subsequente caracterização da rocha, quanto à sua composição, proveniência e diagênese, demandam conhecimento e habilidades cognitivas nos mais altos níveis da perícia humana.

Neste trabalho, foi desenvolvido um estudo da perícia no domínio da Petrografia Sedimentar, identificando as habilidades cognitivas aplicadas por novatos e buscando reconhecer como essas evoluem para suportar o desempenho de um especialista. A partir da compreensão do domínio assim obtida, foram propostas técnicas de aquisição de conhecimento e alternativas de modelagem para o desenvolvimento de sistemas de conhecimento em uma tarefa desse domínio.

No desenvolvimento deste estudo, foram coletados e organizados grandes volumes de conhecimento específico do domínio, a respeito de como especialistas em Petrografia Sedimentar trabalham. Modelos de descrição de amostras de rochas siliciclásticas e carbonáticas, nomenclatura de feições petrográficas, seus domínios de valores e sinônimos foram disponibilizados para consulta ou aplicação no ensino da Petrografia Sedimentar. Outros formatos de conhecimento menos trivial, como coleções de métodos de classificação e interpretação de proveniência, deposição e diagênese, coleções de imagens de lâminas e suas interpretações foram levantados e tornados disponíveis para futuros estudos em Engenharia de Conhecimento ou Petrografia.

O estudo demonstrou que a perícia em Petrografia Sedimentar é suportada por uma grande variedade de representações mentais onde o conhecimento se estrutura, o que não tem sido comumente encontrado em outras aplicações. Entre essas estruturas, é notável a associação entre o uso de pacotes visuais, para indexação do conhecimento e reconhecimento de problemas, e o alto desempenho em soluções de problemas alcançado por especialistas do domínio.

As contribuições deste trabalho se fazem, portanto: (i) nos estudos cognitivos que permitem vislumbrar uma melhor compreensão da perícia em domínios complexos que demandam raciocínio baseado em imagens e (ii) no nível do conhecimento, através de propostas e teste de formas de aquisição e modelagem de conhecimento nesses domínios.

As propostas aqui apresentadas foram validadas através da implementação, teste e validação do Sistema PetroGrapher, uma aplicação de banco de dados inteligente para apoio à descrição e interpretação de rochas sedimentares siliciclásticas. Esse sistema utiliza perícia em Petrografia Sedimentar e interpretação diagenética para auxiliar o trabalho de caracterização de reservatórios de petróleo em arenitos.

A seguir, são apresentadas as conclusões deste trabalho, tratando dos aspectos cognitivos associados à perícia em Petrografia Sedimentar, das diferenças entre

especialistas e novatos, dos métodos de aquisição de conhecimento e dos modelos de representação de conhecimento.

9.1 Conclusões deste trabalho

9.1.1 Sobre os aspectos cognitivos associados à perícia em Petrografia Sedimentar

Grande variedade de formas mentais. Especialistas em Petrografia Sedimentar utilizam grande variedade de formas mentais para representar e organizar o conhecimento declarativo. Neste trabalho, foram identificadas formas de representação tradicionais como regras, esquemas, hierarquias e relações causais, associadas, por sua vez, a casos e pacotes visuais. Essa variedade de representações foi raramente reportada em outros domínios de aplicações de sistemas de conhecimento. Além dessas formas, que estruturam o conhecimento do domínio, outros tipos de conhecimento auxiliam a inferência, como associações diversas entre conceitos, índices de significância, coeficientes de certeza e limiares, índices de probabilidade a priori entre outros menos compreendidos.

Hierarquias não formalizadas. As hierarquias possuem importante papel como suporte à inferência, permitindo realizar a classificação aproximada de novas amostras, baseada em poucas feições rapidamente percebidas, e julgar se o problema em questão está no escopo dos problemas que é capaz de resolver. De modo interessante, porém as hierarquias utilizadas pelo petrógrafo para solução do problema possuem um número muito maior de classes e critérios de organização do que o verificado na literatura de Petrografia Sedimentar. Na literatura, as rochas são classificadas basicamente por composição e texturas, além de uns poucos outros critérios. Essas hierarquias praticamente não foram mencionadas nas fases de eliciação. Os diversos critérios de organização utilizados pelos especialistas permitem recuperar analogias entre rochas de classes distintas. Por exemplo, rochas que foram originadas de um mesmo processo diagenético, depositadas em um mesmo ambiente deposicional ou sofreram o mesmo tipo de retrabalhamento. Aparentemente, apenas uma parte da taxonomia efetivamente utilizada por geólogos foi formalizada no domínio através da literatura.

Pacotes visuais. A concepção de pacote visual, como um importante fator de suporte a perícia em Geologia, é uma noção inédita introduzida neste trabalho. A maior parte do conhecimento coletado no domínio para solução de problemas, e que irá dirigir o processo de decisão, compõe-se originalmente de imagens. A variedade e complexidade do componente visual do conhecimento exige mecanismos cognitivos de abstração próprios, capazes de reduzir esse componente, tanto em número quanto em complexidade. Esses mecanismos são suportados pela capacidade analítica e habilidade criativa do geólogo, que decompõe, seleciona e agrupa imagens atribuindo a esses agrupamentos significados particulares. Esse processo, aqui descrito como *empacotamento*, permite reduzir grandes quantidades de informações perceptuais aos *números mágicos* (7 mais ou menos 2) suportados pelo processo cognitivo para a tomada de decisão. O conhecimento explícito é combinado e transformado em tácito, de difícil eliciação pelos métodos de aquisição de conhecimento. *Pacotes visuais* são abstrações, em um nível muito próximo do sensorio, de padrões visuais similares vistos muitas vezes e armazenados na memória do geólogo, associados a um tipo de

interpretação. Essa representação é sintetizada no cérebro a partir de diversas imagens reais, posteriormente associadas com um significado geológico particular. Pacotes visuais tendem a ser mais ricos e complexos perceptualmente do que as feições petrográficas descritas na literatura. Com o desenvolvimento da perícia, o pacote visual passa a se constituir na menor unidade de representação (ou *grão do conhecimento*) utilizada no casamento de padrões com os problemas do domínio. A relação entre os pacotes visuais e grupos de feições perceptuais ficou clara com a aplicação da técnica de aquisição de conhecimento de casos e grafos realizada neste trabalho.

Indexação das estruturas mentais. Os pacotes visuais contribuem com a indexação das estruturas mentais de representação do conhecimento, permitindo que umas poucas feições geológicas ativem esquemas como hipóteses a serem comprovadas. Essa indexação minimiza o processo de busca, tornando-o quase puramente um casamento de padrões simbólicos. Outras formas de indexação utilizadas pelos geólogos são as associações de conjunto, que permitem recuperar conceitos não através de sua classe, mas por algum atributo comum (feições que possuem mesma origem, que ocorrem na mesma região, que ocorrem em rochas de mesma proveniência etc.).

Métodos de solução de problemas. Especialistas aplicam uma grande variedade de métodos de solução de problemas para realizar interpretação geológica. Quatro desses métodos foram eliciados com sucesso neste trabalho e formalmente representados, o de *reconhecimento de pacotes visuais*, *interpretação diagenética*, *avaliação de pesos nos grafos de conhecimento* e *classificação baseada em diagramas triangulares*. Esses métodos são inéditos quanto à sua descrição de funcionamento. Muitos outros foram identificados e apenas parcialmente compreendidos, em especial os que se referem à aplicação de raciocínio analógico ou tratamento de incerteza.

9.1.2 Diferenças entre especialistas e novatos

Organização do domínio. Novatos descrevem o domínio utilizando feições perceptuais, como texturas, forma de grão, tipo de contorno, minerais de fácil reconhecimento. Especialistas descrevem o domínio em termos de feições interpretadas diretamente associadas à solução do problema.

Formas de representar conhecimento. Novatos justificam suas conclusões utilizando poucos tipos de conhecimento (basicamente, minerais e feições texturais, e regras). Especialistas apresentam um sem número de formas de organização do conhecimento (associações, correlações múltiplas, tabelas progressivas, diagramas triangulares, entre muitas outras) para justificar suas conclusões. Essa característica da perícia em Petrografia Sedimentar não tem sido reportada em outros domínios.

Conhecimento tácito. Novatos raciocinam em um caminho de busca de muitos passos, utilizando raciocínio progressivo e regressivo combinados a partir das feições perceptuais, inferindo algumas feições interpretadas e, a partir delas, propondo as interpretações possíveis. Especialistas utilizam conhecimento tácito para dirigir a inferência e não são capazes de explicitar o caminho de busca. A inferência reconhecida aparenta ser um simples casamento de padrões com a interpretação geológica associada. Sob solicitação, especialistas justificam sua decisão com base em feições perceptuais ou facilmente interpretadas, demonstrando que o conhecimento está organizado em dois níveis. O primeiro, aqui chamado de *externalização*, é utilizado

para descrição, comunicação ou mesmo racionalização do conhecimento inferido. O segundo, denominado de *inferência*, aplica conhecimento tácito, que não é facilmente externalizável, para conduzir a inferência e extrair novos conhecimentos. Essa clara separação entre comunicação e raciocínio não foi reconhecida no domínio da Fitopatologia, aqui estudado, e não tem sido reportada em trabalhos em outros domínios. Esse comportamento deve ser resultado da grande complexidade do domínio da Geologia. Ao mesmo tempo que utiliza inúmeros tipos de conhecimento em um processo sofisticado de inferência, exige a formalização de um vocabulário de comunicação para permitir o processo cooperativo de produção do conhecimento sistêmico (fazendo referência aos termos da Figura 1.2).

9.1.3 Sobre os métodos de aquisição de conhecimento

Adequação dos métodos. Os métodos de aquisição de conhecimento descritos na literatura são excessivamente voltados à aquisição do conhecimento declarativo do domínio, especialmente os que se referem à caracterização dos conceitos desse domínio. Raras são as propostas de metodologias para eliciar as relações causais que suportam a inferência ou o conhecimento tácito envolvido, que este trabalho demonstrou serem extremamente importantes. Ainda, são praticamente inexistentes os métodos para extrair ou evidenciar o componente dinâmico do conhecimento. Essa preferência reflete a insipiente compreensão dos mecanismos da inferência humana, quando comparados à compreensão dos modelos mentais.

Conhecimento declarativo X solução de problemas. Os métodos de aquisição de conhecimento *per se* são eficientes em eliciar os conceitos conhecidos pelo especialista, porém ineficazes em apontar quais desses conceitos são efetivamente utilizados na execução da tarefa em foco. Neste estudo, foram extraídas hierarquias de domínio e inúmeros conceitos que, em momento algum, pareceram contribuir com a solução do problema. O papel das ontologias descritivas no suporte à perícia em Petrografia demonstrou estar mais relacionado ao processo de externalização (ou transmissão) do conhecimento do que à solução de problemas propriamente dita. A existência de hierarquias formais como a de classificação composicional, que em momento algum foi utilizada para solução de problemas, sugere ser o resultado do esforço de organização e racionalização do conhecimento para vencer a complexidade natural do domínio. Seriam necessários estudos complementares para identificar se essa diferença é uma particularidade do especialista estudado ou se repete para outras tarefas da Geologia e de outros domínios. A importância do papel das hierarquias, tanto na solução de problemas como na construção de ontologias descritivas de domínio, sugere ser uma área de intensa pesquisa futura.

Relações causais. Os métodos utilizados para extrair as relações causais, selecionados na literatura, mostraram-se ineficazes para extrair a quantidade de relações causais que suportam a inferência. Métodos tradicionais, como a técnica de focalizar contextos, são ineficientes em domínios complexos, especialmente quando utilizam raciocínio imagístico. O número de conceitos e atributos identificados no domínio, através dos métodos de classificação, é excessivamente grande para permitir a organização de tantos contextos que possam cobrir o domínio de modo eficiente. As relações causais foram extraídas, neste trabalho, através da abordagem de coleta de casos. Por descreverem um conhecimento operacional (descrição do problema com a solução associada) e serem efetivamente representativos dos problemas do domínio, a utilização dos casos mostrou-

se uma ferramenta eficaz na extração das relações causais do domínio. Os casos foram objeto de entrevistas estruturadas especialmente dirigidas para a justificativa das interpretações geológicas, com base nas feições ali descritas. Embora tenham apresentado resultados satisfatórios nesse domínio, a investigação de métodos de aquisição de conhecimento próprios para raciocínio baseado em imagens é ainda um campo aberto para pesquisa.

Métodos para adquirir conhecimento tácito. As estruturas de conceitos obtidas através dos experimentos cognitivos, e que são efetivamente utilizadas na solução de problemas, organizam-se segundo feições geológicas interpretadas. Essas estruturas não corresponderam às hierarquias formais da literatura de Petrografia Sedimentar, que são construídas a partir de feições puramente descritivas das rochas, quais sejam: mineralogia dos constituintes e características texturais. Este trabalho propõe que, com o desenvolvimento da perícia, paulatinamente, as feições descritivas aprendidas e utilizadas para organização do domínio são substituídas por outras feições, não imediatamente visíveis, mas interpretadas a partir daquelas visíveis. Por um processo aqui identificado como *empacotamento e automatização*, essas feições são reconhecidas no problema por casamento de padrões, exatamente da mesma forma que as feições descritivas. Essa capacidade de extrair rapidamente informação significativa, diretamente relacionada com as interpretações possíveis da ocorrência geológica, garante aos especialistas um desempenho superior na solução de problemas. Juntamente com a quantidade de conhecimento, essa capacidade mostrou-se a mais importante habilidade cognitiva para suportar a perícia. A eliciação de conhecimento tácito como esse exige o suporte de ferramentas para provocar a externalização do conhecimento por parte do especialista, que é um processo distinto da verbalização de um conhecimento consciente como realizado através das entrevistas. As introspecções que permitem aflorar esse tipo de conhecimento devem ser provocadas por torná-lo evidente. Esse foi o papel realizado pela combinação de grafos de conhecimento e casos, ao demonstrar que o conhecimento utilizado para suportar a inferência nos grafos não estava representado na ontologia do domínio.

Ciclo de aquisição de conhecimento. A combinação de um modelo declarativo, construído com o auxílio de métodos de classificação, com a análise de casos coletados no domínio mostra-se uma ferramenta eficaz para a extração de relações causais em qualquer domínio onde a disponibilidade dos casos é possível. Um ciclo eficiente de construção de um modelo do conhecimento pode ser visualizado na Figura 9.1. O modelo declarativo, descrito inicialmente através dos conceitos do domínio, confrontado com os casos coletados, evidencia as relações causais, que, por sua vez, ao serem comparadas aos casos, apontam conceitos a serem incluídos no modelo declarativo. Esse processo segue em espiral para um modelo de domínio cada vez mais completo.

Granularidade do conhecimento. O desenvolvimento do modelo declarativo do conhecimento através do ciclo descrito na Figura 9.1 deu-se através de uma especialização cada vez maior dos atributos dos conceitos. Esse comportamento foi absolutamente homogêneo ao longo de todo o processo de aquisição e representação. Isso indica que o especialista registra as informações num nível de detalhamento menor (ou seja, objetos mais genéricos) do que ele as utiliza. Essa distinção entre a descrição e o conhecimento que suporta a inferência indica que existe mesmo uma diferença de granularidade entre a forma em que as informações são descritas e como são utilizadas

pelo especialista. Essa diferença pode ser explicada pelo processo de empacotamento de estímulos sensoriais.

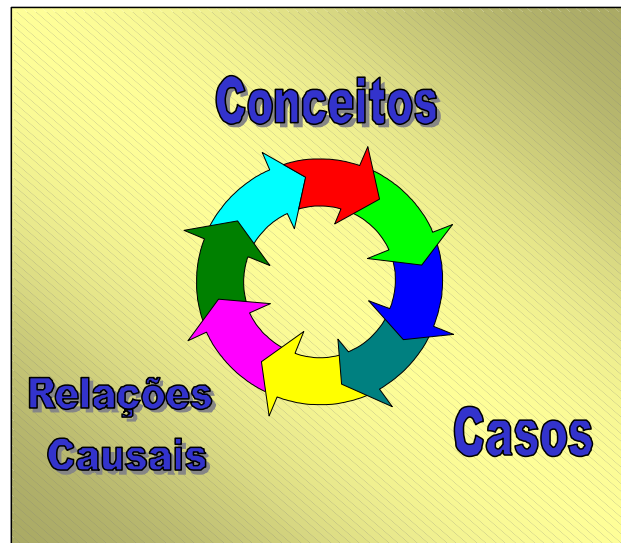


FIGURA 9.1 – A comparação do modelo declarativo com os casos coletados evidencia as relações causais do domínio. Estas, por sua vez, podem apontar novos conceitos ou atributos a serem inseridos no modelo.

9.1.4 Sobre os modelos de representação de conhecimento

Organização do modelo. Seguindo outras propostas formais de representação de conhecimento, o modelo aqui proposto é representado a partir de três componentes: um modelo declarativo dos conceitos do domínio com seus atributos e valores; um modelo das relações causais entre esses conceitos, que irão dirigir o processo de inferência; e um modelo das estruturas de inferência e da tarefa que representa o componente dinâmico do conhecimento.

Estrutura dos conceitos. A estrutura do modelo declarativo não segue a hierarquia de conceitos do domínio, mas sim a estrutura imposta pelos *casos* que modelam os problemas desse domínio, que é basicamente uma partonomia organizada em torno do conceito *amostra de rocha*.

Pacotes visuais. O modelo declarativo introduz a noção de *pacotes visuais*, que são feições geológicas interpretadas. Essas feições são representadas no modelo como agregação de conceitos que representam objetos diversos do domínio, mas que, juntos, assumem significado especial. Esse significado, quando explicitado pelo especialista, é representado pelo nome do pacote.

Relações causais. O modelo das relações causais é representado por grafos de conhecimento e triângulos de classificação composicional. Os grafos de conhecimento, propostos anteriormente para uma aplicação em Medicina, foram adaptados aqui para mapear o conhecimento do nível de externalização para o nível de inferência. Representam a indexação da hierarquia do domínio através dos pacotes visuais. Apesar da própria hierarquia não ter sido representada, as associações entre feições geológicas e

cada uma das classes de ambientes diagenéticos foi representada através dos grafos. Os triângulos de classificação composicional representam as associações entre constituintes minerais e respectivas classes de rochas. Da mesma forma que nos grafos, a hierarquia de classes de rochas não foi representada, porém as associações entre classes e constituintes o foram.

Omissão da hierarquia de classes. A omissão das hierarquias de domínio na representação de conhecimento, que foram substituídas pela representação dos índices significativos dessa hierarquia, trouxe benefícios em termos de eficiência computacional. Foi possível propor um modelo plano para a representação do domínio, sem a complexidade introduzida pela manutenção da herança de atributos. Essa decisão facilitou, igualmente, o mapeamento das estruturas de representação do modelo do conhecimento para o modelo simbólico baseado no modelo E-R. Como consequência, a utilização de um banco de dados relacional como repositório do conhecimento permitiu a definição de alternativas de implementação modulares e padronizadas que facilitam também a integração com outros sistemas.

Aplicabilidade a outras tarefas. A proposta de um modelo de representação baseado em uma ontologia de conceitos, pacotes visuais e grafos de conhecimento serve a outros domínios que utilizam raciocínio baseado em imagens. Um estudo para reutilização do modelo para descrição de carbonatos (5 seções de aquisição de conhecimento de 1:30 horas cada) demonstrou que as primitivas de representação do conhecimento declarativo podem ser reutilizadas, bem como a estrutura de partonomia. Já os métodos de solução de problemas parecem ser definitivamente distintos daqueles utilizados na petrografia de rochas siliciclásticas. As limitações de aplicabilidade desse modelo se referem à maturidade da técnica de descrição de cada domínio. Nos domínios onde os aspectos visuais utilizados para inferência não possuem ainda tradução verbal dominada pela comunidade profissional, como na Fitopatologia apresentada neste trabalho, não é possível construir a ontologia do domínio para suportar as tarefas de inferência. Um grande esforço de exteriorização do conhecimento tácito deve anteceder a fase de modelagem.

9.2 Contribuições ao estado da arte

As contribuições deste estudo se fazem em duas áreas: compreensão dos mecanismos cognitivos da perícia em domínios que aplicam raciocínio baseado em imagens e no nível do conhecimento, através de modelos e técnicas de aquisição de conhecimento.

Este trabalho propõe que a perícia em domínios que aplicam raciocínio baseado em imagens é fortemente suportada por *pacotes visuais*. Pacotes visuais são conjuntos de feições visuais reconhecidas no nível sensorial e são agregados por um processo de abstração num nível cognitivo muito próximo do sensorial. Essa abstração atribui um significado especial à agregação, o qual contribui definitivamente para o processo de decisão dos mais altos níveis cognitivos.

Essa afirmação foi verificada durante o processo de aquisição de conhecimento, onde as feições descritivas constantes nas descrições foram sistematicamente agrupadas para justificar as conclusões encontradas. O comportamento foi novamente evidenciado nos experimentos descritos na Seção 6.2 - Análise da Perícia - deste trabalho. Níveis mais

altos de perícia estão associados a uma maior rapidez na extração de informações relevantes da lâmina, a descrições progressivamente baseadas em aspectos interpretados das amostras de rocha e à utilização dos pacotes como critério para organização das amostras.

Este trabalho propõe uma forma de adquirir o conhecimento dos pacotes visuais. O método baseia-se na coleta e abstração de casos para extrair o conhecimento declarativo do domínio e na aplicação dos grafos de conhecimento, para evidenciar conhecimento tácito e agrupar feições do modelo declarativo, seletivamente associando-as às conclusões. O método será tanto mais eficiente quanto mais completo for o modelo declarativo e mais maduro for o domínio nas suas metodologias de descrição do domínio.

Ainda é proposta uma forma de representar e aplicar os pacotes visuais para a construção de sistemas de conhecimento. O modelo declarativo é representado como uma ontologia de conceitos, descritos num modelo plano (sem hierarquia de objetos), associada a um modelo de representação de grafos de conhecimento que faz referência a instâncias dos conceitos da ontologia.

9.3 Sugestões para pesquisa futura

A inclusão de relacionamentos hierárquicos e herança de atributos na ontologia do domínio parece ser o caminho natural para habilitar o sistema a suportar a descrição de outras classes de rochas (como as rochas carbonáticas, já em estudo). Essa modificação, no entanto, provocaria profundas mudanças na forma como os modelos de conhecimento e simbólico são integrados, uma vez que o modelo simbólico, representado no modelo de dados relacional, é um modelo plano. Modelos de dados orientados a objetos parecem ser uma escolha mais apropriada para representar ontologias de domínio no nível simbólico.

A expansão desses modelos deve passar por uma sistematização da proposta de novos modelos do conhecimento inferencial (como os grafos e triângulos deste trabalho), que unifique os formatos possíveis de modelos inferenciais. Um estudo do domínio pode apontar algumas poucas classes de modelos que suportem todas as associações entre evidências e conclusões necessárias em domínios complexos. Essa sistematização facilitaria a proposta de novos sistemas e ferramentas para esses domínios.

A alternativa de utilizar casos como a primitiva de representação do sistema *PetroGrapher* abre a possibilidade de desenvolver formas automáticas de armazenar novas amostras na base de dados. Como descrições de amostras de rochas são grandemente estruturadas, é possível desenvolver um sistema de recuperação de informações de documentos legados baseado em casos. Esse sistema realizaria uma busca sobre descrições já realizadas e armazenadas como documentos, tentando reconhecer o modelo descritivo aqui proposto. Havendo o reconhecimento, mesmo que parcial, da estrutura do documento através de seus atributos e valores poderia ser gerada uma entrada no sistema a ser posteriormente confirmada ou refinada pelo usuário.

A importância do componente visual da informação tratada nessa aplicação sugere a necessidade de formas mais sofisticadas para tratar as imagens associadas às descrições de rocha. No lugar do simples armazenamento das imagens, um estudo sobre os

atributos relevantes dessas imagens poderia indicar outros atributos para consulta e correlação entre imagens de rocha, permitindo fazer um tratamento de análise de conteúdo e não apenas atributos geométricos da imagem. O sistema atual poderia ser ampliado para conter um banco de imagens, onde houvesse tratamento semântico sobre as informações assim capturadas.

Este trabalho proporcionou uma melhor compreensão do modo como especialistas humanos em Geologia armazenam e aplicam conhecimento para interpretação geológica. Contribuiu ainda para ampliar o conjunto de técnicas para aquisição e modelagem de conhecimento em domínios onde o componente visual do conhecimento tem papel preponderante na solução de problemas. Contribuições importantes foram feitas aqui quanto a forma de modelar e tratar esse tipo de conhecimento, especialmente quanto ao componente inferencial do modelo do domínio. Por si só, o volume do conhecimento coletado e organizado ao longo desse estudo deve contribuir para futuros estudos em Engenharia de Conhecimento e como material de estudo em Petrografia Sedimentar.

Anexo 1 Instrumento do experimento para análise cognitiva
da perícia em Petrografia Sedimentar

IDENTIFICAÇÃO DOS PARTICIPANTES

1. Nome:

2. Graduação:

 1. Geologia 2. Outra

3. Ano de conclusão (ou previsão de conclusão):

4. Mestrado:

5. Ano de conclusão (ou previsão de conclusão):

6. Assunto da Dissertação

7. Doutorado:

8. Ano de conclusão (ou previsão de conclusão):

9. Assunto do Doutorado

10. Qual a formação que possui em Petrografia Sedimentar?

 1. Uma disciplina do Graduação 2. Uma ou mais disciplinas de Pós-Graduação 3. Assunto secundário em disciplina de Pós-Graduação 4. Prática na pesquisa do Mestrado 5. Prática na Iniciação Científica 6. Prática na pesquisa do Trabalho de Diplomação 7. Prática na pesquisa de Doutorado 8. Prática profissional/acadêmica 9. Outra

11. Se 'Outra', qual?:

12. Quantas horas do seu trabalho habitual foram dedicadas à Petrografia Sedimentar (como meio ou como fim) nos últimos 12 meses?

 1. Menos de uma hora por mês 2. Entre uma e 10 horas por mês 3. Entre 10 e 40 horas por mês 4. Mais de 40 horas por mês

13. Outras observações que julgar pertinentes:

EXPERIMENTOS**Experimento 1 - Memória de longa duração**

Código da lâmina - 50367

Apresentar a seção marcada, em aumento 2,5 X . Girar lentamente ao ser apresentada e depois deixar imóvel. Expor por 2 minutos. Após realizar os 3 próximos experimentos, distribuir a respectiva folha e solicitar que seja descrita em detalhe, utilizando o tempo que for necessário.

Experimento 2 - Demonstrativo de quantidade de conhecimento

Código da lâmina 59365, seção marcada 2.

Distribuir folha do Experimento 2.

Manter uma seção delgada de arenito com aumento 2,5 vezes, para ser possível observar detalhes texturais, por 5 minutos. Girar a platina lentamente ao apresentar e depois fixar. Solicitar que, enquanto a lâmina estiver exposta, ela seja descrita com o maior detalhe possível.

Experimento 3 – Demonstrativo de chunks visuais e memória de curta duração, com 3 amostras diferentes.

Código das lâminas

3. a) 221(arenito);

3. b) 892 (arenito);

3. c) 424-B (metamórfica)

Para cada uma das lâminas, distribuir folha do Experimento 3, expor seção da lâmina, sem girar platina, por 15 segundos. Solicitar que descrevam as feições observadas na rocha, aguardando o tempo necessário.

Experimento 4 - Demonstrativo de esquemas de associação de objetos.

Experimento realizado em separado com cada participante.

4. a) Distribuir o conjunto 4A de fotos sobre temas diversos sobre a mesa com a seguinte distribuição, e cobri-las:

1	2	8
3	6	4
5	7	9

Expor por **45 segundos** e cobrir novamente. Solicitar que descreva verbalmente todas as fotos lembradas com o máximo de detalhe. Registrar com gravador.

4. b) Repetir para o conjunto 4B de fotos de lâminas de rochas siliciclásticas . Distribuição:

9	1	5
7	6	11
10		

Experimento 5 - Demonstrativo de esquemas ou conhecimento profundo

5. a) Solicite que sejam classificadas as fotos de flores, agrupando as que deveriam estar juntas em tantos grupos quanto forem necessários. Anote para cada grupo (G1, G2, ...) o número das fotos e o que contém o grupo. Anotar critério de separação e comentários colaterais.

5. b) Solicite que sejam classificadas as fotos de paisagens, agrupando as que deveriam estar juntas em tantos grupos quanto forem necessários. Anote para cada grupo (G1, G2, ...) o número das fotos e o que contém o grupo. Anotar critério de separação e comentários colaterais.

5. c) Solicite que sejam classificadas as fotos de rochas, agrupando as que deveriam estar juntas em tantos grupos quanto forem necessários. Anote para cada grupo (G1, G2, ...) o número das fotos e o que contém o grupo. Anotar critério de separação e comentários colaterais.

**Anexo 2 Exemplos de textos coletados no experimento
para análise cognitiva**

Experimento 2 - Demonstrativo de quantidade de conhecimento

ESPECIALISTA (n° 1) : Arenito aparentemente grosso, moderadamente a mal selecionado, com grãos subarredondados a predominantemente subangulares, predominantemente enquanto com alguns placosos. Fábrica sustentada pelos grãos, de empacotamento normal, contatos intergranulares predominantemente pontuais, também retos e côncavo-convexos. Composição detrítica: quartzo monocristalino plutônico (~70%), feldspato potássico (~25%), biotita (~5%). Diagênese: 1- Compactação incipiente, deformação limitada da mica. 2- Cimentação por mosaico grosso de calcita, preenchendo totalmente espaço intergranular, expandindo localmente mica e corroendo incipientemente margens dos grãos. Classificação: talvez arenito grosso, arcósio micáceo com cimento de calcita. Interpretação: ambiente deposicional de alta energia, proveniência de embasamento soerguido, eodiagênese pouco desenvolvida, proveniência continental de clima seco, mesodiagênese moderada.

NOVATO (n° 5) : Arenito composto essencialmente por grãos de quartzo, juntamente com micas e outros minerais de birrefringência elevada. Cimento de calcita poiquilotópica preenchendo a porosidade primária. Presença de cutículas de argila ao redor dos grãos detríticos, oxidação visível em porções localizadas. Grãos de quartzo tamanho areia grossa, subangulosos, fábrica sustentada pelos grãos. Não apresenta estratificações ou orientação aparente. Contatos intergranulares pontuais, planos e côncavo-convexos, além de contatos interdigitados provocados por compactação química, grãos de quartzo apresentam extinção abrupta indicando origem vulcânica, grãos de mica apresentando deformação plástica incipiente.

EXPERIMENTO 3 – DEMONSTRATIVO DE CHUNKS VISUAIS E MEMÓRIA DE CURTA DURAÇÃO

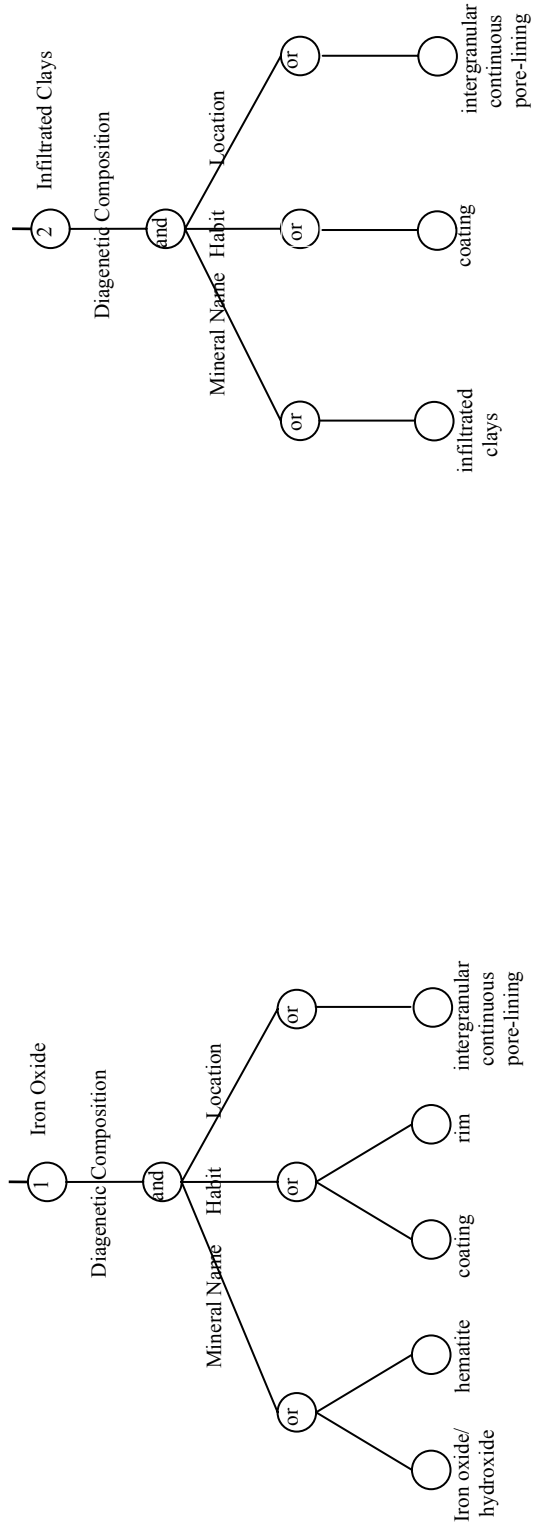
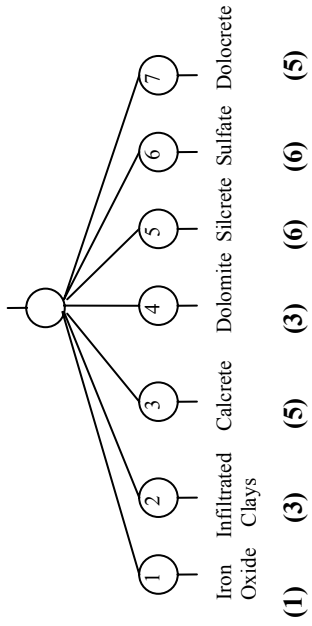
ESPECIALISTA (n° 1) : Arenito médio a fino, moderadamente selecionado, grãos subarredondados equantes. Fábrica sustentada pelos grãos, empacotamento normal a apertado, contatos pontuais, planos e côncavo-convexos. Composição: quartzo monocristalino plutônico (~80%), feldspato predominantemente feldspato potássico (~19%), oóides oolito silicificado (traço). Diagênese: 1- Finas cutículas de argilas talvez infiltradas em torno dos grãos, 2- Compactação incipiente, 3- Alguns crescimentos de quartzo. Classificação: arenito médio, subarcósio.

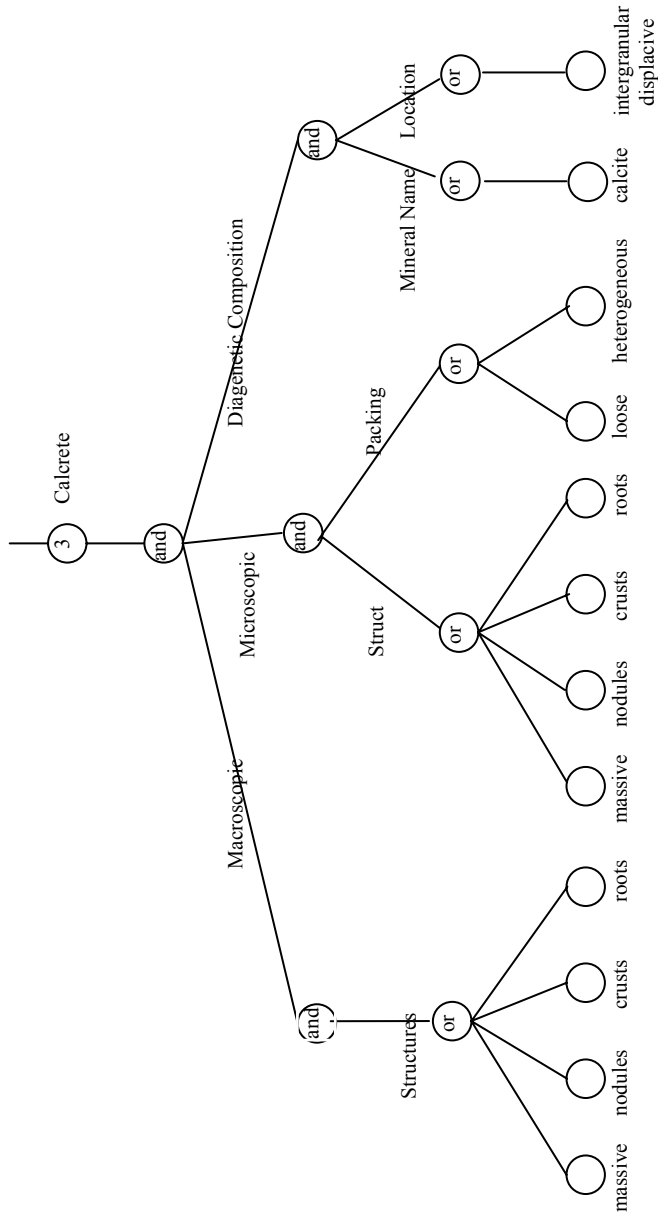
NOVATO (n° 5) : Areia quartzosa, grãos bem arredondados, contatos predominantemente planos, presença de feldspatos alcalinos (microclínios), grãos corroídos.

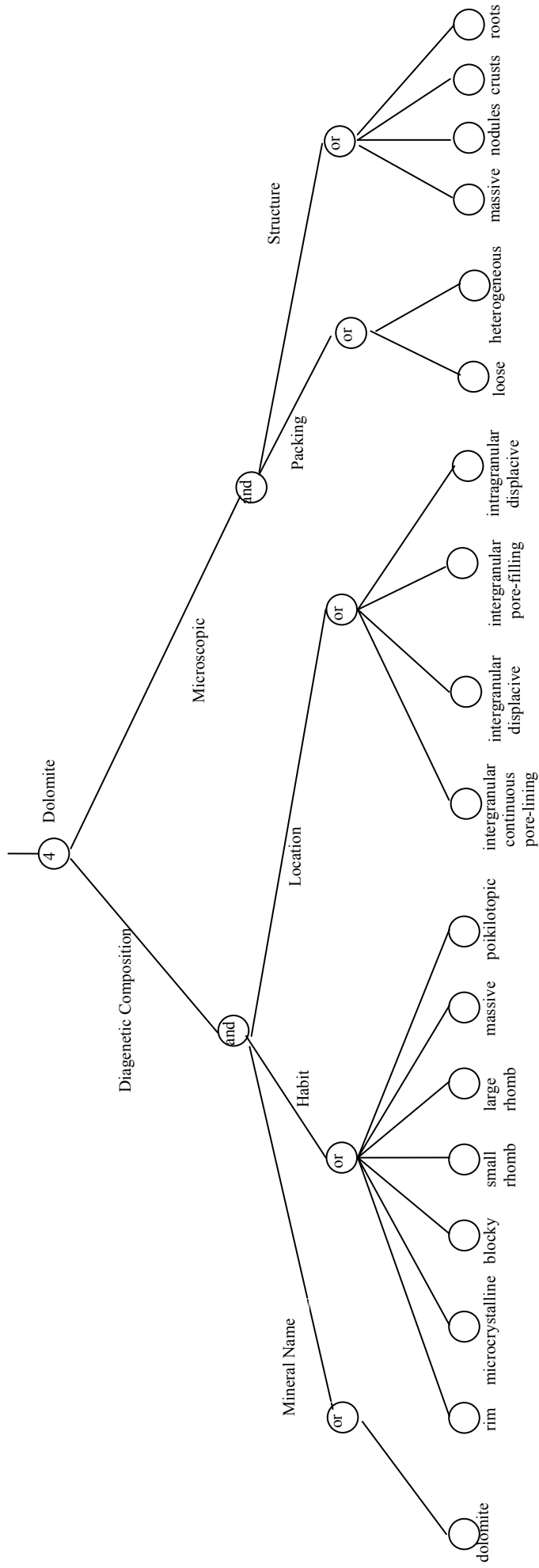
Anexo 3 Exemplo de grafo de conhecimento

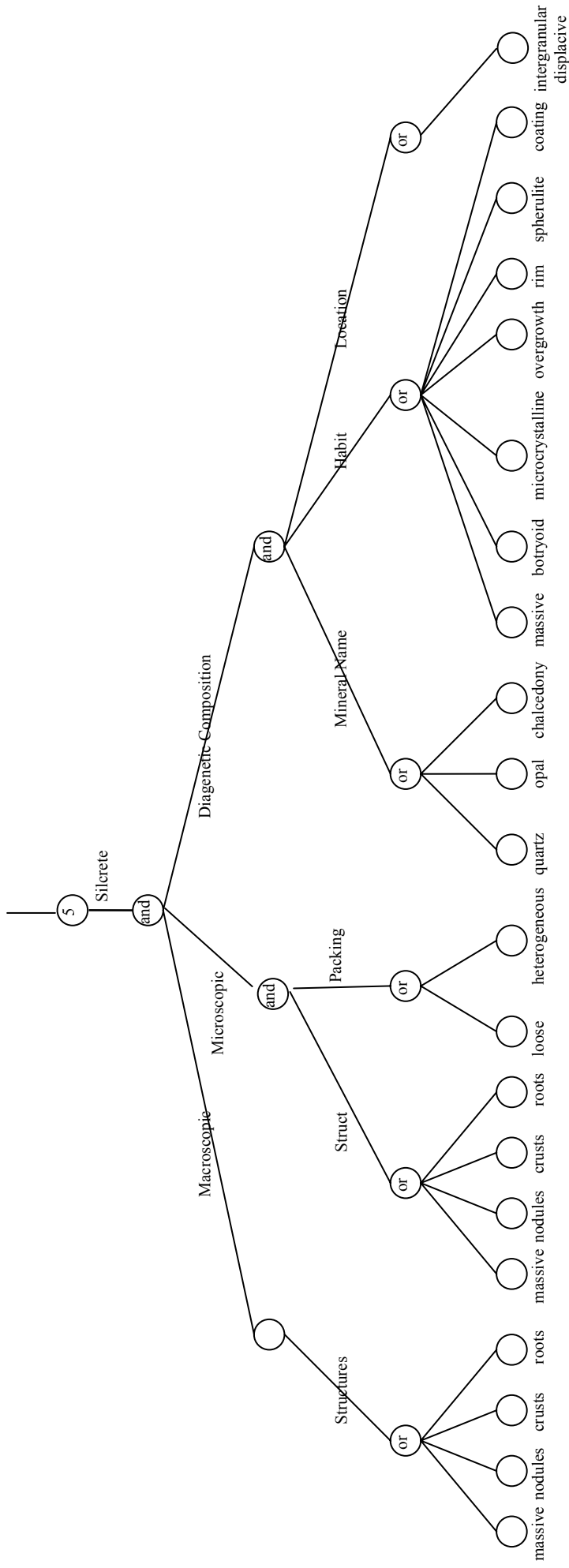
EXEMPLO DE GRAFO DE CONHECIMENTO PARA INTERPRETAÇÃO DE AMBIENTE DIAGENÉTICO

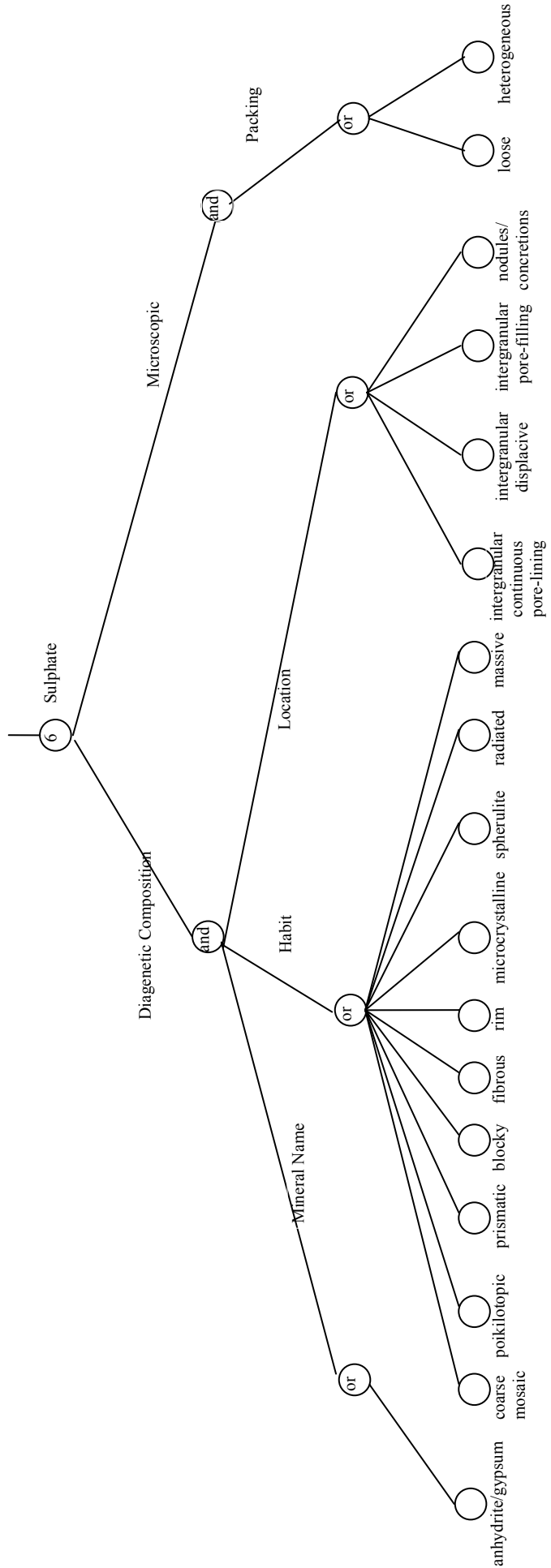
Continental Meteoric Eodiagenesis Under Dry Climate
(Ultima Modificação em 31-May-00)

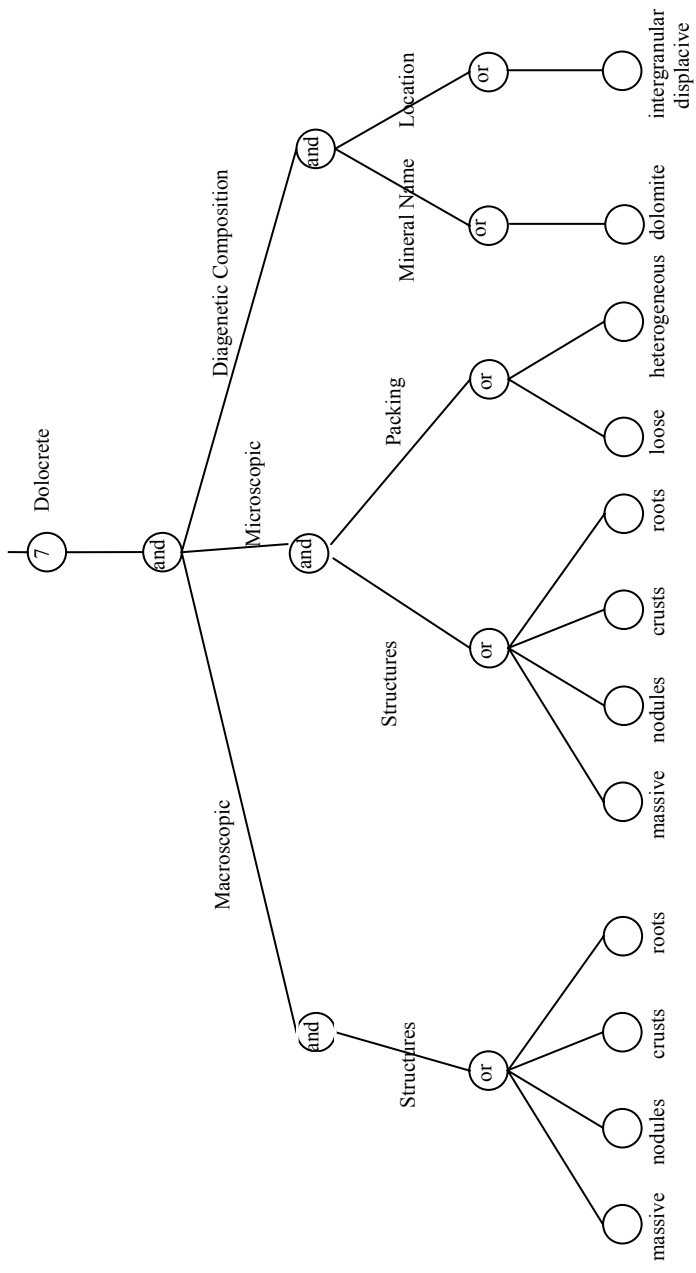


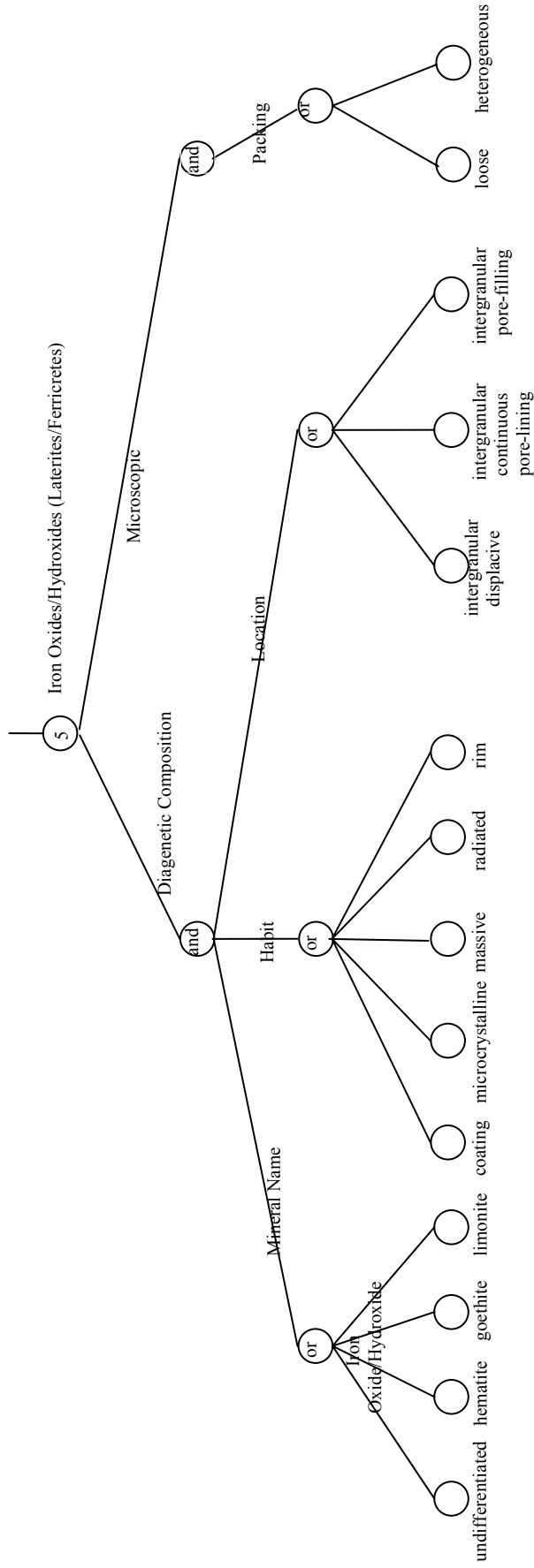












**Anexo 4 O Modelo do conhecimento para
Petrografia Sedimentar**

Dicionário de conceitos

Amostra

Agregação dos demais conceitos que descrevem uma amostra, cujas instâncias e de suas partes são fornecidas pelo usuário. É um conceito composto.

Identificação

Parte de amostra. Agrega todos os atributos que, neste modelo, representam os relacionamentos cognitivos entre a amostra e demais conceitos do domínio, como o poço de onde foi extraída, a unidade e bacia sedimentar a qual pertence, qual o petrógrafo que a descreveu, etc. É um conceito atômico.

Macroscopia

Parte de amostra. Agrega todos os atributos da amostra passíveis de serem observados a olho nu. É um conceito atômico.

Microscopia

Parte de amostra. Agrega todos os atributos simbólicos da amostra que descrevem feições observadas em microscópio ótico com luz polarizada e que são descritos de acordo com as restrições impostas pelas instâncias do conceito Nomenclatura de Valores. É um conceito atômico

Composição detrítica

Parte de amostra. Descreve os atributos dos constituintes da amostra transportados e depositados no local onde a rocha se formou. Podem ser fósseis ou minerais, desde que sejam instâncias do conceito Constituinte Detrítico. É um conceito composto.

Composição diagenética

Parte de amostra. Descreve os atributos constituintes da amostra que se formaram depois que os sedimentos se depositaram, durante o processo de consolidação da amostra. São instâncias de Constituintes Diagenéticos. É um conceito composto.

Macroporosidade

Parte de amostra. Descreve os poros da amostra, visíveis ao microscópio ótico, que se mantiveram entre os constituintes detríticos ou os que se formaram durante a consolidação da rocha, por dissolução, quebra, etc., de outro constituinte. É um conceito composto.

Microporosidade

Parte de amostra. Descreve a quantidade de vazios entre os constituintes da amostra, medido por análise petrofísica. É um conceito atômico.

Análises adicionais

Parte de amostra. Descreve outras análises não suportadas pela interface e descritas textualmente pelo usuário. É um conceito atômico, não tratado pelo sistema.

Observações

Parte de amostra. Descreve anotações particulares que o usuário possa querer registrar sobre a amostra. É um conceito atômico, não tratado pelo sistema. .

Imagens

Parte de amostra. Fotografias associadas à amostra com uma breve descrição da técnica (testemunho, microfotografia, microscópio eletrônico) e conteúdo da foto. É um conceito atômico.

Totais

Parte de amostra. Somatório dos constituintes da rochas de acordo com o grupo mineral a qual pertence, descrito pelo atributo *ConstituentSet* dos conceitos *Composição Detrítica* e *Composição Diagenética* (ver Anexo 4). É um conceito composto e gerado pela inferência do sistema.

Classificação

Parte de amostra. Resultado da aplicação dos métodos de classificação composicional representados nos triângulos da base de conhecimento sobre os valores de *Totais* gerados pelo sistema. É um conceito composto e gerado pela inferência do sistema.

Interpretação

Parte de amostra. Resultado da aplicação dos grafos de conhecimento sobre os atributos descritos pelo usuário. É um conceito composto e gerado pela inferência do sistema. Alguns conceitos que compõem *Interpretação* ainda não estão sendo inferidos pelo sistema na atual versão.

Proveniência

Parte de Interpretação. Sugestão sobre a origem dos sedimentos que formaram a rocha. É um conceito atômico, não tratado pelo sistema.

Ambiente deposicional

Parte de Interpretação. Sugestão sobre o processo de transporte e deposição dos sedimentos para formar a rocha. É um conceito atômico, não tratado pelo sistema.

Ambiente diagenético

Parte de Interpretação. Sugestão sobre os processos e ambiente onde a rocha se consolidou. É um conceito atômico gerado pela inferência do sistema.

Seqüência diagenética

Parte de Interpretação. Ordem em que os processos diagenéticos aconteceram para formar a rocha da amostra. É um conceito atômico, não tratado pelo sistema.

Nomenclatura

Agregação dos conceitos que descrevem a terminologia válida no domínio. É um conceito composto.

Constituinte diagenético

Parte de Nomenclatura. Lista os nomes de minerais diagenéticos reconhecidos pelo sistema. Restringe os valores possíveis das instâncias de *Composição Diagenética*. É um conceito atômico.

Constituinte detrítico

Parte de Nomenclatura. Lista os nomes de minerais detríticos ou fósseis reconhecidos pelo sistema. Restringe os valores possíveis das instâncias de *Composição Detrítica*. É um conceito atômico.

Macroporosidade

Parte de Nomenclatura. Lista todos os termos aceitáveis para descrever a ocorrência de poros na amostra. É um conceito atômico.

Feições geológicas

Parte de Nomenclatura. Lista todas as feições geológicas reconhecidas pelo sistema e utilizadas pelo usuário para descrição. Inclui nomes de hábitos minerais, estruturas, tamanho de grão, esfericidade, arredondamento, modificadores do arredondamento, distribuição de tamanho, forma, orientação, suporte, empacotamento, localização, modificador da localização, relações paragenéticas e modificadores de porosidade. É um conceito atômico.

Pacote

Agregação de instâncias de feições geológicas e/ou constituintes ou macroporosidade com significado cognitivo particular e um peso associado. Os pacotes não tem nomes únicos que os identifiquem. É um conceito composto.

Vértice

Corresponde a um ou mais dos constituintes existentes no modelo, definidos a partir do método de classificação que o vértice representa. Até o momento, o modelo prevê apenas a classificação composicional (Métodos de McBride e Folk) ou de proveniência (método de Dickinson) e os vértices representam constituintes detríticos previamente definidos. O usuário pode definir ou selecionar outros métodos a serem suportados pelo sistema que são incluídos de forma modular.

Polígonos

Agregação de 3, 4 ou 5 vértices que definem um polígono convexo interno a um triângulo de classificação. Um Polígono é associado a uma Classificação através da relação implica, utilizada para inferência juntamente com a relação fica-em, que associa as instâncias do usuário de Totais com Polígonos.

Dicionário de Relações**Parte-de**

Relação de agregação, onde todas as partes são necessárias para o conceito agregado. É a principal relação de construção da estrutura do modelo. Relaciona conceitos que constroem um outro, como as partes que compõem uma amostra.

Forma

Relação semelhante à agregação, exceto pelo fato de que o conceito composto tem um número variável de partes e bastam algumas dessas para construir o conceito. É o caso de feições que compõem um pacote.

Restringe

Conceitos que definem a construção de outros, por restringir os valores de seus atributos. É o caso de nomenclatura que define quais valores os atributos dos demais conceitos podem assumir.

Adiciona

Relação que define que as instâncias de um conceito serão adicionadas para compor outro. É o caso dos constituintes que são comados para construir os diversos totais dos grupos minerais.

Implica

Relação que define associações entre evidências e conclusões para a inferência do sistema. Essas evidências podem ser grafos de conhecimento que sugerem interpretações diagenéticas, ou podem ser os polígonos dos diagramas triangulares que indicam a classificação composicional da rocha. Nos grafos de conhecimento a relação é valorada, quantificando o Índice de Influência, ou o Peso de um conceito em relação ao outro. O Peso é utilizado pelas inferências do sistema.

Fica-em

Relação que define em quais dos polígonos dos triângulos serão plotados os totais calculados para uma amostra descrita. Permite definir, através da inferência, qual a classificação composicional de uma determinada amostra de rocha descrita pelo usuário.

Concept Identification	
Is-a	Object
Part-of	Concept Sample
Sample-ID	string(20), value-unique
Thin-ID	string(20)
Unit	string(60)
Basin	string(40)
Field	string(20)
Well	string(20)
Depth	real, range [0.0 - 9999.99]
Place	string(40)
State	string(2)
Country	string(15)
Use	string(80), list-of [Depositional, Diagenetic, Ecologic, Paleogeographic/paleogeologic, Provenance, Reservoir, Stratigraphic, Other use], MAX (N ocorrences)
Date	date, (DD/MM/YYYY)
Petrographer	string(20)

Concept Depositional-Environment-Process	
Is-a	Object
Part-of	Concept Sample
Sample-ID	string(20), one-of <Sample-ID>
Depositional-environment	string(256)

Concept Additional-Analysis	
Is-a	Object
Part-of	Concept Sample
Sample-ID	string(20), one-of <Sample-ID>
Analysis	string(80)
Description	string(256)

Concept Provenance-Implications	
Is-a	Object
Part-of	Concept Sample
Sample-ID	String(20), one-of <Sample-ID>
Provenance	String(256)

Concept Diagenetic-Environment-Process	
Is-a	Object
Part-of	Concept Sample
Sample-ID	string(20), one-of <Sample-ID>
Diagenetic-environment	string(256)

Concept Important-Observations	
Is-a	Object
Part-of	Sample
Sample-ID	string(20), one-of <Sample-ID>
Observation	string(256)

Concept Classification	
Is-a	Object
Part-of	Concept Sample
Sample-ID	string(20), one-of <Sample-ID>
GrainSize	string(20), one-of [gravel, very coarse sand, coarse sand, medium sand, fine sand, very fine sand, silt, clay]
Sorting	string(20), one-of [very well sorted, well sorted, sorted, moderately sorted, poorly sorted]
Accessory	string(80), one-of [Detrital-Constituent]
RockName	string(30), one-of [Folk's Classification]

Concept Macroscopic	
Is-a	Object
Part-of	Concept Sample
Sample-ID	string(20), one-of <Sample-ID>
Color	string(20)
Structures	string(90), list-of [parallel bedding, cross bedding, normal-graded bedding, reverse-graded bedding, massive bedding, parallel lamination, climbing lamination, liner lamination, flaser lamination, massive, bioturbation, fluidized, load, folded, fractured, stylolites, nodules, crystalline, crusts, roots, spotted, vesicular, amigdaloidal, flow, bioconstruction, bioaccumulation], MAX (3 occurrences)
Scales	string(45), list-of [<number and metric unit (mm, cm)> or <number - number and metric unit (mm, cm)>], range [0 – 100], MAX (3 occurrences), (ex.: 23 cm, 12 - 21 mm)
Grain-sizes	string(40), list-of [boulder, cobble, pebble, granule, gravel, very coarse sand, coarse sand, medium sand, fine sand, very fine sand, silt, clay], MAX(2 occurrences).
Sorting	string(20), one-of [very well sorted, well sorted, sorted, moderately sorted, poorly sorted]
Shape	string(30), one-of [equant, oblate, prolate] or [spheroidal, rod, blade, disc]
Orientation	string(20), one-of [homogeneous, parallel, oriented, imbricated, heterogeneous, chaotic]
Support	string(30), one-of [grain-supported, grain to matrix-supported, grain to cement-supported, matrix-supported, matrix to cement-supported, cement-supported]

Concept Microscopic	
Is-a	Object
Part-of	Concept Sample
Sample-ID	string(20), one-of <Sample-ID>
GrainSize	string(20), one-of [gravel, very coarse sand, coarse sand, medium sand, fine sand, very fine sand, silt, clay]
NumericGrainSize	string(15), one-of [<number and metric unit(mm)> or <number - number and metric unit(mm)>], range [0 – 100], (ex.: 23 mm, 12 - 21 mm)
ModalGrainSizes	string(80), list-of [gravel, very coarse sand, coarse sand, medium sand, fine sand, very fine sand, silt, clay], MAX (4 ocorrences)
NumericModalGrainSize	string(15), list-of [<number and metric unit(mm)> or <number - number and metric unit(mm)>], range [0 – 100], MAX (4 ocorrences), (ex.: 23 mm, 12 - 21 mm)
Structures	string(90), list-of [parallel bedding, cross bedding, normal-graded bedding, reverse-graded bedding, massive bedding, parallel lamination, climbing lamination, liner lamination, flaser lamination, massive, bioturbation, fluidized, load, folded, fractured, stylolites, nodules, crystalline, crusts, roots, spotted, vesicular, amigdaloidal, flow, bioconstruction, bioaccumulation], MAX (3 ocorrences)
Gravel	real, range [0.0 - 100.00]
Sand	real, range [0.0 - 100.00]
Mud	real, range [0.0 - 100.00]
Sorting	string(20), one-of [very well sorted, well sorted, sorted, moderately sorted, poorly sorted]
SortingNumeric	real, range [0.0 - 100.00]
Roundness	string(20), one-of [well rounded, rounded, sub-rounded, sub-angular, angular]
RoundnessModifiers	string(75), list-of [soft intraclasts, intraclasts, pressure dissolution, corrosion, deformation, replacement, overgrowths], MAX (3 ocorrences).
Sphericity	string(10), one-of [high, medium, low]
Orientation	string(20), one-of [parallel, imbricated, homogeneous, heterogeneous, oriented, chaotic]
Packing	string(15), one-of [loose, normal, tight, heterogeneous]
PackingIndex	one-of [<number and percent signal>], range [0 -100],
PointContacts	string(10), one-of [abundant, common, rare, trace] or (real, range [0.0 - 100.00])
LongContacts	string(10), one-of [abundant, common, rare, trace] or (real, range [0.0 - 100.00])
ConcavoConvexContacts	string(10), one-of [abundant, common, rare, trace] or (real, range [0.0 - 100.00])
SuturedContacts	string(10), one-of [abundant, common, rare, trace] or (real, range [0.0 - 100.00])
Support	string(30), one-of [grain-supported, grain to matrix-supported, grain to cement-supported, matrix-supported, matrix to cement-supported, cement-supported]

Concept Detrital-Description	
Is-a	Object
Part-of	Concept Sample
DetritalComposition	list-of [instance-of <Concept Detrital-Composition>]

Concept Pictures	
Is-a	Object
Picture-ID	string(20), value-unique
Sample-ID	string(20), one-of <Sample-ID>
Description	string(256)
Picture	BLOB, bitmap picture

Concept Detrital-Composition	
Is-a	Object
Part-of	Concept Sample
Conjunto-de	Concept Detrital-Constituents
Sample-ID	string(20), one-of <Sample-ID>
MineralName	string(80), one-of [Detrital-Constituent]
ConstituentSet	string(40), one-of [Detrital quartz, Detrital feldspar, Plutonic rock fragments, Volcanic rock fragments, Sedimentary rock fragments, Metamorphic rock fragments, Micas/chlorite, Heavy minerals, Intrabasinal grains, Detrital matrix, Other detrital constituents]
Location	string(40), one-of [in metamorphic rock fragment, in plutonic rock fragment, in sedimentary rock fragment, in volcanic rock fragment, in intrabasinal fragment, as monomineralic grain]
Amount	Real, range [0.0 - 100.00]
NominalAmount	string(10), one-of [abundant, common, rare, trace]
Description	string(256)

Concept Pictures-Description	
Is-a	Object
Part-of	Concept Sample
Pictures	list-of [instance-of <Concept Pictures>]

Concept Diagenese-Sequence	
Is-a	Object
Part-of	Concept Sample
Sample-ID	string(20), one-of <Sample-ID>
Diagenese-Description	string(512)

Concept Diagenetic-Description	
Is-a	Object
Part-of	Concept Sample
DiageneticComposition	list-of [instance-of <Concept Diagenetic-Composition>]

Concept Diagenetic-Composition	
Is-a	Object
Part-of	Concept Diagenetic-Description
Conjunto-de	Concept Diagenetic-Constituents
Sample-ID	String(20), one-of <Sample-ID>
MineralName	String(80), one-of [Diagenetic-Constituent]
ConstituentSet	string(40), one-of [Silica, Feldspar, Infiltrated clays, Pseudomatrix clays, Authigenic clays, Zeolites, Carbonates, Sulphates, Sulfides, Iron oxides/hydroxides, Titanium minerals, Other diagenetic constituents]
Habit	String(20), one-of [Habit-Name]
Amount	real, range [0.0 - 100.00]
NominalAmount	String(20), one-of [abundant, common, rare, trace]
Location	string(40), one-of [intergranular continous pore-lining, intergranular discontinous pore-lining, intergranular pore-filling, intergranular discrete, intergranular displacive, intragranular replacive, intragranular pore-lining, intragranular pore-filling, intragranular discrete crystals, intragranular displacive, moldic pore-lining, moldic pore-filling, oversized pore-lining, oversized pore-filling, grain fracture-filling, grain fracture-lining, rock fracture-filling, rock fracture-lining, concretions/nodules, massive beds/lenses]
Modifier	String(40), one-of [dissolved, zoned, fractured, recrystallized]
ParageneticRelations	string(120), one-of [Covering <one-of [Diagenetic-Constituent]>, Covering <one-of [Detrital-Constituent]>, Covered by <one-of [Diagenetic-Constituent]>, Replacing grain of <one-of [Detrital-Constituent]>, Replacing matrix of <one-of [Detrital-Constituent]>, Replacing <one-of [Diagenetic-Constituent]>, Replaced by <one-of [Diagenetic-Constituent]>, Alternated with <one-of [Diagenetic-Constituent]>, Engulfing <one-of [Diagenetic-Constituent]>, Engulfing <one-of [Detrital-Constituent]>, Engulfed by <one-of [Diagenetic-Constituent]>, Intergrown with <one-of [Diagenetic-Constituent]>, Overgrowing <one-of [Diagenetic-Constituent]>, Overgrowing <one-of [Detrital-Constituent]>, Overgrown by <one-of [Diagenetic-Constituent]>, Expanding <one-of [Detrital-Constituent]>, Compacted from <one-of [Detrital-Constituent]>, Within intergranular primary porosity , Within intergranular porosity after <one-of [Diagenetic-Constituent]>, Within intergranular porosity after detrital matrix , Within intragranular porosity in <one-of [Detrital-Constituent]>, Within intracrystalline porosity in <one-of [Diagenetic-Constituent]>, Within moldic porosity after <one-of [Detrital-Constituent]>, Within moldic porosity after <one-of [Diagenetic-Constituent]>, Within shrinkage porosity of <one-of [Detrital-Constituent]>, Within shrinkage porosity of <one-of [Diagenetic-Constituent]>, Within grain fracture porosity in <one-of [Detrital-Constituent]>, Within rock fracture porosity in <one-of [Detrital-Constituent]>)

ParageneticRelation ConstituentSet	string(40), one-of [Silica, Feldspar, Infiltrated clays, Pseudomatrix clays, Authigenic clays, Zeolites, Carbonates, Sulphates, Sulfides, Iron oxides/hydroxides, Titanium minerals, Other diagenetic constituents, Detrital quartz, Detrital feldspar, Plutonic rock fragments, Volcanic rock fragments, Sedimentary rock fragments, Metamorphic rock fragments, Micas/chlorite, Heavy minerals, Intrabasinal grains, Detrital matrix, Other detrital constituents]
Description	String(256)

Concept Diagenetic-Nomenclature	
Is-a	Object
Part-of	Concept Sample
MineralName	list-of [instance-of < Concept Diagenetic-Constituents >]

Concept Diagenetic-Constituents	
Is-a	Object
MineralName	String(80)
MineralSet	string(40), one-of [Silica, Feldspar, Infiltrated clays, Pseudomatrix clays, Authigenic clays, Zeolites, Carbonates, Sulphates, Sulfides, Iron oxides/hydroxides, Titanium minerals, Other diagenetic constituents]

Concept Habits-Nomenclature	
Is-a	Object
Part-of	Concept Sample
MineralName	list-of [instance-of <Concept Habits>]

Concept Habits	
Is-a	Object
HabitName	string(20), one-of [Blocky, Booklet, Botryoid, Bridge, Coarsely-crystalline, Coarse mosaic, Coating, Discrete crystal, Fibro-radiated, Fibrous, Fine mosaic, Framboid, Ingrowth, Internal sediment, Lamella, Large rhomb, Massive, Meniscus, Microcrystalline, Ooid, Outgrowth, Overgrowth, Parallel-prismatic, Pelletoid, Peloid, Pigment, Poikilotopic, Prismatic, Prismatic-radiated, Radiated, Rim, Rosette, Sheaf, Small rhomb, Spherulite, Vermicule]

Concept Detrital-Nomenclature	
Is-a	Object
Part-of	Concept Sample
MineralName	list-of [instance-of <Concept Detrital-Constituents>]

Concept Detrital-Constituents	
Is-a	Object
MineralName	string(80)
MineralSet	string(40), one-of [Detrital quartz, Detrital feldspar, Plutonic rock fragments, Volcanic rock fragments, Sedimentary rock fragments, Metamorphic rock fragments, Micas/chlorite, Heavy minerals, Intrabasinal grains, Detrital matrix, Other detrital constituents]

Concept Macroporosity-Description	
Is-a	Object
Part-of	Concept Sample
Macroporosity	list-of [instance-of <Concept Macroporosity>]

Concept Microporosity-Description	
Is-a	Object
Part-of	Concept Sample
Microporosity	list-of [instance-of <Concept Microporosity>]

Concept Microporosity	
Is-a	Object
Part-of	Concept Sample
Sample-ID	string(20), one-of <Sample-ID>
MineralName	string(80), one-of [<Diagenetic-Constituent>, <Detrital-Constituent>]
ConstituentSet	string(40), one-of [Silica, Feldspar, Infiltrated clays, Pseudomatrix clays, Authigenic clays, Zeolites, Carbonates, Sulphates, Sulfides, Iron oxides/hydroxides, Titanium minerals, Other diagenetic constituents, Detrital quartz, Detrital feldspar, Plutonic rock fragments, Volcanic rock fragments, Sedimentary rock fragments, Metamorphic rock fragments, Micas/chlorite, Heavy minerals, Intrabasinal grains, Detrital matrix, Other detrital constituents]
Amount	real, range [0.0 - 100.00]
NominalAmount	string(10), one-of [abundant, common, rare, trace]

Concept Macroporosity	
Is-a	Object
Part-of	Concept Sample
Sample-ID	string(20), one-of <Sample-ID>
Porosity	string(20), one-of [Intergranular Porosity, Intragranular Porosity, Intracrystalline Porosity, Intercrystalline Porosity, Moldic Porosity, Grain fracture Porosity, Rock fracture Porosity, Shrinkage Porosity, Oversized Porosity, Lamellar Porosity]
Amount	real, range [0.0 - 100.00]
NominalAmount	string(20), one-of [abundant, common, rare, trace]
Location	string(30), one-of [Conceptwork, Interstitial, Conceptwork and Interstitial]
ParageneticRelations	string(120), one-of [Primary , Dissolution of: <one-of [Detrital-Constituent]>, Dissolution of: <one-of

	[Diagenetic-Constituent]>, Within <one-of [Detrital-Constituent]>, Within <one-of [Diagenetic-Constituent]>, Contraction of <one-of [Detrital-Constituent]>, Contraction of <one-of [Diagenetic-Constituent]>, Fracturing of <one-of [Detrital-Constituent]>, Fracturing of <one-of [Diagenetic-Constituent]>, Decompaction]
ParageneticRelation ConstituentSet	string(40), one-of [Silica, Feldspar, Infiltrated clays, Pseudomatrix clays, Authigenic clays, Zeolites, Carbonates, Sulphates, Sulfides, Iron oxides/hydroxides, Titanium minerals, Other diagenetic constituents, Detrital quartz, Detrital feldspar, Plutonic rock fragments, Volcanic rock fragments, Sedimentary rock fragments, Metamorphic rock fragments, Micas/chlorite, Heavy minerals, Intrabasinal grains, Detrital matrix, Other detrital constituents]
Modifier	string(40), one-of [Reduced by compaction, Reduced by cementation, Enlarged by dissolution]
Description	string(256)

Concept Total	
Is-a	Object
Part-of	Concept Sample
Sample-ID	string(20), one-of <Sample-ID>
Plutonic-RF	real, range [0.0 - 100.00]
Volcanic-RF	real, range [0.0 - 100.00]
Metamorphic-RF	real, range [0.0 - 100.00]
Sedimentary-RF	real, range [0.0 - 100.00]
Diagenetic	real, range [0.0 - 100.00]
Intergranular-volume	real, range [0.0 - 100.00]
Cement-volume	real, range [0.0 - 100.00]
Matrix-volume	real, range [0.0 - 100.00]
Grain-volume	real, range [0.0 - 100.00]
Macroporosity-volume	real, range [0.0 - 100.00]
Microporosity-volume	real, range [0.0 - 100.00]
	Volume %
	Indice %

Modelo dos Grafos de Conhecimento para Interpretação de Ambiente Diagenético

Diagenetic Environments	Threshold	Chunks	Weights
Deep Burial Diagenesis (Deep mesodiagenesis)	6	Intense compaction in rigid framework	6
		Albite	3
		Illite	5
		Illitization	5
		Feldspar illitization	3
Continental Meteoric Eodiagenesis Under Dry Climate	6	Iron oxide	1
		Infiltrated clays	3
		Calcrete	5
		Dolomite	3
		Silcrete	6
		Sulphate	6
		Dolocrete	5
Eodiagenesis Under Marine Conditions	6	Glauconite	5
		Berthierine/chamosite	3
		Pyrite	3
		Carbonate	3
		Phosphate	5
		Glauconite matrix	3
		Package7 SemNome	3
Early Eodiagenesis Under Mixing Between Marine and Meteoric Waters	6	Dolomite	5
		Berthierine/chamosite	3
Telodiagenesis Under Meteoric Conditions	6	Dissolution	3
		Kaolinization	5
		Oxidation	5
		Iron oxide cover	5
		Calcite	3
Continental Meteoric Eodiagenesis Under Wet Climate	6	Kaolinite cement	3
		Kaolinization replacive	5
		Kaolinization displacive	6
		Siderite	3
		Iron oxides/hydroxides (Laterites/Ferricretetes)	1
		Matrix kaolinization	3

Modelo de Triângulos de Classificação Composicional

13/Out/99

Chave para leitura do modelo descrito em CLOS:

*(Autor (Nome dos vértices)
 ((Lista de coordenadas cartesianas que constroem o polígono)
 Nome da Classe1 da Rocha)
 (Lista de coordenadas cartesianas que constroem o polígono)
 Nome da Classe2 da Rocha)
))*

Classificação de FOLK

```
("Folk" ("Quartz" "Feldspars" "Allother")
(((50 86.6025403784438) (52.5 82.2724133595217) (47.5
82.2724133595217) (50 86.6025403784438)) "Quartz,Metaquartzite")
(((47.5 82.2724133595217) (50 82.2724133595217) (50 64.9519052838329)
(37.5 64.9519052838329) (47.5 82.2724133595217)) "Subarkose")
(((50 82.2724133595217) (52.5 82.2724133595217) (62.5
64.9519052838329) (50 64.9519052838329) (50 82.2724133595217))
"Sublitharenite")
(((37.5 64.9519052838329) (43.75 64.9519052838329) (25 0.0) (0 0.0)
(37.5 64.9519052838329)) "Arkose")
(((43.75 64.9519052838329) (50 64.9519052838329) (50 0.0) (25 0.0)
(43.75 64.9519052838329)) "Lithic Arkose")
(((50 64.9519052838329) (56.25 64.9519052838329) (75 0.0) (50 0.0)
(50 64.9519052838329)) "Feldspathic Litharenite")
(((56.25 64.9519052838329) (62.5 64.9519052838329) (100 0.0) (75 0.0)
(56.25 64.9519052838329)) "Litharenite")
)
```

```
("Folk2" ("Sedimentary" "Volcanic" "Metamorphic")
(((50 86.6025403784438) (75 43.3012701892219) (50 28.8675134594813)
(25 43.3012701892219) (50 86.6025403784438)) "Sedarenite")
(((25 43.3012701892219) (50 28.8675134594813) (50 0.0) (0 0.0) (25
43.3012701892219)) "Volcanic Arenite")
(((50 28.8675134594813) (75 43.3012701892219) (100 0.0) (50 0.0) (50
28.8675134594813)) "Phyllarenite")
)
```

```
("Folk3" ("Sandstone Shale" "Carbonate" "Chert")
(((50 86.6025403784438) (75 43.3012701892219) (50 28.8675134594813)
(25 43.3012701892219) (50 86.6025403784438)) "Sandstone, Shales
Arenites")
(((25 43.3012701892219) (50 28.8675134594813) (50 0.0) (0 0.0) (25
43.3012701892219)) "Calclithite")
(((50 28.8675134594813) (75 43.3012701892219) (100 0.0) (50 0.0) (50
28.8675134594813)) "Chertarenite")
)
```

Classificação de McBride

```
( "McBride" ("quartz-chert-quartzite" "feldspar" "rock-fragments")
  (((50.0 86.6025403784438) (52.5 82.2724133595217) (50.0
77.9422863405995) (47.5 82.2724133595217) (50.0 86.6025403784438))
"Quartzarenite")
  (((47.5 82.2724133595217) (50 77.9422863405995) (50 69.2820323027551)
(42.5 56.2916512459885) (37.5 64.9519052838329) (47.5
82.2724133595217)) "Subarkose")
  (((52.5 82.2724133595217) (62.5 64.9519052838329) (57.5
56.2916512459885) (50 69.2820323027551) (50 77.9422863405995) (52.5
82.2724133595217)) "Sublitharenite")
  (((37.5 64.9519052838329) (42.5 56.2916512459885) (10 0) (0 0) (37.5
64.9519052838329)) "Arkose")
  (((50 69.2820323027551) (57.5 56.2916512459885) (50 43.3012701892219)
(42.5 56.2916512459885) (50 69.2820323027551)) "Lithic Subarkose")
  (((62.5 64.9519052838329) (100 0) (90 0) (57.5 56.2916512459885)
(62.5 64.9519052838329)) "Litharenite")
  (((42.5 56.2916512459885) (50 43.3012701892219) (50 0) (10 0) (42.5
56.2916512459885)) "Lithic Arkose")
  (((57.5 56.2916512459885) (90 0) (50 0) (50 43.3012701892219) (57.5
56.2916512459885)) "Feldspathic Litharenite")
)
```

```
( "Rochas com Cascalho" ("Cascalho" "Lama" "Areia")
  (((50 86.6025403784438) (60 69.2820323027551) (40 69.2820323027551)
(50 86.6025403784438)) "C")
  (((40 69.2820323027551) (50 69.2820323027551) (50 25.9807621135332)
(15 25.9807621135332) (40 69.2820323027551)) "Cl")
  (((50 69.2820323027551) (58 69.2820323027551) (78 25.9807621135332)
(50 25.9807621135332) (50 69.2820323027551)) "Cla")
  (((58 69.2820323027551) (60 69.2820323027551) (85 25.9807621135332)
(78 25.9807621135332) (58 69.2820323027551)) "Ca")
  (((15 25.9807621135332) (50 25.9807621135332) (50 4.33012701892219)
(2.5 4.33012701892219) (15 25.9807621135332)) "Lc")
  (((50 25.9807621135332) (78 25.9807621135332) (88 4.33012701892219)
(50 4.33012701892219) (50 25.9807621135332)) "Alc")
  (((78 25.9807621135332) (80 25.9807621135332) (97.5 4.33012701892219)
(88 4.33012701892219) (78 25.9807621135332)) "Ac")
  (((2.5 4.33012701892219) (12 4.33012701892219) (10.4
0.866025403784438) (0.5 0.866025403784438) (2.5 4.33012701892219))
"L(c)")
  (((12 4.33012701892219) (50 4.33012701892219) (50 0.866025403784438)
(10.4 0.866025403784438) (12 4.33012701892219)) "La(c)")
  (((50 4.33012701892219) (88 4.33012701892219) (89.6
0.866025403784438) (50 0.866025403784438) (50 4.33012701892219))
"Al(c)")
  (((88 4.33012701892219) (97.5 4.33012701892219) (99.5
0.866025403784438) (89.6 0.866025403784438) (88 4.33012701892219))
"A(c)")
  (((0.5 0.866025403784438) (10.4 0.866025403784438) (10 0.0) (0 0.0)
(0.5 0.866025403784438)) "L")
  (((10.4 0.866025403784438) (50 0.866025403784438) (50 0.0) (10 0.0)
(10.4 0.866025403784438)) "La")
  (((50 0.866025403784438) (89.6 0.866025403784438) (90 0.0) (50 0.0)
(50 0.866025403784438)) "Al")
  (((89.6 0.866025403784438) (99.5 0.866025403784438) (100 0.0) (90
0.0) (89.6 0.866025403784438)) "A")
```

)

("Rochas sem Cascalho" ("Cascalho" "Lama" "Areia")
 (((50 86.6025403784438) (55 77.9422863405995) (45 77.9422863405995)
 (50 86.6025403784438)) "A")
 (((45 77.9422863405995) (48.334 77.9422863405995) (41.67
 43.3012701892219) (25 43.3012701892219) (45 77.9422863405995)) "Ay")
 (((48.334 77.9422863405995) (51.666 77.9422863405995) (58.33
 43.3012701892219) (41.67 43.3012701892219) (48.334 77.9422863405995))
 "Al")
 (((51.666 77.9422863405995) (55 77.9422863405995) (75
 43.3012701892219) (58.333 43.3012701892219) (51.666 77.9422863405995))
 "As")
 (((25 43.3012701892219) (41.67 43.3012701892219) (35.006
 8.66025403784438) (5 8.66025403784438) (25 43.3012701892219)) "Ya")
 (((41.67 43.3012701892219) (58.33 43.3012701892219) (64.994
 8.66025403784438) (35.006 8.66025403784438) (41.67 43.3012701892219))
 "La")
 (((58.33 43.3012701892219) (75 43.3012701892219) (95
 8.66025403784438) (64.994 8.66025403784438) (58.33 43.3012701892219))
 "Sa")
 (((5 8.66025403784438) (35.006 8.66025403784438) (33.34 0.0) (0 0.0)
 (5 8.66025403784438)) "Y")
 (((35.006 8.66025403784438) (64.994 8.66025403784438) (66.66 0.0)
 (33.34 0.0) (35.006 8.66025403784438)) "L")
 (((64.994 8.66025403784438) (95 8.66025403784438) (100 0.0) (66.66
 0.0) (64.994 8.66025403784438)) "S")
)

Classificação de Dickinson

("Dickinson I" ("Qt" "F" "L")
 (((50 86.6025403784438) (51.5 84.0044641670905) (45.351812 40.330769)
 (41 71.014083110324) (50 86.6025403784438)) "Cration Interior -
 Continental Block")
 (((51.5 84.0044641670905) (87.5 21.650635094611) (30.954157 21.19936)
 (51.5 84.0044641670905)) "Recycled Orogenic - Recycled Orogen")
 (((41 71.014083110324) (45.351812 40.330769) (30.954157 21.19936)
 (22.5 38.9711431702997) (41 71.014083110324)) "Transitional
 Continental - Continental Block")
 (((22.5 38.9711431702997) (30.954157 21.19936) (15 0) (0 0) (22.5
 38.9711431702997)) "Basement Uplift - Continental Block")
 (((30.954157 21.19936) (65.177419 15.934243) (21.868371 9.126466)
 (30.954157 21.19936)) "Dissected Arc - Magmatic Arc")
 (((65.177419 15.934243) (87.5 21.650635094611) (50 0) (15 0)
 (21.868371 9.126466) (65.177419 15.934243)) "Transitional Arc -
 Magmatic Arc")
 (((87.5 21.650635094611) (100 0) (50 0) (87.5 21.650635094611))
 "Undissected Arc - Magmatic Arc")
)

("Dickinson II" ("Qm" "F" "Lt")
 (((50 86.6025403784438) (55.5 77.076260936815) (49.792798 63.54118)
 (40 69.2820323027551) (50 86.6025403784438)) "Cratlon Interior -
 Continental Block")
 (((55.5 77.076260936815) (71 50.2294734194974) (57.469108 42.667171)
 (47.22734 57.456998) (55.5 77.076260936815)) "Quartzose Recycled -
 Recycled Orogen")
 (((40 69.2820323027551) (49.792798 63.54118) (40.77929 42.164951)
 (28.5 49.363448015713) (40 69.2820323027551)) "Transitional
 Continental - Continental Block")
 (((47.22734 57.456998) (69.445429 25.359943) (40.77929 42.164951)
 (47.22734 57.456998)) "Mixed - Magmatic Arc")
 (((28.5 49.363448015713) (40.77929 42.164951) (23 0) (0 0) (28.5
 49.363448015713)) "Basement Uplift - Continental Block")
 (((71 50.2294734194974) (85.5 25.1147367097487) (74.556725 17.97604)
 (57.469108 42.667171) (71 50.2294734194974)) "Transitional Recycled -
 Recycled Orogen")
 (((40.77929 42.164951) (69.445429 25.359943) (31.077976 19.157537)
 (40.77929 42.164951)) "Dissected Arc - Magmatic Arc")
 (((85.5 25.1147367097487) (100 0) (87 0) (74.556725 17.97604) (85.5
 25.1147367097487)) "Lithic Recycled - Recycled Orogen")
 (((69.445429 25.359943) (81.513385 7.926212) (53 0) (23 0) (31.077976
 19.157537) (69.445429 25.359943)) "Transitional Arc - Magmatic Arc")
 (((81.513385 7.926212) (87 0) (53 0) (81.513385 7.926212))
 "Undissected Arc - Magmatic Arc")

)

Anexo 5 Validação qualitativa dos modelos

O modelo do sistema foi validado através de três diferentes procedimentos. O primeiro foi realizado através de uma contínua validação do modelo pelo especialista; o segundo através de uma amostragem do que devem vir a serem os usuários finais do sistema; o terceiro através da utilização do sistema sob supervisão do especialista.

1. Validação pelo especialista

O especialista validou cada uma das etapas de construção do modelo. Na construção da partonomia de conceitos realizada a partir dos casos obtidos do especialista, o modelo foi confrontado com 15 casos completamente descritos para garantir a capacidade de representar toda a informação utilizada pelo especialista. A partir dali, mais vinte casos foram descritos no formato do modelo, para confirmar sua completeza.

Outros atributos ausentes foram identificados ao ser confrontada a partonomia de conceitos com o conjunto de grafos de conhecimento. Muitos atributos descritos nos grafos de conhecimento não haviam sido representados na partonomia. O especialista ampliou a capacidade de inferência do modelo, incluindo mais três atributos e dezenas de valores não previstos.

Ao ser concluída a construção dos grafos de conhecimento, o sistema foi colocado em uso por estudantes de geologia, sob supervisão do especialista. Nenhum outro atributo foi acrescentado ou alterado desde então (10 meses).

2. Validação por profissionais de geologia de reservatório

O sistema foi apresentado através de um breve treinamento aos profissionais da Divisão de Reservatórios do Centro de Ensino e Pesquisa da Petrobrás (RJ). Após a apresentação, disponibilizado para descrição por trinta dias, com acompanhamento do especialista (cinco dias) e do programador (30 dias). As observações realizadas pelos profissionais nesse período foram registradas (SILVA, 1999) e aquelas passíveis para essa fase de desenvolvimento foram posteriormente incorporadas ao sistema.

A avaliação do modelo descritivo foi extremamente positiva quanto à completeza e terminologia utilizada. Algumas observações, no entanto exigiram modificações do modelo:

- Inclusão de dois novos atributos e quatro novos valores de atributos na descrição, o que foi realizado facilmente;
- Remodelagem na forma de descrever as relações paragenéticas dos constituintes. O especialista revisou a forma de descrição e confirmou os problemas apontados nas relações paragenéticas, que inviabilizavam a inferência com essas informações. A solução exigiu longas seções de aquisição de conhecimento e propostas de modelagem, com posteriores modificações no modelo e na interface do sistema.
- Foram apontados problemas na utilização do número da amostra como chave primária para a descrição, uma vez que, de uma mesma amostra de rocha, podem ser realizadas mais de uma descrição, com diferentes finalidades. O sistema garante que cada nova descrição possua a *Identificação da Amostra* como identificador único. O usuário deve manter a consistência quanto à origem daquela descrição (utilizando rótulos similares como C564a, C564b, etc.).

A avaliação da interface registrou:

- A interface é intuitiva e de fácil aprendizado, porém foi considerada mais detalhada do que as necessidades do dia a dia de descrição de amostras.
- Esclarecimento quanto a semântica de alguns termos, como a diferença entre *modal-grain-size*, *main/single-size-mode*; a adequação do termo *classification* para tipo de rocha, etc.
- Alguns campos poderiam ter preenchimento automático, deduzido a partir dos valores entrados em outros campos, como *packing-index* a partir do valor fornecido para *packing*. Essas modificações devem ser realizadas somente em etapas posteriores deste projeto.
- Algumas feições geológicas são de difícil reconhecimento, sendo necessário que o sistema auxilie nesse reconhecimento. Isso pode ser realizado com a associação de tabelas visuais comparativas aos respectivos campos. Essa funcionalidade já está prevista no módulo de ajuda do conhecimento, embora não estivesse implementada naquela versão apresentada.
- A interface do contador de pontos foi considerada de difícil compreensão e uso. Essa avaliação levou a uma completa remodelagem do Contador de Pontos, homogeneizando sua interface em relação ao resto do sistema.
- Diversas funcionalidades de consulta foram sugeridas e posteriormente implementadas na Interface do Banco de Dados.
- Foi ressaltada a importância das imagens associadas às amostras. O sistema deveria prever um sistema de gerenciamento de imagens mais sofisticado do que o atual, que aproveitasse plenamente os recursos dos bancos de dados comerciais para gerenciamento de imagens.
- Finalmente o sistema deveria prever três níveis de segurança de acesso às amostras descritas, permitindo que apenas o petrógrafo responsável pela descrição seja capaz de alterar uma amostra descrita. Para a consulta, somente a equipe da qual ele faz parte e as chefias possam consultar o conteúdo das amostras. Essas restrições de acesso são garantidas pelo banco de dados que armazena as amostras.

A avaliação das funções de inferência levou às seguintes sugestões:

- A interpretação de ambiente diagenético deveria ser acompanhada por uma explicação de como a interpretação foi alcançada, incluindo quais feições geológicas foram encontradas e que importância elas tiveram nessa interpretação. Essa funcionalidade é implementada no algoritmo de inferência, através da apresentação das feições geológicas encontradas na amostra.
- A interpretação de ambiente diagenético deveria ser realizada sobre mais de uma amostra por vez e não sobre uma única amostra, de forma a aumentar a confiabilidade do resultado da inferência. Essa necessidade já havia sido detectada pelo especialista, que considerou mais viável integrar as interpretações já realizadas sobre um conjunto de amostras do que realizar a análise sobre um conjunto de amostras não interpretadas. A integração das interpretações não é uma tarefa trivial de expansão da funcionalidade do sistema e deverá ser estudada em uma fase posterior desse projeto.

O sistema apresentado aos profissionais do CENPES correspondeu a uma versão inicial do sistema, que, embora operacional, não estava livre de erros que permitisse sua utilização plena pelos geólogos. Uma versão final do sistema irá necessitar um período de avaliação em condições reais de utilização, com acompanhamento de modo a avaliar o comportamento do sistema. A validação, no entanto, apontou diversas melhorias a serem introduzidas no sistema, algumas delas já efetivadas na versão atual.

3. Validação por estudantes de geologia

O sistema vem sendo utilizado desde sua primeira versão por estudantes de Geologia (auxiliares de pesquisa) para descrição de amostras de rocha em projetos de avaliação de unidades sedimentares. Essa validação tem apontado inúmeros erros do sistema, de funcionamento da interface, de comunicação com o banco de dados entre outros. Foram ainda sugeridas melhorias para facilitar a utilização da interface.

A atualização do sistema não é realizada de forma contínua. As sugestões são registradas e acumuladas para as etapas de atualizações do sistema. Para a atualização, uma versão operacional do sistema é preservada para utilização pelos estudantes, enquanto é gerada outra versão com todas as modificações necessárias. O sistema já passou por três grandes etapas de atualização até o momento.

Além de problemas de funcionalidade do sistema, os estudantes de geologia realizam atualmente a validação do método de inferência. As amostras são completamente descritas e aplicado o método de inferência que é, por sua vez, avaliado pelo especialista. Não foram detectadas discordâncias (erros) na interpretação de 12 amostras armazenadas no banco de dados. Para outras cinco amostras o sistema não alcançou interpretação satisfatória, por problemas de informações incompletamente descritas. Está sendo avaliado se a falta de informação resulta de dificuldades de utilização da interface ou na limitação de conhecimento dos estudantes para reconhecer as feições a serem descritas.

O número de amostras descrita não permite até o momento validar completamente o mecanismo de inferência do sistema em uma situação de uso normal previsto para o sistema. Alguns fatores podem influenciar na confiabilidade das interpretações fornecidas pelo sistema:

- Apesar do sistema disparar adequadamente o grafo de conhecimento que contem a interpretação do ambiente deposicional, não foi realizada uma avaliação adequada da *explicação* associada a conclusão do sistema. A justificativa da conclusão é tão importante como a própria. No momento, as feições descritas nos grafos de conhecimento e encontradas na descrição do usuário são apresentadas como justificativa à interpretação alcançada. Porém, como o sistema baseia-se em *pacotes* e não em *feições* para atingir as conclusões, a explicação fornecida pelo sistema pode não ser compreendida pelo usuário do sistema. Será necessário uma avaliação mais cuidadosa da compreensão da explicação pelo usuário, com provável proposta de uma forma de justificativa mais adequada para o módulo de inferência.
- Os estudantes de geologia que validaram o sistema até o momento foram treinados e acompanhados pelo especialista. Deve-se considerar que esses estudantes devem ter incorporado, até certo ponto, o *estilo* de descrição do especialista, com a mesma utilização de terminologia e ênfase em algumas características da rocha.

Profissionais treinados sob outras condições podem analisar amostras com estilos distintos. É esperado que essas diferenças afetem o funcionamento do sistema de alguma forma, porém não é possível, nessa fase do projeto, detectar o efeito dessas diferenças sobre as capacidades inferenciais do sistema.

- Existe uma relação de custo-benefício entre o tempo despendido na descrição de uma amostra e a utilização da informação obtida através da descrição. Com a tarefa de descrição é extremamente difícil e tediosa, a maioria dos profissionais de geologia analisados nesse projeto, que utilizam a Petrografia como ferramenta, o fazem de forma mais superficial do que seria necessário para obter informação relevante sobre o reservatório de petróleo. Existe uma real expectativa que a facilidade de descrição proporcionada pelo sistema PetroGrapher incentive o geólogo a realizar descrições mais detalhadas. Se essa expectativa não for correspondida, o sistema será utilizado apenas como um repositório de dados de descrições, não sendo capaz de atingir inferências úteis para a maioria das amostras descritas.

A influência desses fatores sobre a qualidade das conclusões inferidas pelo sistema só poderão ser adequadamente consideradas num estudo do sistema sob condições reais de utilização, com usuários com diferentes formações e níveis de conhecimento. Nessas condições, a correção do sistema poderá ser medida objetivamente, bem como a aceitação do usuário das conclusões fornecidas pelo sistema.

Bibliografia

- ABEL, M. **Introdução aos sistemas especialistas:** descrição dos sistemas MYCIN, PROSPECTOR, DIPMETER ADVISOR e MuPROSPECTOR. Porto Alegre: PGCC da UFRGS, 1986. Trabalho Individual.
- ABEL, M. **Um sistema especialista para identificação e classificação de turbiditos.** Porto Alegre: CPGCC da UFRGS, 1988. 202p. Dissertação de Mestrado.
- ABEL, M. Knowledge processing in geology: major problems and future trends. In: LATIN AMERICAN CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN PETROLEUM EXPLORATION AND PRODUCTION, 1991, Rio de Janeiro. **Papers...** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Petróleo, 1991. p. 272-279.
- ABEL, M.; CASTILHO, J.M.V. Hybrid information systems: integrating data and knowledge management. In: CONFERENCIA INTERNACIONAL DE LA SOCIEDAD CHILENA DE CIENCIA DE LA COMPUTACION, 13., 1993, La Serena, Chile. **Actas...** Santiago: Sociedad Chilena de Ciencia de la Computacion, 1993. p. 137-147.
- ABEL, M.; CASTILHO, J.M.V.; CAMPBELL, J. Analysis of expertise for implementing geological expert systems. In: WORLD CONFERENCE IN EXPERT SYSTEMS, 4., 1998, Mexico City. **Proceedings...** New York: Cognizant Communication Offices, 1998. v. 1, p. 170-177.
- ABEL, M.; REATEGUI, E.B.; CASTILHO, J.M.V. Using case-based reasoning in a system that supports petrographic analysis. In: BRAUNSCHWEIG, B.; BREMDAL, B. **Artificial Intelligence in the Petroleum Industry.** Paris: Editions Technip, 1996. p.159-172.
- ABEL, M.; REATEGUI, E.B.; CASTILHO, J.M.V.; CAMPBELL, J. Evaluating case-based reasoning in a geological domain. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DATABASE AND EXPERT SYSTEMS APPLICATIONS, 6., 1995, London. **Proceedings...** Berlin: Springer-Verlag, 1995. p. 364-373. (Lecture Notes in Computer Science, v. 978).
- ADAMS, A.E.; MACKENZIE, W.S.; GUILFORD, C. **Atlas of sedimentary rocks under microscope.** New York: Longman Scientific & Technical, 1995. 104p.
- ADAMS, J.B. Probabilistic reasoning and certainty factors. In: BUCHANAN, B. G.; SHORTLIFFE, E. H. **Rule-based expert systems: the MYCIN experiments of the Stanford heuristic programming project.** Reading: Addison-Wesley, 1984. p.263-271.
- AGNEW, N.M.; FORD, K.M.; HAYES, P.J. Expertise in Context: personally constructed, socially selected, and reality-relevant? **International Journal of Expert Systems**, [S.l.], v. 7, n. 1, p.65-88, 1994.
- ALLPORT, A. Visual attention. In: POSNER, M. **Foundation of cognitive science.** Cambridge: MIT Press, 1989. p.631-682.
- ANDERSON, B.F. Knowing, learning and thinking. **Cognitive Psychology.** London: Academic Press, 1975.
- ANDERSON, J.R. **Cognitive psychology and its implications.** New York: W.H. Freeman, 1995.
- ANGELE, J.; FENSEL, D.; STUDER, R. Domain and task modeling in MIKE. In: SUTCLIFFE, A. **Domain knowledge for Interactive System Design.** [S.l.]: Chapman & Hall, 1996.
- ANZAI, Y. Learning and use of representations for physics expertise. In: ERICSSON, K. A.; SMITH, J. **Toward a general theory of expertise: prospects and limits.** New York: Cambridge University Press, 1991.

- BAREISS, E.R. **Exemplar-based knowledge acquisition**. Boston: Academic Press, 1989.
- BAYGÜN, B.; LUTHI, S.M.; BRYANT, I.D. Applications of neural networks and fuzzy logic in geological modeling of a mature hydrocarbon reservoir. In: BRAUNSCHWEIG, B.; BRENDAL, B. **Artificial Intelligence in the Petroleum Industry: symbolic and Computational Applications II**. Paris: Technip, 1996. p.125-138.
- BENJAMINS, R. **Knowledge Engineering and Ontologies**. Disponível em: <<http://www.swi.psy.uva.nl/usr/richard/home.html>>. Acesso em: 12 out. 2000.
- BENJAMINS, V.R.; FENSEL, D. Editorial: problem-solving methods. **International Journal of Human-Computer Studies**, [S.l.], v. 49, n. 4, p.305-313, 1998.
- BEYON-DAVIS, P. **Expert database systems - a gentle introduction**. London: McGraw-Hill, 1991.
- BOFF, L.H. **O processo cognitivo de trabalho de conhecimento: um estudo exploratório sobre o uso da informação no ambiente de análise de investimentos**. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Administração da UFRGS, 2000. 179p. Tese de doutorado.
- BORST, W.N. **Construction of engineering ontologies**. Enschede: University of Twente, 1997. PhD Thesis.
- BRAUNSCHWEIG, B.; BRENDAL, B. Successful applications of artificial intelligence in the petroleum industry. In: BRAUNSCHWEIG, B.; BRENDAL, B. **Artificial Intelligence in the Petroleum Industry: symbolic and Computational Applications II**. Paris: Technip, 1996. p.1-30.
- BURTON, M., A.; BRUCE, V.; HANCOCK, P.J.B. From Pixel to People: A Model of Familiar Face Recognition. **Cognitive Science**, [S.l.], v. 23, n. 1, p.1-31, 1999.
- CAMPBELL, A.N.; HOLLISTER, V.F.; DUDA, R.O.; HART, P.E. Recognition of a hidden mineral deposit by an artificial intelligence program. **Science**, [S.l.], v. 217, n. 4563, p.927-928, 1982.
- CAMPBELL, J.A.; WOLSTENCROFT, J. Structure and significance of analogical reasoning. **Artificial Intelligence in Medicine**, [S.l.], v. 2, p.103-118, 1990.
- CATTEL, R.B. The personality and motivation of the researcher from measurements of contemporaries and from bibliography. In: TAYLOR, C. W.; BARRON, F. **Scientific creativity: its recognition and development**. New York: Wiley, 1963. p.119-131.
- CHANDRASEKARAM, B. Generic tasks in knowledge-based reasoning: high level building blocks for expert system design. **IEEE Expert**, Los Alamitos, v. 1, n. 3, p.23-30, 1986.
- CHARNESS, N. Expertise in chess: the balance between knowledge and search. In: ERICSSON, K. A.; SMITH, J. **Toward a general theory of expertise: prospects and limits**. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 1991. p.39-63.
- CHASE, W.G.; SIMON, H.A. Perception in chess. **Cognitive Psychology**, [S.l.], v. 5, p.55-81, 1973.
- CHI, M.T.H.; GLASER, R.; REES, E. Expertise in problem-solving. In: STENBERG, R. J. **Advances in the psychology of human intelligence**. Hillsdale: Erlbaum, 1982. p.7-75.
- CLANCEY, W.J. Heuristic classification. **Artificial Intelligence**, Amsterdam, v. 27, n. 3, p.289-350, 1985.
- CLANCEY, W.J. The knowledge level reinterpreted: modeling how systems interact. **Machine Learning**, Boston, n. 4, p.285-291, 1989.

- COLLINS, A.; BURSTEIN, M. A framework for a theory of comparison and mapping. In: VOSNIADOU, S.; ORTONY, A. **Similarity and analogical reasoning**. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- COOKE, N.J. Modeling human expertise in expert systems. In: HOFFMAN, R. R. **The psychology of expertise: cognitive research and empirical AI**. New York: Springer-Verlag, 1992. p.29-60.
- CORTADA, J.W. **Rise of the knowledge worker**. Boston: Butterworth-Heinemann, 1998.
- DE GROOT, A.D. **Thought and choice in chess**. Mouton: The Hague, 1965.
- DE GROOT, P.F.M. Neural network experiments on synthetic seismic data. In: BRAUNSCHWEIG, B.; BRENDAL, B. **Artificial Intelligence in the Petroleum Industry: symbolic and Computational Applications II**. Paris: Technip, 1996. p.93-122.
- DEL BIMBO, A. Representation of visual content. In: DEL BIMBO, A. **Visual Information Retrieval**. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1999. p.22-29.
- DICKINSON, W.R. Interpreting detrital modes of graywacke and arkose. **Journal of Sedimentary Petrology**, [S.l.], v. 40, p.695-707, 1970.
- DUARTE FILHO, N.L. **Raciocínio evidencial e aquisição automática de conhecimento em sistemas especialistas: uma abordagem bayesiana**. Rio de Janeiro: Departamento de Informática da PUC/RJ, 1991. 200p. Tese de Doutorado.
- DUDA, R.O.; HART, P.E.; BARRET, P.; GASCHNIG, J.; KONOLIGE, K.; REBOH, R.; SLOCUM, J. **Development of the PROSPECTOR consultation system for mineral exploration**. Menlo Park: Stanford Research Institute International, 1978. Final Report SRI Projects.
- DUDA, R.O.; HART, P.E.; NILSSON, N.J. **Subjective bayesian methods for rule-based inference systems**. Palo Alto, CA: Stanford Reserach Institute International, 1976. p.1075-1082. Technical Note.
- ERDMANN, M. Formal concept analysis to learn from the Sisyphus III Material. In: WORKSHOP ON KNOWLEDGE ACQUISITION, MODELING AND MANAGEMENT, 11., 1998, Alberta, Canada. **Proceedings...** Disponível em: <<http://ksi.cpsc.ucalgary.ca/KAW/KAW98/KAW98Proc.html>>. Acesso em: 03 abr. 2000.
- ERICSSON, K.A.; FAIVRE, I. What's exceptional about exceptional abilities? In: OBLER, I. K.; FEIN, D. **The exceptional brain: Neuropsychology of talent and special abilities**. New York: Guilford, 1988. p.436-473.
- ERICSSON, K.A.; HASTIE, R. Contemporary approaches to the study of thinking and problem solving. In: STERNBERG, R. J. **Thinking and problem solving, handbook of perception and cognition**. New York: Academic Press, 1994. p.37-79.
- ERICSSON, K.A.; SIMON, H.A. Verbal reports as data. **Psychology Review**, [S.l.], v. 87, p.215-251, 1980.
- ERICSSON, K.A.; SMITH, J. Prospects and limits of the empirical study of expertise: an introduction. In: ERICSSON, K. A.; SMITH, J. **Toward a general theory of expertise: prospects and limits**. New York: Cambridge University Press, 1991. p.01-38.
- ERIKSSOM, H.; SHAHAR, Y.; TU, S.W.; PUERTA, A.R.; MUSEN, M.A. Task modeling with reusable problem solving methods. **Artificial Intelligence**, Amsterdam, v. 79, n. 2, p.293-326, 1995.
- FENSEL, D.; MOTTA, E.; DECKER, S.; ZDRAHAL, Z. Using ontologies for definig tasks, problem-solving methods and their mappings. In: EUROPEAN WORKSHOP IN KNOWLEDGE ACQUISITION, MODELING AND MANAGEMENT, EKAW, 10.,

1997, Saint Felin de Guixols, Catalonia, Spain. **Proceedings...** Berlin: Springer-Verlag, 1997. v. 1319, p. 113-128.

FISHER, D.H.; MCKUSICK, K.B. An empirical comparison of ID3 and back-propagation. In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 11., 1989, Detroit. **Proceedings...** [S.l.]: Morgan Kaufmann, 1989. p. 788-793.

FOLK, R.L. **Petrology of sedimentary rocks.** Austin: Hemphills, 1974.

FREEMAN, A.A.; SKAPURA, D.M. **Neural networks:** algorithms, applications, and program techniques. Reading: Addison Wesley, 1992. 401p.

GAINES, B.R.; BOOSE, J.H. **Knowledge acquisition for knowledge-based systems.** London: Academic Press, 1988.

GALLI, M.T.; PONZI, M.; RIVA, A. Exploiting neural computing: a valuable tool for today's data interpretation needs. In: BRAUNSCHWEIG, B.; BRENDA, B. **Artificial Intelligence in the Petroleum Industry:** symbolic and Computational Applications II. Paris: Technip, 1996. p.73-92.

GAPPA, U.; PUPPE, F. A study of knowledge acquisition - experiences from the SISYPHUS III experiment for rock classification. In: WORKSHOP ON KNOWLEDGE ACQUISITION, MODELING AND MANAGEMENT, 11., 1998, Alberta, Canada. **Proceedings...** [S.l.]: Voyager Inn, 1998.

GARCIA, A.C.B.; MACIEL, P.M.; FERRAZ, I.N. ADDGEO: An intelligent agent to assist geologist finding petroleum in offshore lands. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL AND ENGINEERING APPLICATIONS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND EXPERT SYSTEMS, IEA/AIE, 13., 2000, New Orleans, Louisiana, USA. **Proceedings...** Berlin: Springer-Verlag, 2000. p. 316-321.

GARDNER, K.M.; RUSH, A.; CRIST, M.; KONITZER, R.; TEEGARDEN, B. **Cognitive patterns:** problem-solving framework for object technology. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. 237p.

GASCHING, J. Prospector: an expert system for mineral exploration. **Machine Intelligence. infotec State of Art Report**, [S.l.], v. 9, n. 3, p.233-246, 1981.

GLASGOW, J.I. The imagery debate revisited: a computational perspective. **Computational Intelligence**, [S.l.], v. 9, n. 4, p.309-333, 1993.

GÓMEZ-PÉREZ, A.; BENJAMINS, V.R. Overview of knowledge sharing and reuse components: Ontologies and problem-solving methods. In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE, IJCAI; WORKSHOP ON ONTOLOGIES AND PROBLEM-SOLVING METHODS, KRR5, 1999, Stockolm, Sweden. **Proceedings...** Disponível em: <<http://sunsite.inforamtik.rwth-aachen.de/Publications/CEUR-WS/Vol-18/>>. Acesso em: 03 Fev. 2001.

GRUBER, T. **Ontolingua:** a mechanism to support portable ontologies. Stanford: Knowledge System Laboratory, Stanford University, 1992. Technical Report.

GRUBER, T.R. A translation approach to portable ontology specifications. **Knowledge Acquisition**, [S.l.], v. 5, p.199-220, 1993.

GUARINO, N. Formal ontology, conceptual analysis and knowledge representation. **International Journal Human-Computer Studies**, [S.l.], v. 43, n. 2/3, p.625-640, 1995.

GUILFORD, J.P. **The nature of human intelligence.** New York: McGraw-Hill, 1967.

HAMMOND, K.J. **Case-based planning:** viewing planning as a memory task. Boston: Academic Press, 1989.

HARMON, P.; KING, D. **Expert systems:** artificial intelligence in business. New York: John Wiley, 1985. 283p.

- HARMON, P.; SAWYER, B. **Creating Expert-systems for Business and Industry**. New York: John Wiley & Sons, 1990. 329p.
- HAYES-ROTH, F.; WATERMAN, D.A.; LENAT, D.B. **Building expert systems**. Reading, MA: Addison-Wesley, 1983. 444p.
- HILDRETH, E.C.; ULLMAN, S. The computational study of vision. In: POSNER, M. **Foundation of cognitive science**. Cambridge, MA: MIT Press, 1989. p.581-630.
- HOFFMAN, R.R. **The psychology of expertise, Cognitive research and empirical AI**. New York: Springer-Verlag, 1994.
- HOFFMAN, R.R.; FELDOVICH, P.J.; FORD, K.M. A General framework for conceiving of expertise and expert system in context. In: FELDOVICH, P. J. et al. **Expertise in Context**. Menlo Park: The MIT Press, 1997.
- HONAVAR, V. Symbolic artificial intelligence and numerical artificial networks: towards a resolution of the dichotomy. In: SUN, R.; BOOKMAN, L. A. **Computational Architectures Integration of Neural and Symbolic Processes: a Perspective on the State of the Art**. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic, 1995. p.351-388.
- HOROWITZ, M.J. **Image formation and cognition**. New York: Appleton-Century-Crofts, 1978.
- JANSEN, M.G.; SCHREIBER, A.T.; WIELINGA, B.J. Rocky III - Round 1 a progress report. In: WORKSHOP ON KNOWLEDGE ACQUISITION, MODELING AND MANAGEMENT, 11., 1998, Alberta, Canada. **Proceedings...** Disponível em: <<http://ksi.cpsc.ucalgary.ca/KAW/KAW98/KAW98Proc.htm>>. Acesso em: 15 fev. 2000.
- JENSEN, The chronometry of intelligence. In: STERNBERG, R. J. **Advances in the psychology of human intelligence**. Hillsdale: Erlbaum, 1982. p.255-310.
- KELLEY, H.P. Memory abilities: a factor analysis. **Psychometric Society Monographs**, [S.l.], n. 11, p.1-53, 1964.
- KOLODNER, J. **Case-based reasoning**. San Mateo: Morgan Kaufmann, 1993. 668p.
- KOSSLYN, S.M. Resolving the imagery debates. In: KOSSLYN, S. M. **Image and brain. The resolution of the imagery debate**. Cambridge: MIT Press, 1994. p.2-23.
- KOTON, P. Reasoning about evidence in causal explanation. In: NATIONAL CONFERENCE ARTIFICIAL INTELLIGENCE, AAAI, 7., 1988, Saint Paul, Minnesota. **Proceedings...** Menlo Park: AAAI Press/MIT Press, 1988. p. 256-261.
- KOUBEK, R.J.; SALVENDY, G. Cognitive performance in super-experts on computer program modification tasks. **Ergonomics**, [S.l.], n. 34, p.1095-1112, 1991.
- KUO, T.B.; STARTZMAN, R.A. Field-scale stratigraphic correlation using artificial intelligence. **Geobyte**, [S.l.], v. 2, n. 2, p.30-35, 1987.
- LEÃO, B.F. **Construção de uma base de conhecimento de um sistema especialista de apoio ao diagnóstico de cardiopatias congênitas**. São Paulo: Pós-Graduação em Cardiologia da Escola Paulista de Medicina, 1988. 230p. Tese de doutorado.
- LEÃO, B.F.; ROCHA, A.F. Proposed methodology for knowledge acquisition: a study on congenital heart disease diagnosis. **Methods of Information in Medicine**, [S.l.], n. 29, p.30-40, 1990.
- LENAT, D.B.; GUHA, R.V. **Building large knowledge-based systems. Representation and inference in the Cyc project**. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1990.
- LIEBOWITZ, J.; WILCOX, L.C. **Knowledge Management and its Integrative Elements**. Boca Raton: CRC Press, 1997. 205p.
- LUKOSE, D. Model-ECS: Executable conceptual modelling language. In: KNOWLEDGE ACQUISITION FOR KNOWLEDGE-BASED SYSTEMS

- WORKSHOP, KAW, 1996. **Proceedings...** Disponível em: <<http://ksi.cpsc.ucalgary.ca/KAW/KAW96/KAW96Proc.htm>>. Acesso em: 05 abr. 2001.
- MARTIN, P. Knowledge acquisition using documents, conceptual graphs and a semantically structured dictionary. In: INTERNATIONAL KNOWLEDGE ACQUISITION FOR KNOWLEDGE-BASED SYSTEMS WORKSHOP, 9., 1995, Banff, Canada. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 1995.
- MATTOS, N.M. **An approach to knowledge base management**. Berlin: Springer-Verlag, 1991. 247p.
- MCBRIDE, E.F. A classification of common sandstones. **Journal of Sedimentary Petrology**, [S.l.], v. 33, p.664-669, 1963.
- MCDERMOTT, J. Preliminary steps towards a taxonomy of problem-solving methods. In: MARCUS, S. **Automating knowledge acquisition form expert systems**. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1988. p.225-255.
- MCNAMARA, T.P. Knowledge representation. In: STERNBERG, R. J. **Thinking and problem solving, handbook of perception and cognition**. New York: Academic Press, 1994. p.81-117.
- MICHIE, D.; SPIEGELHALTER, D.J ; TAYLOR, C.C. **Machine learning, neural and statistical classification**. New York: Ellis Horwood, 1994.
- MIHAGUTI, E.H.; PEDROSA, E.L. AI in Petroleum - PETROBRAS: The case in point. In: THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE PETROLEUM INDUSTRY, 1995, Lillehammer, Norway. **Proceedings...** [S.l.]: Norwegian AI Society, 1995.
- MIKKELSEN, J.O.; STABELL, C.B.; SINDING-LARSEN, R. Knowledge-based advice & critique support for play and prospect evaluation. In: BRAUNSCHWEIG, B.; BRENDAL, B. **Artificial Intelligence in the Petroleum Industry: symbolic and Computational Applications II**. Paris: Technip, 1996.
- MINEAU, G.W. Establishig a semantica basis: toward the integration of vocabularies. In: INTERNATIONAL KNOWLEDGE ACQUISITION FOR KNOWLEDGE-BASED SYSTEMS WORKSHOP, 9., 1995, Banff, Canada. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 1995.
- MÖLLER, J.-U. ; WILLEMS, M. Operationalisation of KADS models by using conceptual graph modules. In: INTERNATIONAL KNOWLEDGE ACQUISITION FOR KNOWLEDGE-BASED SYSTEMS WORKSHOP, 9., 1995, Banff, Canada. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 1995.
- MOONEY, R.; SHAVLIK, J.; TOWELL, G.; GOVE, A. A experimental comparision of symbolic and connectionist learning algorithms. In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 11., 1989, Detroit. **Proceedings...** [S.l.]: Morgan Kaufmann, 1989. p. 775-780.
- MOTODA, H.; MIZOGUCHI, R.; BOOSE, J.; GAINES, B. **Knowledge acquisition for knowledge-based systems**. Tokyo: OHMSHA, 1991.
- MUSEN, M. Modern architectures for intelligent systems: reusable ontologies and problem-solving methods. In: AMIA ANNUAL SYMPOSIUM, 1998, Orlando. **Proceedings...** Disponível em: <http://smi-web.stanford.edu/pubs/SMI_Abstracts/SMI-98-0734.html>. Acesso em: 11 jan. 2000.
- NECHES, R.; FIKES, R.E.; FININ, T.; GRUBER, T.R.; SENATOR, T. ; SWARTOUT, W.R. Enabling technology for knowledge sharing. **AI Magazine**, [S.l.], v. 12, n. 3, p.36-56, 1991.
- NEWELL, A. The knowledge level. **Artificial Intelligence**, Amsterdam, v. 18, n. 1, p.87-127, 1982.

- NEWELL, A.; ROSENBLOOM, P.S. Mechanism of skill acquisition and the law of practice. In: ANDERSON, J. R. **Cognitive skills and their acquisition**. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1981.
- NEWELL, A.; SHAW, J.C.; SIMON, H.A. Elements of a theory of human problem-solving. **Psychological Review**, [S.l.], v. 65, p.151-166, 1958.
- NEWELL, A.; SIMON, H.A. **Human problem solving**. New Jersey: Prentice-Hall, 1972.
- NONAKA, I.; TAKEUCHI, H. **Criação de conhecimento na empresa**. São Paulo: Campus, 1997.
- PATEL, V.L.; AROCHA, J.F.; KAUFMANN, D.R. Diagnostic reasoning and medical expertise. In: MEDIN, D. **The Psychology of learning and motivation**. New York: Academic Press, 1994. p.187-251.
- PATEL, V.L.; GROEN, G.J. The general and specific nature of medical expertise: a critical look. In: ERICSSON, K. A.; SMITH, J. **Toward a general theory of expertise: prospects and limits**. Cambridge: Cambridge University Press, 1991. p.93-125.
- PATEL, V.L.; RAMONI, M.F. Cognitive models of directional inference in expert medical reasoning. In: FELDOVICH, P. J. et al. **Expertise in context: human and machine**. Menlo Park, CA: AAAI Press/MIT Press, 1997. p.67-99.
- PIAGET, J. **Psicologia da Inteligência**. São Paulo: Fundo de Cultura, 1967. 236p.
- PIAGET, J. **Biologia e Conhecimento: ensaio sobre as relações entre as regulações orgânicas e os processos cognoscitivos**. Petrópolis: Vozes, 1973. 423p.
- PITAS, I.; VENETSANOPOULOS, A.N. Knowledge-based image analysis for geophysical interpretation. **Journal of Intelligent and Robotic Systems**, [S.l.], v. 7, n. 2, p.115-137, 1993.
- POLANYI, M. **Personal knowledge**. Chicago: The University of Chicago Press, 1974.
- POSNER, M. **Foundation of cognitive science**. Cambridge, MA: MIT Press, 1989.
- PUERTA, A.R.; EGAR, J.W.; TU, S.W.; MUSEN, M.A. A multiple-method knowledge-acquisition shell for the automatic generation of knowledge-acquisition tools. **Knowledge Acquisition**, [S.l.], v. 4, n. 2, p.171-196, 1992.
- REATEGUI, E.B. **Combining case-based reasoning with neural networks in diagnosis Systems**. Londres: Department of Computer Science, 1997. 185p. Ph.D. Thesis.
- REBOH, R. **Knowledge engineering techniques and tools in the PROSPECTOR environment**. Palo Alto, CA: Stanford Research Institute International, 1981. Technical Note.
- REGOCZEI, S.B.; HIRST, G. Knowledge and knowledge acquisition in the computational context. In: HOFFMAN, R. **The psychology of expertise cognitive research and empirical AI**. New York: Springer-Verlag, 1994. p.12-25.
- RICHARDS, D.; MENZIES, T. Extending the SISYPHUS III experiment from a knowledge engineering task to a requirements engineering task. In: WORKSHOP ON KNOWLEDGE ACQUISITION, MODELING AND MANAGEMENT, 11., 1998, Alberta, Canada. **Proceedings...** Disponível em: <<http://ksi.cpsc.ucalgary.ca/KAW/KAW98/KAW98Proc.htm>>. Acesso em: 03 abr. 2000.
- RIESBECK, C.K.; SCHANK, R.C. **Inside case-based reasoning**. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1989.
- ROSS, B.H.; SPALDING, T.L. Concepts and categories. In: STERNBERG, R. J. **Thinking and problem solving**. London: Academic Press, 1994. p.119-148.

SCHANK, R.C. **Dynamic memory: a theory of reminding and learning in computers and people.** Cambridge: Cambridge University Press, 1982.

SCHIMDT, H.G.; NORMAN, G.R.; BOSHUIZEN, H.P.A. A cognitive perspective on medical expertise: theory and implications. **Academic Medicine**, [S.l.], n. 65, p.611-621, 1990.

SCHREIBER, G.; AKKERMANS, H.; ANJEWIERDEN, A.; HOOG, R.; SHADBOLT, N.; VELDE, W.; WIELINGA, B. **Knowledge engineering and management.** Cambridge: The MIT Press, 1999. 465p.

SCHREIBER, G.; WIELINGA, B.; HOOG, R.d.; AKKERMANS, H.; VELDE, W. CommonKADS: a comprehensive methodology for KBS development. **IEEE Expert**, Los Alamitos, v. 9, n. 6, p.28-37, 1994.

SCHULTZ, A.W.; FANG, J.H.; BURSTON, M.R.; CHEN, H.C.; REYNOLDS, S. XEOD: an expert system for determining clastic depositional environments. **Geobyte**, [S.l.], v. 3, n. 2, p.22-32, 1988.

SCHUNN, C.D.; ANDERSON, J.R. The Generality/Specificity of Expertise in Scientific Reasoning. **Cognitive Science**, [S.l.], v. 23, n. 3, p.337-370, 1999.

SHADBOLT, N.; BURTON, M. Knowledge elicitation techniques - some experimental results. In: MCGRAW, K. L.; WESTPHAL, C., R. **Readings in knowledge acquisition - current practices and trends.** New York: Ellis Horwood, 1990. p.21-33.

SHALIN, V.L.; GEDDES, N.D.; BERTRAM, D.; SZCZEPKOWSKI, M.A.; DUBOIS, D. Expertise in Dinamic, Physical Task Domains. In: FELTOVICH, P. J.et al. **Expertise in Context.** Menlo Park, CA: AAAI Press/MIT Press, 1997. p.195-217.

SHAVLIK, J.W. **A framework for combining symbolic and neural learning.** Madison, EUA: University of Wisconsin Technical Computer Sciences Department, 1992. Technical Report.

SHAW, M.L.G.; GAINES, B., R. WebGrid II: developing hierarchical knowledge structures from flat grids. In: WORKSHOP ON KNOWLEDGE ACQUISITION, MODELING AND MANAGEMENT, 11., 1998, Alberta, Canada. **Proceedings...** Disponível em: <<http://ksi.cpsc.ucalgary.ca/KAW/KAW98/KAW98Proc.htm>>. Acesso em: 03 abr. 2000.

SILVA, L.A.L. **Aplicando métodos de solução de problemas em tarefas de interpretação de rochas.** Porto Alegre: Programa de PG em Ciência da Computação, 2001. Dissertação de Mestrado.

SMITH, R.G. On the development of commercial expert systems. **AI Magazine**, [S.l.], v. 5, n. 3, p.61-73, 1984.

SOWA, J.F. **Conceptual structures: information processing in mind and machine.** Reading: Addison Wesley, 1984.

SPEK, R.v.d.; SPIJKERVET, A. Knowledge management: dealing intelligently with knowledge. In: LIEBOWITZ, J.; WILCOX, L. C. **Knowledge Management and its Integrative Elements.** Boca Raton: CRC Press, 1997. p.31-59.

STEELS, L. Components of expertise. **AI Magazine**, [S.l.], v. 11, n. 2, p.28-49, 1990.

STERNBERG, R.J. **Intelligence, information processing, and analogical reasoning: the componential analysis of human abilities.** Hillsdale: Erlbaum, 1977.

STERNBERG, R.J. **Handbook of Human Intelligence.** Cambridge: Cambridge University Press, 1982.

STERNBERG, R.J. **Thinking and problem solving.** London: Academic Press, 1994. 461p.

- STERNBERG, R.J. Cognitive conceptions of expertise. In: FELDOVICH, P. J. et al. **Expertise in context: human and machine**. Menlo Park, CA: AAAI Press/ The MIT Press, 1997. p.149-162.
- STEWART, T. **Capital intellectual**. Rio de Janeiro: Campus, 1998.
- STUDER, R.; Benjamins, V.R.; Fensel, D. Knowledge engineering: principles and methods. **Data & Knowledge Engineering**, Amsterdam, v. 25, n. 1/2, p.161-197, 1998.
- STUTT, A.; Motta, E. **VITAL - A methodology-based workbench for KBS life cycle support**. [S.l.]: ESPRIT II, 1994. Project Report.
- SUNDALI, J.A.; ATKINS, A.B. Expertise in investment analysis: fact or fiction. **Organizational Behavior and Human Decision Processes**, [S.l.], n. 59, p.223-241, 1994.
- SYCARA, K. Using case-based reasoning for plan adaptation and repair. In: CASE-BASED REASONING WORKSHOP, 1988, Clearwater, Florida. **Proceedings...** [S.l.]: Morgan Kaufmann, 1988. p. 425-434.
- TOWELL, G.G.; SHAVLIK, J.W. Using symbolic inductive learning to improve knowledge-based neural networks. In: NATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 10., 1992, San Jose, CA. **Proceedings...** Menlo Park: AAAI Press, 1992. p. 177-182.
- TUCKER, M.E. **Sedimentary Petrology**. Oxford, UK: Blackwell Science, 1991. 260p.
- TURBAN, E. Knowledge acquisition and validation. In: TURBAN, E. **Expert Systems and Applied Artificial Intelligence**. New York: Macmillan Publishing, 1992. p.117-166.
- TURBAN, E. **Decision-support and expert systems: management support systems**. New York: Macmillan Publ., 1993.
- VANLEHN, K. Problem-solving and cognitive skill acquisition. In: POSNER, M. I. **Foundations of Cognitive Science**. Cambridge: The MIT Press, 1989. p.526-579.
- VANLEHN, K. Cognitive skill acquisition. **Annual Review of Psychology**, Palo Alto, v. 47, p.513-539, 1996.
- VELDE, W.V. Issues in knowledge level modeling. In: DAVID, J. M. et al. **Second generation expert systems**. Berlin: Springer-Verlag, 1993.
- VOSNIADOU, S.; ORTONY, A. **Similarity and analogical reasoning**. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- WATSON, I. **Applying case-based reasoning: techniques for enterprise system**. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1997.
- WIELINGA, B.J.; SCHREIBER, A.T. Conceptual modeling on large reusable knowledge bases. In: VON LUCK, K.; MARBURGER, H. **Management and processing of complex data structures**. Berlin: Springer -Verlag, 1994. p.181-200. (Lecture Notes in Computer Science, v.777).
- WRIGHT, G.; AYTON, P. **Eliciting and modeling expert knowledge**. North Holland: Elsevier Science Publ., 1987. 26p.
- YIP, K.; ZHAO, F. Spatial aggregation: theory and applications. **Journal of Artificial Intelligence Research**, [S.l.], v. 5, p.01-26, 1996.
- ZEITZ, C.M. Some concrete advantages of abstraction: How expert's representation facilitate reasoning. In: FELDOVICH, P. J. et al. **Expertise in Context: human and machine**. Menlo Park, CA: AAAI Press/ The MIT Press, 1997. p.43-65.
- ZUFFA, G.G. **Provenance of Arenites**. Dordrecht, Germany: D. Reidel Pub. Co., 1985. 408p.