

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGE3M

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA SELEÇÃO DE MATERIAIS,  
CARACTERIZAÇÃO E PROCESSAMENTO POR FRESAMENTO EM  
ALTAS VELOCIDADES (HSM) NO BENEFICIAMENTO DO  
RIODACITO (BASALTO CARIJÓ)**

Hélio Dorneles Etchepare

Tese de Doutorado

Porto Alegre  
2014

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGE3M

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA SELEÇÃO DE MATERIAIS,  
CARACTERIZAÇÃO E PROCESSAMENTO POR FRESAMENTO EM  
ALTAS VELOCIDADES (HSM) NO BENEFICIAMENTO DO  
RIODACITO (BASALTO CARIJÓ)**

Hélio Dorneles Etchepare  
Mestre em Engenharia Ambiental e Tecnologias Limpas – PPGE3M

Trabalho realizado no Departamento de Materiais da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Orientador: Prof. Dr. Wilson Kindlein Júnior

Porto Alegre  
2014

Esta tese foi julgada aprovada para obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador:

Prof. Dr. Wilson Kindlein Júnior  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e  
de Materiais - PPGE3M/UFRGS  
Departamento de Engenharia de Materiais – DEMAT/UFRGS

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Fábio Pinto da Silva  
Programa de Pós-Graduação em Design - PGDesign/UFRGS  
Departamento de Design e Expressão Gráfica

Prof. Dr. Flávio José Lorini  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica –  
PROMEC/UFRGS  
Departamento de Engenharia Mecânica – DEMEC/UFRGS

Prof. Dr. Juliano Tonezer da Silva  
Instituto de Ciências Exatas e Geociências - ICEG/UPF

Prof(a). Dra. Lauren da Cunha Duarte  
Programa de Pós-Graduação em Geociências - PPGGEO/UFRGS  
Instituto de Geociências/UFRGS

Prof(a). Dra. Annelise Kopp Alves  
Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e  
de Materiais – PPGE3M/UFRGS  
Departamento de Engenharia de Materiais – DEMAT/UFRGS

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker  
Coordenador do PPGE3M/UFRGS

*A imaginação é mais importante que o conhecimento.  
O conhecimento é limitado.  
A imaginação envolve o mundo.*

*Albert Einstein*

## AGRADECIMENTOS

Meu mais humilde e sincero obrigado:

Ao meu mais que orientador, meu amigo Wilson Kindlein Júnior por desde 2001 acreditar, incentivar e, sobretudo, pelas lições de profissionalismo.

A Gustavo Greve por ter feito do meu trabalho o seu trabalho. Sem sua incansável ajuda, seu instinto infalível e inesgotável senso de humor não seria possível.

A João Batista Gravina que sempre tinha um ótimo aconselhamento em todas as questões, grandes ou pequenas.

Aos meus amigos Paulo Scherer (*in memoriam*) e Maria Lúcia Scherer pelo incentivo no início desta caminhada.

A toda equipe do Laboratório de Design e Laboratório de Cerâmicos da UFGRS e Univates pela disponibilidade de tempo e equipamentos.

A minha Simone e meu Bruno por acreditarem.

A meus avós Eloi e Newda (*in memoriam*). Sem vocês jamais conseguiria

Para minha família...

## RESUMO

A necessidade de produtos inovadores que suplantem a competição por preço e ofereçam conquista de mercado, além da garantia da qualidade em grandes escalas de produção, confere ao design, a engenharia e a tecnologia, numa abordagem multidisciplinar, possibilidades para solução de algumas dessas demandas. Dentre os materiais com necessidade de inovação podem ser destacadas as rochas ornamentais e de revestimento, muito utilizadas na arquitetura e construção, construção e revestimento de elementos urbanos, arte funerária, e arte e decoração. Apesar da diversidade de aplicações, percebe-se a geração de somente seis tipos básicos de produtos, todos com baixo valor agregado: blocos, chapas, placas para revestimento, ladrilhos, pisos e manufaturados em menor escala. Embora o Brasil apresente grande potencial geológico para rochas ornamentais, ocupando 5º lugar na produção mundial, sua participação no mercado se faz, na maioria das vezes, como fornecedor de rochas em bruto ou semi-acabadas. Apesar da visível expansão e do aumento da representatividade brasileira no mercado, os avanços tecnológicos utilizados no desdobramento final de rochas ornamentais se limitam ao aprimoramento dos equipamentos de corte, principalmente na durabilidade dos discos diamantados, e polimento buscando atender, num primeiro momento, os requisitos de comercialização, produção e distribuição de produtos semi-acabados. Posto este cenário percebem-se dois aspectos ainda pouco explorados em rochas ornamentais, especialmente no basalto carijó. Primeiro: a inclusão de novas tecnologias de beneficiamento e agregação de valor por processos não convencionais para este setor. Segundo: a caracterização das propriedades, principalmente a dureza e a correlação com o desgaste da ferramenta cortante. São objetivos desta pesquisa estudar e desenvolver os processos de fresamento CNC (Comando Numérico Computadorizado) em altas velocidades (*High Speed Machining* – HSM) no beneficiamento do basalto carijó e determinar os parâmetros de fresamento, para obtenção dos melhores padrões na relação tempo de usinagem *versus* desgaste da ferramenta *versus* abrasão do material, e replicar os resultados obtidos nas amostras. Os resultados obtidos mostram que a matéria prima utilizada, por ser natural, apresenta grandes variações de composição e dureza não permitindo a determinação de um parâmetro de fresamento específico. No entanto foi possível traçar, com o a utilização de um pós-processador desenvolvido especificamente para este estudo, um mapa de tomada de decisão que serve como facilitador na execução deste processo.

Palavras-chave – fresamento de rochas; dureza knoop; rochas ornamentais

## ABSTRACT

The need for innovative products that supplant the competition by offering price and market conquest, and quality assurance in large-scale production, gives the design, engineering and technology, a multidisciplinary approach, possibilities for solving some of these demands. Among the materials in need of innovation can be highlighted and the ornamental coating, widely used in building and construction, construction and finish of urban elements, funerary art, and art and decoration. Despite the diversity of applications, we can see the generation of only six basic types of products, all with low added value, blocks, plates, boards, cladding, tiles, floors and manufactured on a smaller scale. Although Brazil presents a great geological potential for ornamental rocks, occupying fifth place in world production, its market share if it does, mostly, as the supplier of rocks, raw or semi-finished. Despite the visible expansion and increased representation in the Brazilian market, the technological advances used in the final unfolding of ornamental stones are confined to the improvement of the cutting equipment, especially in the durability of diamond blades, polishing and trying to meet, at first, the requirements marketing, production and distribution of semi-finished products. Tour this scenario, two aspects are perceived largely unexplored in stone, especially on basalt carijó. First, the inclusion of new technologies for processing and adding value by unconventional methods for this sector. Second, the characterization of the properties, especially hardness and correlation with cutting tool wear. The objectives of this research study and develop the processes of milling CNC (Computerized Numerical Control) at high speeds (High Speed Machining - HSM) in the processing of basalt carijó determining the parameters of milling, to obtain the best standards in the relationship versus machining time tool wear versus abrasion material, and replicating the results obtained in the samples. The results show that the raw material used is natural presents large variations in composition and hardness does not allow the determination of a parameter specific milling. However it was possible to trace, with the the use of a post-processor developed specifically for this study, a statement of decision making that serves as a facilitator in the implementation of this process.

Keywords - rock milling; knoop hardness; ornamental rocks

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Agrupamentos de rochas conforme sua gênica (magmática ou ígnea, metamórfica e sedimentar) e processos de formação .....	9
Figura 2 - Distribuição das principais placas tectônicas. As setas vermelhas indicam a direção dos deslocamentos. As setas em laranja apontam exemplos de limites e relações interplacas podendo ser transformantes, divergentes ou concordantes .....	10
Figura 3 - A formação de rochas ígneas extrusivas (aqui exemplificadas como basalto) e rochas ígneas intrusivas (aqui exemplificada como granito).....	11
Figura 4 - Diagrama QAPF para classificação de rochas ígneas (Q - Quartzo; A - Feldspato Alcalino; P - Plagioclásio e; F - Feldspatóide), segundo Streckeisen (1976).....	13
Figura 5 - Classificação de rochas ígneas vulcânicas por meio do diagrama TAS (Total-Alcali <i>versus</i> Sílica). .....	14
Figura 6 - Área escura do mapa indica o derrame basáltico da Bacia do Paraná.....	16
Figura 7 - A) Atividade Vulcânica no Hawaí; B) Detalhe do resfriamento de lava expelida em atividade vulcânica. ....	17
Figura 8 - Fragmento de basalto .....	18
Figura 9 - Fragmento de riodacito - Basalto Carijó - oriundo da Região de Nova Prata/RS ...	20
Figura 10 - Região do Basalto no Rio Grande do Sul .....	21
Figura 11 - Fragmento do Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul. Em destaque a Região do Basalto. Fazem parte da “Região do Basalto” os municípios de André da Rocha, Guabijú, Nova Araçá, Nova Bassano, Nova Prata, Paraí, Protásio Alves, São Jorge, Veranópolis, Vila Flores e Vista Alegre do Prata .....	22
Figura 12 - Visita realizada em mina de extração e na beneficiadora Pratence em Nova Prata. A) Frente de lavra para retirada de placas (lajes); B) Blocos para beneficiamento. ....	23
Figura 13 - A) Tear multilâminas para beneficiamento (corte em placas) de rochas; B) Vista em detalhe do conjunto de lâminas de aço - multilâminas - utilizado no tear.....	24
Figura 14 - A) Corte do basalto através da utilização de discos diamantados. No detalhe disco diamantado utilizado no equipamento; B) Equipamento utilizado no polimento de rochas ornamentais; C) Calibração do tamanho das lajes de basalto já beneficiadas; D) Produto final em estoque. ....	24

Figura 15 - Representação de uma ponta de diamante para ensaio de dureza Knoop.....	28
Figura 16 - Impressão produzida por uma carga de 200 gf em cobre. O comprimento da diagonal maior é de 160 µm. Aumento 480 X..	28
Figura 17 - Comparativo entre as escala de dureza Mohs, Vickers e Knoop em rochas .....	29
Figura 18 - Difratoograma de calcedônia (ágata) - picos difratados caracterizam o material como sendo de base silicosa e cristalina.....	31
Figura 19 - Esquema de funcionamento da análise por fluorescência de raios X.....	33
Figura 20 - Exemplo de imagem de microscopia ótica de luz refletida - MOLR - de uma amostra de riodacito onde: A) amostra observada durante o ensaio de dureza; B) imagem observada.....	35
Figura 21 - Imagens efetuadas através de microscopia eletrônica de varredura - MEV - onde: A) Imagem de elétrons retroespalhados (BSE) de um minério de ouro. Os níveis de cinza correspondem a fases distintas, em ordem decrescente: ouro, arsenopirita, pirita e quartzo; B) Imagem de elétrons secundários de um grão de diamante sintético de uma ferramenta diamantada.....	37
Figura 22 - Fresadora CNC modelo Digimill 3D.....	40
Figura 23 - Gráfico representando a Teoria de Solomon - velocidade de corte X temperatura de corte .....	41
Figura 24 - Representação esquemática dos parâmetros de usinagem onde: $v_c$ indica velocidade de rotação da ferramenta em RPM; $af$ indica a velocidade de avanço da ferramenta expressa em mm/s e; $ap$ indica a profundidade de cada passe durante o processo de usinagem expresso em mm .....	44
Figura 25 - Vida útil da ferramenta - material removido em $\text{cm}^3$ X velocidade de corte .....	45
Figura 26 - Materiais para Ferramentas de Corte .....	46
Figura 27 - Amostras de granito branco (A), granito preto (B) e ágata (C). Escala 0,5 mm ...	49
Figura 28 - Fresas dentárias diamantadas das marcas Vortex modelo 3018 (A) e Fava modelo 4137 (B). Escala 1 mm .....	49
Figura 29 - Geometria em baixo relevo utilizada nos testes em granito (A); Geometria alto relevo utilizada nos testes em ágata (B) .....	50
Figura 30 - A placa controle (A) foi mapeada (B) e subdividida em 425 corpos de prova de 3 x 3 x 2 cm (C). As amostras assinaladas no mapa (B) foram analisadas quanto a sua dureza, através de ensaio Knoop; difração e fluorescência de raios X e petrografia. Todas as amostras foram lavadas (D), desumidificadas em estufa durante 24 H (E) e suas massas foram aferidas em balança digital analítica (F). .....	52
Figura 31 - A) Preparação (polimento) das amostras selecionadas para medição de dureza; B) Esquema de 35 impressões realizadas em cada corpo de prova. Os números indicam a ordem em que foram realizadas.....	53
Figura 32 - A) Endentação utilizando ponteira Knoop; B) Seletor de carga aplicada da endentação; C) Objetiva utilizada para visualização da impressão resultante; D) Escala Vernier utilizada para medição da impressão; E) Impressão resultante.....	53

Figura 33 - Sequenciamento de preparo das amostras para moagem. A) Amostra seccionada em função do volume de material adequado às análises de difratometria e fluorescência de raios X; B e C) Amostra sendo preparada para prensagem e D) Resultado da prensagem.....	55
Figura 34 - Sequenciamento do processo de moagem em moinho de bolas e acondicionamento. A) Moinho de bolas; B) Cilindro de moagem; C) Peneiramento em #325; D e E) Amostra peneirada e; F) Amostras acondicionadas .....	55
Figura 35 - Exemplo das etapas de preparo das amostras e difração de raios X. A e B) Amostra em pó sendo preparada pelo método convencional; C e D) Amostra pronta para análise; E e F) Amostra sendo analisada. ....	56
Figura 36 - Imagem fotográfica das lâminas das amostras B17, I5, P17 e 25 utilizadas na análise petrográfica.....	57
Figura 37 - Padrões geométricos estabelecidos por Freitas, 2006. Modelo de referência usinado em alumínio.....	58
Figura 38 - Sequenciamento da elaboração dos padrões geométricos em gesso. Em A e B) esagem em balança analítica do gesso pedra (100 g) e água (30 ml), respectivamente; C) Molde negativo confeccionado em alginato a partir de peça de “Basalto Carijó”; D) Confeção do bloco padrão em gesso pedra; F) Blocos de gesso pedra prontos para os testes de usinagem; G e H) Usinagem dos padrões geométricos no gesso pedra.....	59
Figura 39 - Padrões geométricos estabelecidos para testes de usinagem confeccionados em gesso. ....	60
Figura 40 - Usinagem dos padrões geométricos em blocos de aço SAE 1020. Em A) Calibração dos blocos quanto sua planicidade e dimensões; B) Usinagem dos padrões geométricos.....	61
Figura 41 - Padrões geométricos estabelecidos para testes de usinagem confeccionados em aço.....	62
Figura 42 - Gráfico dos resultados de dureza Knoop. É possível visualizar a dureza das amostras controladas e aleatórias nos <i>quartis</i> HK <sub>25</sub> , HK <sub>50</sub> e HK <sub>75</sub> .....	64
Figura 43 - Difratograma da amostra controlada B2.....	65
Figura 44 - Difratograma da amostra aleatória 9.....	66
Figura 45 - Resultado da análise elementar quali-quantitativa por fluorescência de raios X das amostras B2 (controlada) e 9 (aleatória). Análise realizada nos Laboratórios do PPG3M/UFRGS em espectrômetro sequencial de fluorescência de raios X marca Shimadzu modelo XRF-1800. ....	67
Figura 46 - Fotomicrografias do riocacito. Em (A) fotomicrografia em luz polarizada (LP), com destaque para microfenocristal de clinopiroxênio subédrico microfraturado (acastanhado) e plagioclásios límpidos em matriz vítrea e textura esferulítica; Em (B) fotomicrografia em luz polarizada (LP) com destaque para micrólitos de clinopiroxênio subédrico microfraturado (acastanhado), plagioclásios límpidos em matriz vítrea e textura esferulítica e mineral metálico (amarelado) na lateral direita da imagem. ....	69
Figura 47 - Análise petrográfica do riocacito realizada em microscópio eletrônico de varredura da marca Hitachi modelo Tm3000 utilizando o detector de dispersão de energia (EDS) em diferentes regiões da amostra. Nas tabelas e diagramas é possível visualizar a concentração dos óxidos presentes em cada região analisada.....	70

Figura 48 - Classificação do riodacito por meio do diagrama TAS (Total-Alcali <i>versus</i> Sílica).....	71
Figura 49 - A) Aferição do nível do bloco de riodacito com auxílio de um relógio comparador; B) Conjunto de dispositivos utilizados nos testes de usinagem. A cada teste a ferramenta é substituída.....	73
Figura 50 - Comparativo de acabamento entre os padrões geométricos estabelecidos usinados em gesso e o riodacito .....	74
Figura 51 - Imagem realizada em MEV da extremidade cortante da ferramenta 22. As setas amarelas indicam região com diamantes sintéticos fixados em uma matriz de níquel. As setas vermelhas indicam o excessivo desgaste da ferramenta durante o processo de fresamento. É possível visualizar regiões onde houve fusão da matriz (seta azul). As setas laranjas indicam os locais onde os grãos de diamante foram “arrancados” por escarificação .....	76
Figura 52 - Quadro comparativo dos ensaios de usinagem realizados para verificação da velocidade de deslocamento em Z otimizado para este tipo de trabalho. As setas indicam a ordem de execução dos testes. Os resultados podem ser visualizados e comparados na tabela a seguir. ....	77
Figura 53 - Representação esquemática dos deslocamentos em um programa CNC. A Velocidade de Mergulho somente ocorre na primeira entrada da ferramenta no material. Após é atribuído a todos os deslocamentos a Velocidade de Avanço. É possível visualizar no “programa exemplo” os dados de cada etapa .....	79
Figura 54 - Representação esquemática dos deslocamentos em um programa CNC utilizando o pós-processador <i>CutAdjuster</i> . Durante a programação é atribuído pelo operador os valores de deslocamento da ferramenta. O valor de avanço é o mesmo tanto para os deslocamentos em X (ou Y) quanto para os deslocamentos em Z. O pós-processador analisa o programa original atribuindo valores diferenciados, também definido pelo operador, para os deslocamentos descendentes em Z (Z -). Nesta versão os valores descendentes em Z são iguais ao atribuído a Velocidade de Mergulho. Para demais deslocamentos são atribuídos os valores da Velocidade de Avanço .....	81
Figura 55 - Representação esquemática de funcionamento do pós-processador <i>CutAdjuster</i> versão 1.3. Nesta versão é possível o operador determinar diferentes velocidades de avanço para Z além dos <i>ranges</i> angulares de superfície onde estas serão aplicadas .....	82
Figura 56 - Comparativo de fresamento simulado em <i>software</i> com o fresamento executado em riodacito .....	84
Figura 57 - Mapa de tomada de decisão desconsiderando a utilização do software CNC <i>CutAdjuster</i> para adequação dos parâmetros de usinagem do riodacito. ....	87
Figura 58 - Mapa de tomada de decisão considerando a utilização do software CNC <i>CutAdjuster</i> para adequação dos parâmetros de usinagem do riodacito. ....	90
Figura 59 - Texturas desenvolvidas para validação do mapa de Tomada de Decisão. Em A) textura denominada “escama” e em B) textura denominada “zigue-zague” .....	91
Figura 60 - Textura “escama” usinada em riodacito .....	92
Figura 61 - Processo decisório orientado pelo Mapa de Tomada de Decisão utilizado para confecção da textura “escama” .....	92
Figura 62 - Textura “zigue-zague” usinada em riodacito.....	93

Figura 63 - Processo decisório orientado pelo Mapa de Tomada de Decisão utilizado para confecção da textura “zigue-zague” .....93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produtos obtidos do riodacito.....	21
Tabela 2 - Escala de dureza Mohs .....	26
Tabela 3 - Resultados de dureza Knoop (kgf/mm <sup>2</sup> ) das amostras controladas e aleatórias .....	64
Tabela 4 - Resultado da análise elementar quali-quantitativa, parcial e média total, dos óxidos presentes nas amostras de riodacito aleatórias (1,9 e 17) e controladas (B2, B17, I5, I13, I21, P9, P17 e P24). Análise realizada nos Laboratórios do PPGE3M/UFRGS em espectrômetro sequencial de fluorescência de raios X marca Shimadzu modelo XRF-1 .....	68
Tabela 5 - Quadro comparativo dos ensaios de usinagem realizados para verificação da velocidade de deslocamento em X ou Y otimizado para este tipo de trabalho. ....	78

## LISTA DE SIGLAS E ABREVEATURAS

Abirochas	Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais
ASM	<i>American Society Metallurgy</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i> (Projeto Auxiliado por Computador)
CAE	<i>Computer-Aided Engineering</i> (Engenharia (simulações) Auxiliado por Computador)
CAM	<i>Computer-Aided Manufacturing</i> (Manufatura Auxiliada por Computador)
CLP	Controladores Lógico Programáveis
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais mais conhecida como Serviço Geológico do Brasil
DPH	Dureza Ponta de Diamante
EDS	Espectro de Dispersão de Energia
EDX	Espectômetro de Dispersão de raios X
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
HSM	<i>High Speed Machining</i> (Usinagem em Altas Velocidades)
HV	Dureza Vickers
IEL	Instituto Euvaldo Lodi
LdSM	Laboratório de Design e Seleção de Materiais
MCT	Ministério de Ciência e Tecnologia
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MOLR	Microscópio Ótico de Luz Refletida
MOLT	Microscópio Ótico de Luz Transmitida
OCDE	Departamento Estatístico da Comunidade Européia
OECD	Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento
PPGE3M	Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
WIDIA	<i>Wie Diamont</i> (como diamante)

## SUMÁRIO

<b>1 – INTRODUÇÃO</b> .....	1
1-1 - Objetivo Geral.....	6
1.1.1 - Objetivos Específicos .....	6
<b>2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	8
2.1 - Rochas e Minerais – Formação e Composição .....	8
2.1.1 - Rochas Ígneas.....	9
2.1.1.1 - Petrogênese Magmática .....	15
2.1.1.2 - Basalto.....	15
2.1.1.2.1 - Caracterização .....	17
2.1.1.2.1.1 - Textura .....	18
2.1.1.2.1.2 - Alteração / Intemperismo Físico e Químico .....	19
2.1.1.3 - Riodacito .....	19
2.1.1.4 - Processamento.....	23
2.2 - Caracterização das Rochas .....	25
2.2.1 - Dureza e Microdureza .....	25
2.2.1.1 - Dureza Mohs .....	26
2.2.1.2 - Microdureza Vickers .....	27
2.2.1.3 - Dureza Knoop .....	27
2.2.2 - Difractometria de raios X.....	30
2.2.3 - Fluorescência de raios X .....	32
2.2.4 - Microscopia Ótica .....	34
2.2.4.1 - Petrografia .....	35
2.2.4.2 - Polarização da Luz .....	36
2.2.5 - Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV.....	36
2.3 - Usinagem.....	38
2.3.1 - Fresamento e Fresamento CNC .....	38
2.3.1.1 - Usinagem em Alta Velocidade – (HSM) .....	40
2.3.2 - Ferramentas e Parâmetros .....	42
<b>3 - MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	48
3.1 - Determinação da Rocha .....	51

3.1.1 - Preparação e Caracterização das Amostras.....	51
3.1.2 - Dureza Knoop .....	52
3.1.3 - Análise do Riodacito por Difratomia de Raios X e Fluorescência de Raios X .....	54
3.1.4 - Análise Petrológica e EDS .....	56
3.2 - Definição das Geometrias de Usinagem e Ferramentas.....	57
<b>4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>63</b>
4.1 - Dureza Knoop .....	63
4.2 - Difratomia de Raios X no Riodacito.....	65
4.3 - Fluorescência de Raios X .....	66
4.4- Análise Petrográfica e EDX .....	69
4.5 - Ensaio de Fresamento CNC no Riodacito .....	72
4.6 - Testes de Fresamento em Riodacito.....	73
4.7 - Comparativo de Usinagem e Elaboração de Mapa de Tomada de Decisão.....	83
4.8 - Validação da Metodologia .....	91
<b>5 - CONCLUSÕES .....</b>	<b>94</b>
5.1 - Sugestões para futuros Trabalhos.....	95
<b>6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>96</b>
<b>APÊNDICE A - TESTES PRELIMINARES.....</b>	<b>101</b>
<b>APÊNDICE B - DESENHOS TÉCNICOS.....</b>	<b>112</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo o Manual de Oslo, uma publicação da Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento - OECD , Departamento Estatístico da Comunidade Européia - OCDE e a Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP, o desenvolvimento tecnológico e a inovação são cruciais para o crescimento da produtividade e do emprego. Seguindo a mesma tendência o Instituto Euvaldo Lodi - IEL na publicação “Brasil Inovador” (BRANDÃO; GONÇALVES, 2006), afirma que inovações acrescentam valor a produtos, ajudando as empresas a sobreviver num cenário competitivo.

Um dos pontos de consenso nas discussões entre os membros da cadeia produtiva é a necessidade de produtos inovadores. Eles devem constituir diferencial que suplante a competição por preço e ofereça possibilidade de conquista de mercado. Além disso, deve contar com especificações técnicas e processos que garantam a qualidade em grandes escalas de produção. A pesquisa em design, em engenharia e em tecnologia é reconhecida como o caminho para a solução desta demanda. Não é apenas fazer coisas diferentes, mas, também, fazer as mesmas coisas de formas diferentes, criando, como refere Drucker (2002), novos potenciais de satisfação. Segundo Simantob (2007), as inovações podem ser classificadas em dois grandes grupos: a inovação radical que, resumidamente, aborda a incessante busca pela ruptura e quebra de paradigmas e a inovação incremental que caracteriza-se por uma busca de aperfeiçoamento constante e gradual.

Freitas (2006) aponta que a partir dos anos 2000, com o aumento das tendências de globalização, as indústrias têm enfrentado um forte aumento da concorrência em âmbito internacional. A competição pela conquista de mercado vem exigindo a redução de prazos e custos, bem como a melhoria de qualidade dos produtos. Isso se reflete diretamente nas

atividades de projeto, pela exigência de crescente aperfeiçoamento das metodologias de projeto e manufatura.

Um dos materiais com grande potencial de inovação são as rochas ornamentais e de revestimento. Segundo a Abirochas (Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais - 2010) rochas ornamentais, também designadas por rochas lapídeas, rochas dimensionais e materiais de cantaria, abrangem os tipos litológicos que podem ser extraídos em blocos ou placas, cortados em formas variadas e beneficiados através de esquadreamento, polimento, etc.. Do ponto de vista comercial, são subdivididas basicamente em mármore e granitos, numa designação mais ampla do que os termos petrológicos tradicionais (BRANDÃO *et.al.* 1991). Os mármore englobam todas as rochas carbonatadas, enquanto os granitos abrangem, genericamente, as rochas silicatadas incluindo os tipos ígneos: ácidos, intermediários e básicos em jazimentos plutônicos e vulcânicos. Alguns outros tipos litológicos, incluídos no campo das rochas ornamentais, são os quartzitos, serpentinitos e ardósias, também muito importantes setorialmente (RIBEIRO *et.al.* 2005).

O aspecto estético é o principal condicionante para o uso de rochas ornamentais. Junto a este fator, devem ser consideradas as características da rocha, tipologia do jazimento, bem como os possíveis defeitos decorrentes das etapas de extração e beneficiamento (FRASCÁ & QUITETE, 2000). Atualmente as aplicações das rochas ornamentais são quase ilimitadas e, segundo Alencar *et.al.* (1996), podem ser reunidas em quatro grupos: arquitetura e construção, construção e revestimento de elementos urbanos, arte funerária, e arte e decoração. Apesar da diversidade de aplicações percebe-se a geração de somente seis tipos básicos de produtos, todos com baixo valor agregado: blocos, chapas, placas para revestimento, ladrilhos, pisos e manufaturados em menor escala.

Segundo Ribeiro (2005) o Brasil apresenta enorme potencial geológico para rochas ornamentais ocupando 5º lugar na produção mundial. Segundo Chiodi Filho (2004) o Brasil ainda dispõe de 500 tipos de rochas ornamentais com boa aceitação no mercado internacional e o segundo maior parque fabril para serragem de rochas, com cerca de 1300 teares (equipamento para o desdobramento dos blocos de rocha em placas) em operação onde os cortes dos blocos são feitos essencialmente em teares multilâminas que utilizam granalha de aço como elemento abrasivo. Apesar do potencial existente e da capacidade instalada a participação brasileira no mercado se faz, na maioria das vezes como fornecedor de matéria-prima ou de produtos de baixo valor agregado (SOSSAI, 2006).

Estima-se movimentação, segundo a CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais mais conhecida como Serviço Geológico do Brasil, 2010), de US\$ 18 bilhões/ano nos mercados internos dos países produtores, de US\$ 12 bilhões/ano com a comercialização de materiais brutos e beneficiados, no mercado internacional, bem como de US\$ 10 bilhões/ano para negócios com máquinas, equipamentos, insumos, materiais de consumo e prestação de serviços. A produção mundial de rochas ornamentais e de revestimento evoluiu de 1,5 milhões de ton/ano, na década de 20, para um patamar atual de 65 milhões de ton/ano. Esse salto no consumo de rochas ornamentais pode ter sido impulsionado tanto pelos novos tipos de utilização destes materiais nas paisagens urbanas, principalmente no que se refere a obras de revestimento, quanto por novas tecnologias de pesquisa mineral, extração, manuseio, transporte e beneficiamentos primário e secundário.

O beneficiamento primário (serragem ou desdobramento) constitui a primeira etapa do processo de industrialização das rochas ornamentais (KASCHNER, 1996). Nele, os blocos provenientes do processo extrativo são cortados em chapas, tiras ou espessores, com espessuras próximas daquelas que terão os produtos finais. Para isso são utilizados equipamentos específicos como teares, talha-blocos de disco diamantado ou máquinas de corte com fio diamantado (monofios).

Os avanços tecnológicos permitiram o aproveitamento e difusão de diversas rochas anteriormente não comercializadas. Dentre estes materiais pode ser citado o basalto, cujo processo de beneficiamento propiciou novas utilizações, soluções estéticas e funcionais diferenciadas e confiáveis na construção civil.

Para otimização do processo e conseqüente ganho de produtividade, é de grande importância que se considere a rocha “realmente um produto natural”, lembrando que na sua “produção” ou seja, na sua gênese, não existe controle de qualidade. Trata-se, portanto, de um material com diversidade em suas características e que necessita de um controle tecnológico desde a lavra até o lustro (RIBEIRO, 2005).

Atualmente cerca de 80% da produção mundial é transformada em chapas e ladrilhos para revestimentos, 15% desdobrada em peças para arte funerária e 5% para outros campos de aplicação. Aproximadamente 60% dos revestimentos referem-se a pisos, 16% a fachadas externas, 14% a interiores e 10% a trabalhos especiais de acabamento. Segundo Moreiras (2005), o Brasil vem aumentando sua participação no mercado mundial na exportação de

produtos para revestimento (chapas brutas, chapas polidas, placas, ladrilhos e outros), devido a modernização da indústria nacional, tornando o produto competitivo, frente aos internacionais, demonstrados pela produção mensal de 4.000.000 m<sup>2</sup> de chapas. Um dos principais motivos desse desenvolvimento, segundo Moreiras (2005), é a interação ocorrida entre empresas, instituições de pesquisa e universidades.

Apesar da visível expansão e do aumento da representatividade brasileira no mercado, os avanços tecnológicos utilizados no desdobramento final de rochas ornamentais se limitam ao aprimoramento dos equipamentos de corte, principalmente na durabilidade dos discos diamantados, e ao polimento, buscando atender num primeiro momento os requisitos de comercialização, produção e distribuição. Coimbra Filho (2006) coloca ainda que a indústria brasileira vem registrando acréscimos sucessivos, resultantes das melhorias das técnicas operacionais, dentre elas a qualificação do processo de controle da lama abrasiva nas micro e pequenas empresas do setor.

No corte das rochas ornamentais o desgaste abrasivo é proporcional à dureza de seus minerais. A dureza utilizada comumente por geólogos e mais divulgada na literatura é a escala Mohs, uma escala de dureza relativa, não linear, onde se compara a capacidade de um material riscar outro. Pela escala Mohs o diamante, mineral mais duro, possui uma dureza 10 enquanto o talco possui dureza 1. Todos os demais minerais se enquadram nesse intervalo. O desgaste de rochas pode também ocorrer por escarificação (arranque) dos grãos minerais, e parece estar condicionada não a composição, mas à textura dos cristais. Ainda pouco difundida no Brasil a dureza Knoop teve sua utilização iniciada somente em 1996, não havendo ainda normas nacionais para padronizar sua realização. No entanto este ensaio é normatizado na Espanha pelas normas UNE 22-188 (para mármore) e UNE 22-178 (para granitos) e, segundo Trillo (1996), está sendo elaborado pelo Comitê Europeu de Normalização, Comitê Técnico 246 “Pedra Natural” (CEN/TC 246) a padronização do uso da Escala Knoop para rochas ornamentais na União Européia. A utilização da dureza Knoop, escala absoluta, se mostra bastante promissora, como demonstra Quitete (2002), na caracterização de rochas ornamentais.

Ribeiro (2005) coloca ainda que países desenvolvidos que atuam de forma marcante na indústria da pedra, além de terem tradição no setor, apresentam domínio das técnicas de extração, beneficiamento e produção de equipamentos. O Brasil, apesar de ter apresentado significativa melhora na qualidade operacional de seus parques industriais, ainda não tem

atentado para a importância de desenvolver, de forma mais intensa, pesquisas em desenvolvimento de produtos nesse importante setor produtivo. Percebe-se portanto grande potencialidade de aprimoramento e/ou inclusão de novos processos no beneficiamento de rochas ornamentais, entre eles pode-se destacar o fresamento por comando numérico computadorizado (CNC).

Das consideradas rochas ornamentais e de revestimento os mármore representam, na atualidade, cerca de 45% da produção mundial; 40% atribuídos aos granitos, 10% aos quartzitos, ardósias e basaltos. A participação dos granitos no cenário mundial elevou-se de um patamar de 15% no princípio da década de 50, para 22%, na de 70, 38% em meados da década de 80, até os atuais 40%, incrementando a demanda global sem restringir a utilização dos mármore. Os basaltos, que possuem ainda pouca penetração nesse segmento, em torno de 1,3% das exportações brasileiras segundo Chiodi Filho (2004), são comercializados e utilizados normalmente com superfícies naturais em peças não calibradas, extraídos diretamente por delaminação mecânica de chapas na pedreira, são por sua vez designados como rochas processadas simples sem um apelo comercial através da forma ou acabamento ou texturização superficial (ABIROCHAS, 2010). A produção brasileira de rochas ornamentais segundo Chiodi Filho (2004) está distribuída da seguinte maneira: o granito com uma produção anual de 3.450.000 t representa 57,5% do total, o mármore com uma produção anual de 1.000.000 t representa 16,5% do total; as demais rochas, a ardósia, o quartzito foliado, a pedra piracema, o basalto, o quartzito maciço, a pedra cariri, o arenito, a pedra sabão a pedra morisca e outros possuem uma produção anual de 1.550.000 t, o que representa 26% do total extraído de solo brasileiro. Também segundo Chiodi Filho (2004) a região brasileira que mais se destaca na extração de rochas é a sudeste com uma produção anual de 4.390.000 t, seguindo das regiões norte e nordeste com uma produção anual de 920.000 t. A região sul produz anualmente 540.000 t e a região centro-oeste 150.000 t.

Posto este cenário percebe-se, portanto, dois aspectos ainda pouco explorados em rochas ornamentais, especialmente no basalto que, segundo Motoki (2004), ocorrem em porções maciças de derrames vulcânicos do Estado do Rio Grande do Sul e apresentam cor mais escura entre todas as rochas ornamentais do Brasil. Primeiro: a inclusão de novas tecnologias de beneficiamento e agregação de valor por processos não convencionais para este setor e segundo: a caracterização das propriedades, principalmente a dureza através do método Knoop para esta rocha e a correlação existente com desgaste abrasivo.

Antes de discutir as possibilidades supracitadas, para criação de produtos diferenciados, faz-se necessária a apresentação de alguns conceitos importantes, a fim de fornecer subsídios para o melhor entendimento das discussões realizadas ao longo o trabalho. A Tese se inicia com uma visão multidisciplinar contemplando no CAPÍTULO 2 uma revisão bibliográfica sobre o assunto onde são abordadas as rochas de uma maneira mais ampla, desde sua formação e principais características; o basalto, o riodacito, suas origens, características e utilizações. Também são apresentadas, neste capítulo, as técnicas qualitativas e quantitativas utilizadas neste trabalho, como a dureza Knoop, sua aplicabilidade e padrões utilizados; difratometria e fluorescência de raios X, microscopia eletrônica, análise petrográfica e outros estudos necessários para a caracterização das amostras. Além disto é apresentado o processo CNC no desdobramento de materiais de elevada dureza, suas características, seus parâmetros e determinações e suas potencialidades. No CAPÍTULO 3 são apresentados os materiais e métodos utilizados nos experimentos, os quais serão baseados na aplicabilidade do fresamento CNC em riodacito; no CAPÍTULO 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos através dos procedimentos experimentais além do mapa de tomada de decisão. O CAPÍTULO 5 apresenta as conclusões obtidas com base nas discussões e experimentos realizados e, por fim, são apresentados os referenciais bibliográficos para realização desta Tese de Doutorado.

## **1.1 - Objetivo Geral**

É objetivo principal desta pesquisa analisar a potencialidade de uso de processos de fresamento CNC em altas velocidades HSM (*High Speed Machining*) no beneficiamento do riodacito e determinar os parâmetros de fresamento para obtenção dos melhores padrões na relação tempo de usinagem *versus* desgaste da ferramenta *versus* abrasão do material.

### **1.1.1 - Objetivos Específicos**

São objetivos específicos desta pesquisa:

I - Caracterizar o riodacito através de ensaios de difratometria de raios x e fluorescência de raios X;

II - Determinar a dureza do riodacito através de ensaios Knoop;

III - Verificar a potencialidade do uso de fresamento HSM no riódacito na elaboração de diferentes texturas e acabamentos;

IV - Determinar os parâmetros de usinagem em riódacito utilizando ferramentas diamantadas policristalinas de baixo custo;

V - Verificar a viabilidade de repetibilidade dos resultados obtidos

## **2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

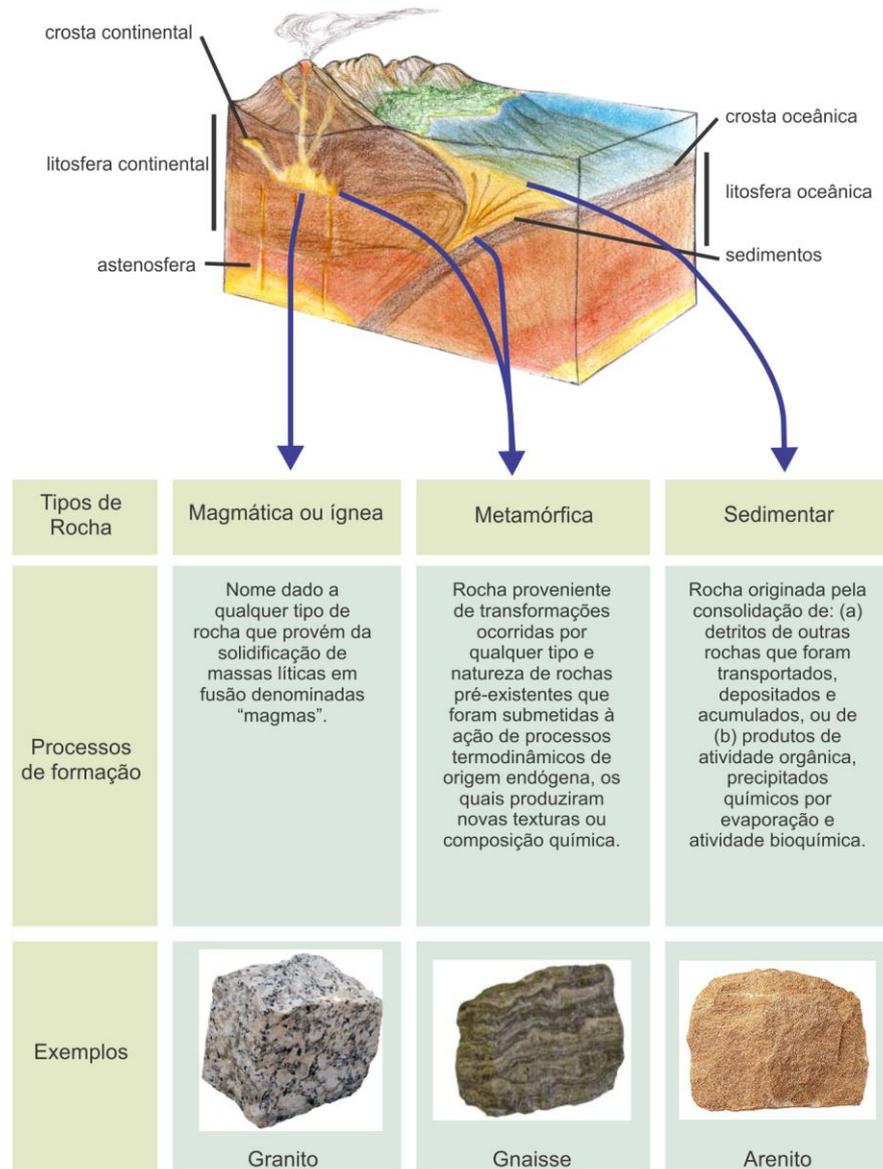
### **2.1 - Rochas e Minerais - Formação e Composição**

Segundo Selley *et. al.* (2005) rochas são, por definição, produtos consolidados, resultantes da união natural e da forma de ligação dos seus grãos minerais, e são caracterizadas principalmente em função da sua estrutura, podendo estas serem maciças, com cavidades, apresentando planos cristalográficos orientados ou não, dos seus materiais e da sua textura que revela o tamanho, a forma e o relacionamento dos seus constituintes.

Os materiais, ou grãos minerais, constituintes das rochas podem ser classificados em dois grandes grupos: os minerais essenciais (aqueles que sempre estão presentes e são os mais abundantes que geralmente determinam o nome da rocha) e minerais acessórios (aqueles que podem, ou não, estar presentes, na rocha). As rochas, quando compostas em sua totalidade por minerais pertencentes a uma mesma espécie mineralógica, são denominadas rochas monomineralógicas. Já quando constituídas por diferentes minerais, são denominadas como plurimineralógicas (TEIXEIRA, 2003).

Teixeira (2003) indica na obra “Decifrando a Terra” que a classificação das rochas deve considerar critérios que permitam o agrupamento segundo suas características de similaridade. A principal é a genética, em que as rochas estão agrupadas conforme sua formação na natureza e, sob este prisma, se dividem em três grandes grupos: magmática ou ígneas, sedimentares e metamórficas (Figura 1).

Figura 1 - Agrupamentos de rochas conforme sua gênese (magmática ou ígnea, metamórfica e sedimentar) e processos de formação.

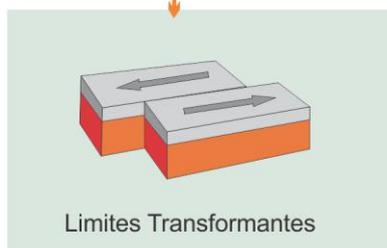
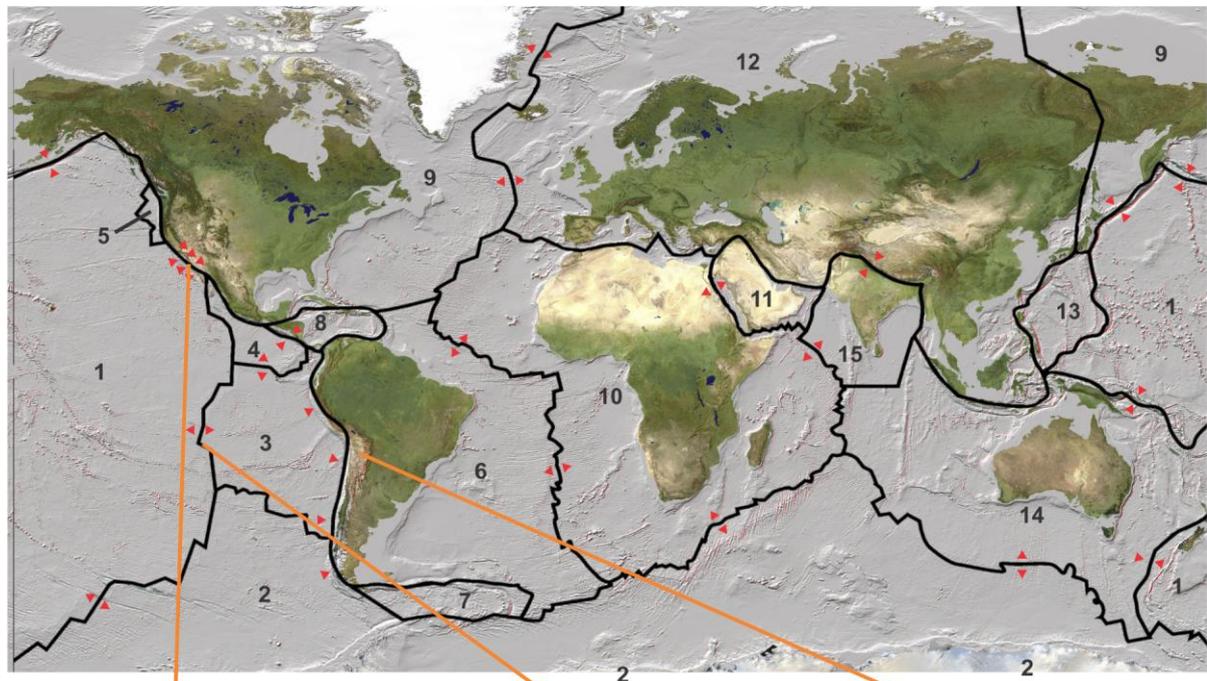


Adaptado em 25/07/2011 de Frank Press et al, 2006

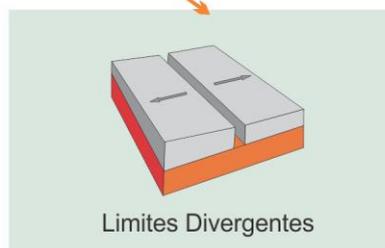
### 2.1.1 - Rochas Ígneas

Todos os processos que envolvem rochas no estado líquido em ambiente plutônico, conhecido como magma, ou em ambiente tectônico, conhecido como lava, são considerados processos ígneos. Rochas ígneas são aquelas que se originam do resfriamento dos magmas e/ou lavas e constituem a base da formação da crosta terrestre. Processos ígneos estão intimamente relacionados com a tectônica de placas, identificando na maioria das vezes, seus limites, sejam eles convergentes e divergentes (Figura 2) (SELLEY, 2005).

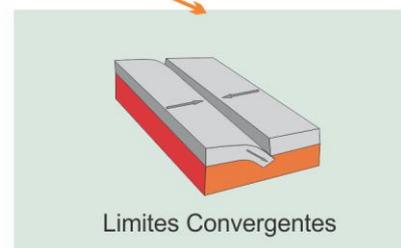
Figura 2 - Distribuição das principais placas tectônicas. As setas vermelhas indicam a direção dos deslocamentos. As setas em laranja apontam exemplos de limites e relações interplacas podendo ser transformantes, divergentes ou concordantes.



Os limites transformantes ocorrem quando há um movimento lateral entre duas placas podendo seus efeitos serem observáveis na superfície como, por exemplo, na Falha de San Andreas nos EUA.



Os limites divergentes são locais onde as correntes de convecção atuam em direções contrárias originando rupturas, como por exemplo, no assoalho oceânico pelas quais é expelido o magma. Este tipo de magmatismo basáltico forma, por exemplo, as dorsais meso-oceânicas.



Nos limites convergentes as placas se movimentam uma em direção à outra podendo, neste caso, uma afundar por sob a outra nas "zonas de subducção".

Podem ocorrer entre uma placa oceânica e uma placa continental ou entre placas continentais formando cadeias montanhosas como, por exemplo, os Andes.

1 Placa do Pacífico  
2 Placa Antártica  
3 Placa de Nazca  
4 Placa de Cocos  
5 Placa Juan de Fuca

6 Placa Sul Americana  
7 Placa Scotia  
8 Placa Caribenha  
9 Placa Norte Americana  
10 Placa Africana

11 Placa Arábica  
12 Placa Euroasiática  
13 Placa das Filipinas  
14 Placa Australiana  
15 Placa Indiana

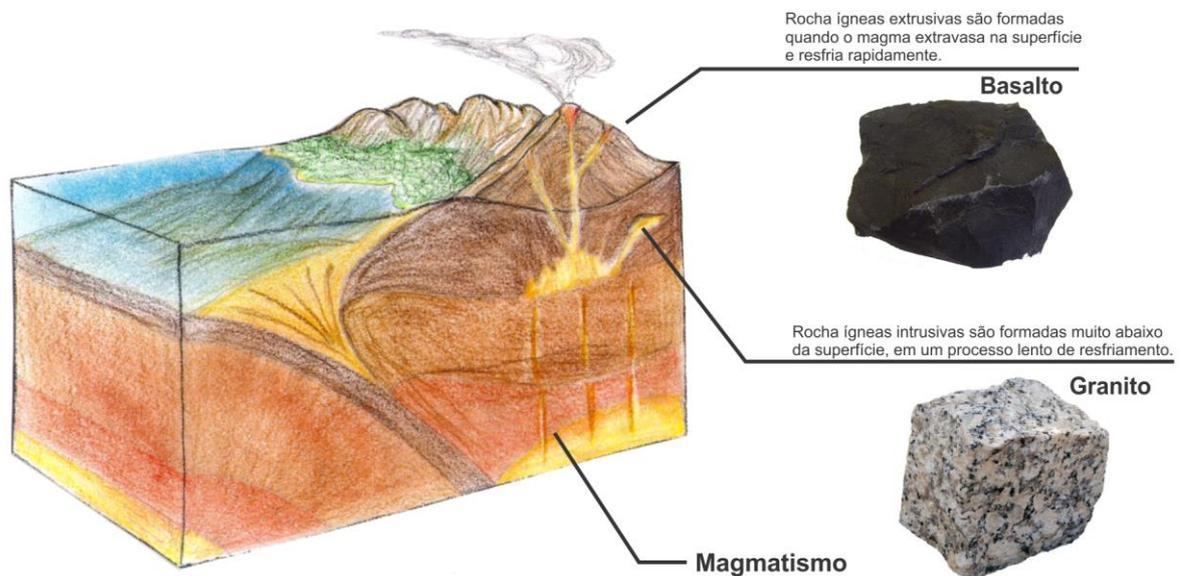
Adaptado em 26/07/2011 de <http://www.nced.umn.edu/system/files/worldmap.jpg>,  
<http://oceanexplorer.noaa.gov/facts/plate-boundaries.html> e <http://pubs.usgs.gov/publications/text/slabs.html>

As rochas ígneas podem ser classificadas como efusivas ou eruptivas, de diques ou hipoabissais e de profundidade, de acordo com o lugar de sua formação na crosta terrestre. As primeiras compreendem as lavas vulcânicas que extravasaram e se solidificam próximas à

superfície da crosta terrestre; as segundas, embora não cheguem a extravasar na superfície, pelos dutos vulcânicos, cristalizam-se muito próximo dela; as rochas de profundidade são formadas a partir do resfriamento do magma no interior da crosta, nas partes profundas da litosfera, sem contato com a superfície (TURNER & VERHOOGEN, 1975). Os tipos de processos ígneos, em especial em ambiente tectônico, e os tipos de rochas ígneas resultantes, são característicos deste ambiente podendo ser do tipo basáltico ou intermediário (TEIXEIRA 2003).

O magmatismo básico, que origina rochas como basalto e gabro, resulta da fusão parcial do manto e é observado, predominantemente, em dorsais meso-oceânicas, no entorno das grandes províncias ígneas intracontinentais, na região de intraplacas e em zonas de subducção. Já o magmatismo intermediário ou silícico (que origina rochas como o andesito e granito, entre outras) é limitado à crosta continental sendo sua ocorrência mais comum acima das zonas de subducção (Figura 3) (SELLEY, 2005).

Figura 3 - A formação de rochas ígneas extrusivas (aqui exemplificada com o basalto) e rochas ígneas intrusivas (aqui exemplificada com o granito).



Adaptado em 25/07/2012 de Frank Press et. al, 2006

A composição dos magmas pode variar quimicamente em seus óxidos e elementos subordinados ( $\text{CO}_2$ , Cl, F, S, NiO, BaO, SrO,  $\text{Li}_2\text{O}$ , Cu, Zn e Pb) e principalmente em seus óxidos essenciais ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , FeO, MnO, MgO, CaO,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{ZrO}_2$  e  $\text{SiO}_2$ ). As rochas magmáticas são ácidas (granitos e riolitos, por exemplo), quando contém mais de 65% de sílica; intermediárias, quando o teor de sílica fica entre 65% e 52% (sienitos,

dioritos e monzonitos, por exemplo); básicas (basaltos e gabros, por exemplo) com teor de sílica entre 52 e 45% e; ultrabásicas (peridotitos e piroxenitos, por exemplo) quando o teor de sílica é inferior a 45% (SGARBI, 2007).

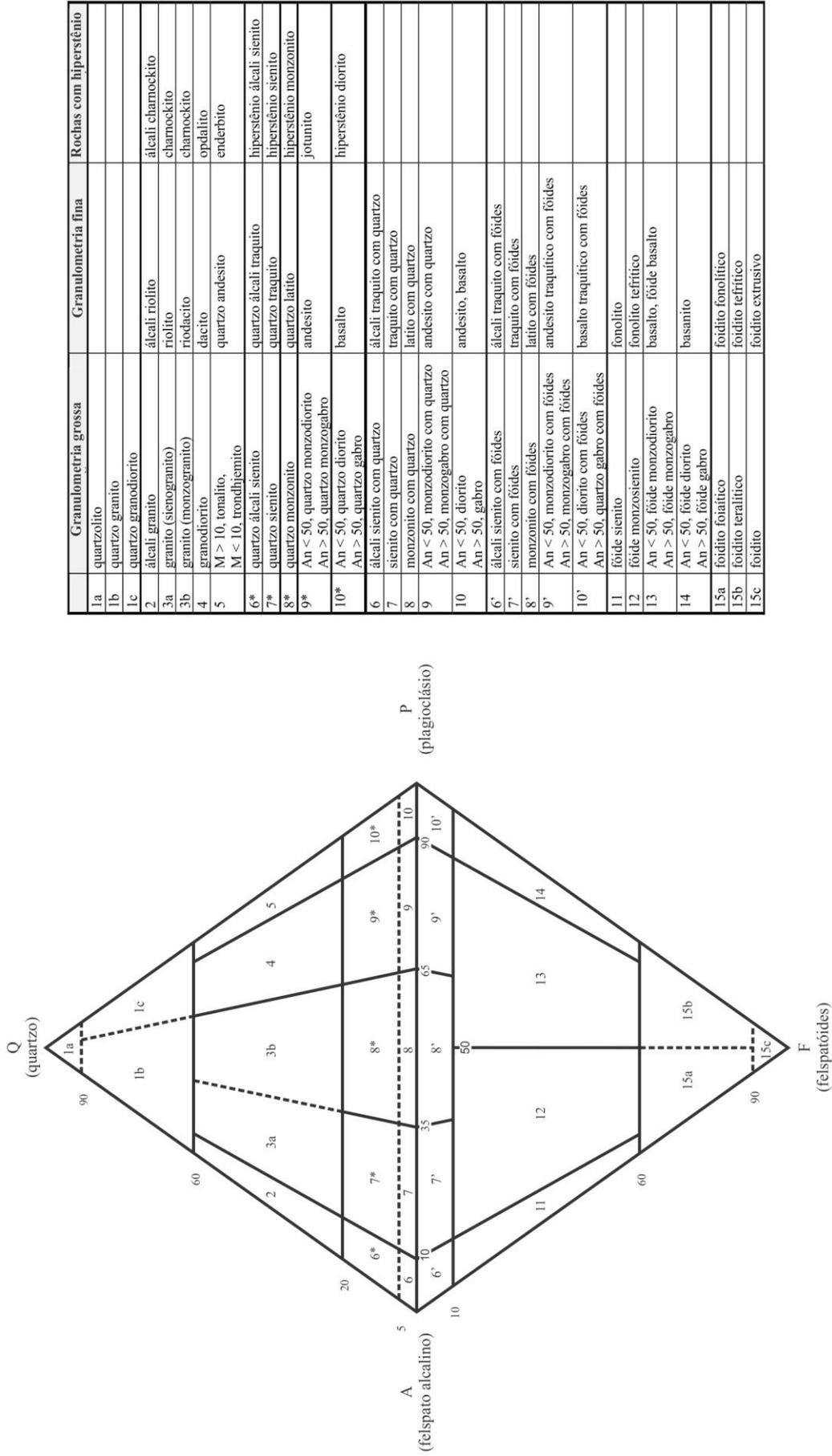
As rochas magmáticas ácidas são, usualmente, mais ricas em álcalis e mais pobres em óxidos de cálcio, de ferro e de magnésio do que as básicas e, por este motivo, predominam os minerais de cor clara ou leucocráticos. Já as rochas básicas e as ultrabásicas, relativamente pobres em sílica, mas ricas em óxidos de cálcio, de ferro e de magnésio, caracterizam os minerais de cor escura ou melanocrática. Quando a cor é intermediária, denomina-se mesocráticas, e as inteiramente pretas, ultramelânicas (SGARBI, 2007).

Relativamente às associações de minerais em um mesmo espécime, é possível classificar as rochas magmáticas em supersaturadas, saturadas e insaturadas conforme o teor de sílica presente. A rocha supersaturada possui sílica livre em quaisquer de suas modificações sólidas distintas (quartzo, tridimita e cristobalita). São exemplos o granito e o riolito. As rochas saturadas não possuem sílica livre como um dos seus constituintes normais, como por exemplo, a leucita, a nefelina, a sodalita, a olivina, entre outras. Já as rochas insaturadas são as que possuem entre seus constituintes, um ou mais minerais citados como insaturados. Incluem-se como rochas insaturadas os basaltos, gabros e outros (PHILPOTTS, 2003).

A proporção dos minerais formadores das rochas ígneas é variável nas rochas, o que permite a criação de diversas famílias e subfamílias. Os principais minerais que compreendem a formação das famílias de rochas magmáticas são: família da sílica (quartzo, tridimita, cristobalita); família do feldspato (ortoclásio e plagioclásio); família do feldspatóide (leucita, nefelina, sodalita, etc.); família da mica (biotita, moscovita, etc.); família do anfibólio; família do piroxênio (orto e clinopiroxênios); família da olivina; magnetita; apatita; titanita e zircão (PHILPOTTS, 2003).

Conforme descrito anteriormente, a classificação das rochas ígneas ocorre em razão da concentração de silício e outros elementos. Usualmente, para esta classificação, são utilizados ou o diagrama QAPF (Q-Quartzo; A-Feldspato Alcalino; P-Plagioclásio e; F-Feldspatóide) ou o diagrama Tas (Total-Alcali *versus* Sílica). O diagrama QAPF (Figura 4) foi concebido pelo geólogo Streckeisen e é utilizado para classificação das rochas vulcânicas e plutônicas (SGARBI, 2007).

Figura 4 - Diagrama QAPF para classificação de rochas ígneas (Q - Quartzo; A - Felsdspato Alcalino; P - Plagioclásio e; F - Feldspatóide), segundo Streckeinsen (1976).

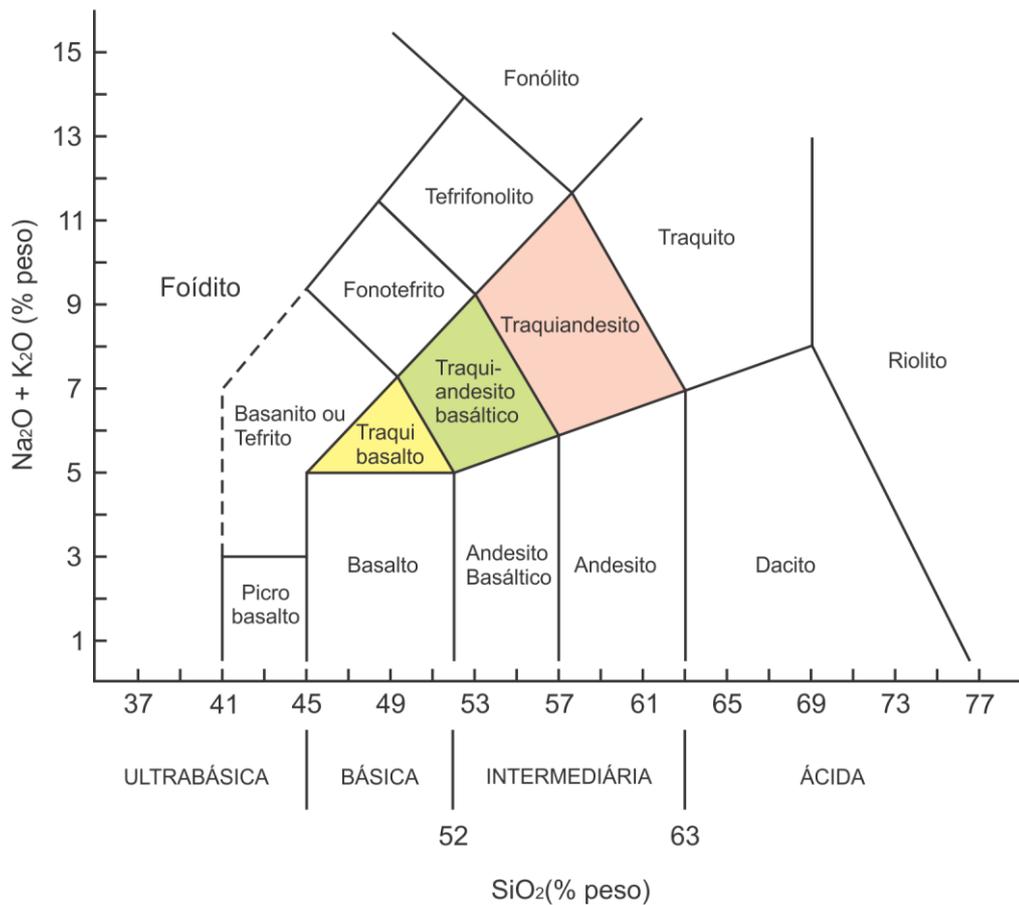


	Granulometria grossa	Granulometria fina	Rochas com hiperstênio
1a	quartzolito		
1b	quartzo granito		
1c	quartzo granodiorito		
2	álcali granito	álcali riolito	álcali charnockito
3a	granito (steno-granito)	riolito	charnockito
3b	granito (monzogranito)	riodacito	charnockito
4	granodiorito	diacito	opdalito
5	M > 10, tonalito, M < 10, trondhjemito	quartzo andesito	enderbita
6*	quartzo álcali sienito	quartzo álcali traquito	hiperstênio álcali sienito
7*	quartzo sienito	quartzo traquito	hiperstênio sienito
8*	quartzo monzonito	quartzo laito	hiperstênio monzonito
9*	An < 50, quartzo monzodiorito	andesito	jotunito
10*	An > 50, quartzo monzogabro	basalto	hiperstênio diorito
	An < 50, quartzo diorito		
	An > 50, quartzo gabro		
6	álcali sienito com quartzo	álcali traquito com quartzo	
7	sienito com quartzo	traquito com quartzo	
8	monzonito com quartzo	laito com quartzo	
9	An < 50, monzodiorito com quartzo	andesito com quartzo	
	An > 50, monzogabro com quartzo		
10	An < 50, diorito	andesito, basalto	
	An > 50, gabro		
6'	álcali sienito com foides	álcali traquito com foides	
7'	sienito com foides	traquito com foides	
8'	monzonito com foides	laito com foides	
9'	An < 50, monzodiorito com foides	andesito traquitico com foides	
	An > 50, monzogabro com foides		
10'	An < 50, diorito com foides	basalto traquitico com foides	
	An > 50, quartzo gabro com foides		
11	foides sienito	fonolito	
12	foides monzosienito	fonolito tefritico	
13	An < 50, foides monzodiorito	basalto, foides basalto	
	An > 50, foides monzogabro		
14	An < 50, foides diorito	basamito	
	An > 50, foides gabro		
15a	foidito foaiítico	foidito fonolítico	
15b	foidito teralítico	foidito tefritico	
15c	foidito	foidito extrusivo	

Adaptado em 13/03/2012 de WERNICK, 2004 e MOTOKI, 2004.

A classificação das rochas ígneas eruptivas através do diagrama TAS é baseado na comparação do teor ponderal (%) dos óxidos de sódio e potássio ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) e o teor de sílica, em porcentagem. Para classificação das rochas ígneas através do diagrama TAS a análise deve ser recalculada para 100% desconsiderando a água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) e demais elementos. Trata-se um gráfico XY simples com o eixo X mostrando sílica ( $\text{SiO}_2$ )% em peso e do eixo Y mostrando álcalis ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ )% em peso (Figura 5) (LE MAITRE, 2002).

Figura 5 - Classificação de rochas ígneas vulcânicas por meio do diagrama TAS (Total-Alcali *versus* Sílica)



Subdivisões	Traquibasalto	Traquiandesito basáltico	Traquiandesito
$\text{Na}_2\text{O} - 2.0 \geq \text{K}_2\text{O}$	hawaiiito	mugearito	benmoreito
$\text{Na}_2\text{O} - 2.0 < \text{K}_2\text{O}$	traquibasalto potássico	shoshonito	latito

Adaptado em 12/08/2012 de LE MAITRE, 2002

### **2.1.1.1 - Petrogênese Magmática**

A origem, evolução e processos de formação e cristalização das rochas magmáticas são o objeto da petrogênese magmática. Seu campo de estudo é vasto, pois as rochas magmáticas formam a maior parte do bloco continental e oceânico. As rochas magmáticas englobam as rochas vulcânicas (ou efusivas) e as intrusivas (TEIXEIRA, 2003).

A geoquímica é de grande importância para o trabalho de pesquisa da petrogênese ígnea, pois se ocupa em determinar a composição principal e os traços dessas rochas, assim como os magmas dos quais elas se originaram. Alguns dos principais objetos de pesquisa no campo da petrogênese magmática são: (I) a forma e a estrutura dos corpos magmáticos ou ígneos, sejam eles fluxos de lava ou intrusões, e suas relações com as rochas que os cercam; (II) a gênese dos minerais que formam as rochas magmáticas, cuja determinação é inicialmente feita com o microscópio petrográfico; (III) a classificação das rochas com base em características de textura, tamanho dos grãos, frequência e composição dos minerais constituintes; (IV) o fracionamento dos magmas de origem pelo processo de diferenciação magmática, que pode resultar numa seqüência evolutiva de produtos magmáticos geneticamente relacionados e; (V) a evolução das rochas magmáticas ao longo do tempo geológico. A petrogênese experimental de alta pressão estuda as condições de pressão e temperatura sob as quais se formam os diferentes magmas e se cristalizam seus componentes ígneos (PHILPOTTS, 2003).

Para o estudo da petrogênese ígnea são utilizados, segundo Craig (1994), o microscópio petrográfico além de outros equipamentos, quase todos com a finalidade de determinar a composição química das rochas e dos minerais. Alguns exemplos são os espectrômetros de massa, fluorescência e difração de raios X.

### **2.1.1.2 - Basalto**

Considerando as duas variedades levemente diferentes (o olivina-basalto, mais freqüente em ambientes oceânicos, e o basalto toleítico, comum em ambientes continentais), pode-se dizer que os basaltos, objeto de estudo deste trabalho, são semelhantes em todas as partes do mundo. Lavas basálticas formam os planaltos de os Deccan, na Índia, de Colúmbia, nos Estados Unidos e, em especial, o da Bacia do Paraná (Figura 6), sendo este um dos maiores em área e volume, originalmente estimado em 1.000.000 km<sup>3</sup> de lava extravasada.

Recobrando total ou parcialmente áreas do Mato Grosso e Goiás, oeste de Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, estendendo-se por parte do Uruguai, norte da Argentina e sudeste do Paraguai (SELLEY *et. al.*, 2005).

Figura 6 - Área escura no mapa indica o derrame basáltico da Bacia do Paraná

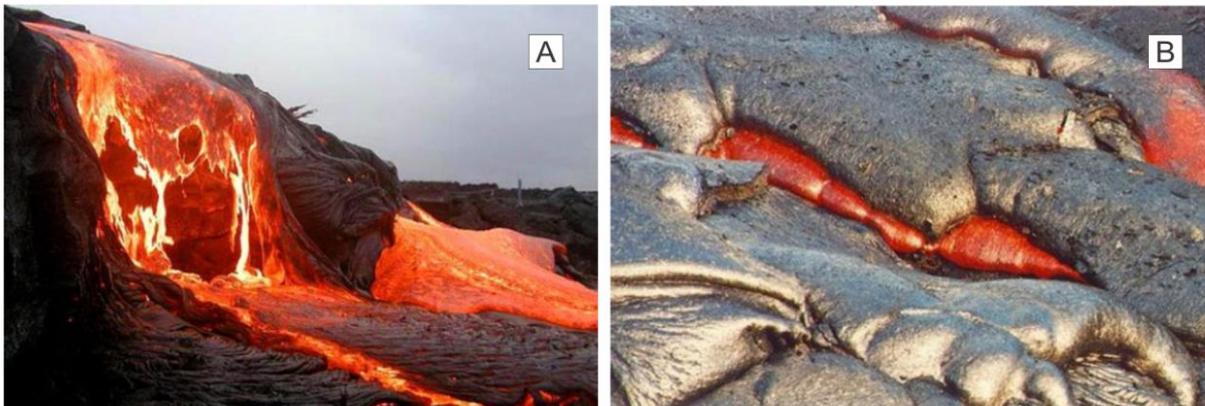


Adaptado em 10/06/2011 de <http://www.guiageo-americas.com/imagens/mapa-america-sul.jpg> e <http://vsites.unb.br/ig/sigep/sitio029/sitio029.htm>

O basalto é ainda a rocha formadora de quase todas as ilhas e fundo oceânico. Acredita-se que a lava tenha, em muitos casos, extravasado por fraturas na crosta terrestre. Em regiões de vulcanismo recente (por exemplo, nas ilhas do Hawaii (Figura 7) é possível verificar a erupção por fissuras com exarcebação localizada em pontos (vulcões). Além disso, fissuras

preenchidas com basalto (e seu afim, o diabásio), constituem a vasta maioria dos diques que atravessam as mais diversas formações da superfície do globo (TURNER, 1975).

Figura 7 - A) Atividade Vulcânica no Hawaí; B) Detalhe do resfriamento de lava expelida em atividade vulcânica.



Adaptado em 05/01/2011 de <http://www.nps.gov/havo/index.htm>

#### 2.1.1.2.1 - Caracterização

O basalto (Figura 8) caracteriza-se por ser uma rocha ígnea de coloração escura, oriunda da solidificação de lavas ou material magmático. Possui uma granulação fina (afanítica) e sua composição apresenta menor variação que qualquer outro tipo de lava. Os tipos de lava variam conforme a concentração de sílica e podem ser agrupadas em três grupos principais que são: o magma basáltico (com origem na fusão de rochas do manto e com percentual de sílica em torno de 50%); o magma andesítico (formado pela subducção de uma placa oceânica sob uma placa continental contendo percentual de sílica em torno de 60%) e o magma riolítico (forma a partir da fusão parcial de rochas constituintes da crosta continental e contém em torno de 70% de sílica) (TEIXEIRA, 2003).

Os principais constituintes minerais do basalto são o plagioclásio cálcico e piroxênios, além de minerais acessórios como a olivina, hornblenda, magnetita e feldspatos alcalinos. A composição química do basalto é constante com concentrações de  $\text{SiO}_2$  variando entre 45 e 55%. Tanto a composição química quanto a mineralógica são muito semelhantes a dos gabros e diabásios, correspondentes intrusivos, de granulação média, dos basaltos (SGARBI, 2007).

Na ocorrência de uma concentração maior de olivina, dá-se certa variação química, caracterizada como olivina-basalto, um dos tipos químico-mineralógicos mais comuns. O segundo tipo importante é o basalto toleítico, caracterizado por menor frequência ou ausência de olivina e quantidades maiores de  $\text{SiO}_2$  e feldspato alcalino acessório (SYMES, 1990).

De um modo geral os basaltos são rochas afaníticas, densas e escuras, quase pretas. O vidro, quando presente, ocupa espaço entre os cristais. Existem ainda outras variedades menos comuns de basalto com feldspatóides que recebem denominações especiais como leucita-basalto, analcita-basalto e nefelina-basalto (TURNER, 1975).

Figura 8 - Fragmento de basalto



Adaptado de: <http://www.mineropar.pr.gov.br/>

#### 2.1.1.2.1.1 - Textura

Nos derrames espessos, a textura reflete a gradação do resfriamento, passando de uma superfície vítrea para um tipo mais comum de granulação fina, afanítico, podendo no interior, em função do resfriamento lento, apresentar granulação visível a olho nu, fenerítica (PHILLPOTS, 2003). As estruturas fluidais são menos evidentes mas a superfície do derrame pode se caracterizar por protuberâncias alongadas, torcidas ou cordadas, tipo *pahoehoe*, determinadas pelo movimento da lava líquida sob uma crosta viscosa. Quando a superfície se acha mais endurecida, esse movimento pode quebrá-la, gerando um tipo de lava rica de blocos angulosos, conhecida pelo nome havaiano de AA (SGARBI, 2007).

A vesiculação é característica nos basaltos, especialmente junto a superfície superior, e em menor escala na face inferior dos derrames podendo consistir em cavidades globóides (vesículas) regularmente espaçadas, achatadas e alongadas na direção do movimento. Quando

muito abundantes, produzem escória basáltica, substância porosa de superfície rugosa e cantos de fratura agudos, que lembra a escória dos alto-fornos (SGARBI, 2007).

#### **2.1.1.2.1.2 - Alteração / Intemperismo Físico e Químico**

O basalto está sujeito ao intemperismo, principalmente nas regiões tropicais, facilmente apresentando cor parda ou vermelha, por oxidação dos compostos de ferro. Seu produto final de alteração, nos estados de São Paulo e Paraná, por exemplo, é um solo rico em substâncias minerais (TURNER, 1975).

O basalto é também afetado por vapores ou soluções aquosas quentes (hidrotermais), produzindo efeitos diferentes no intemperismo, que originam no corpo da rocha minerais secundários verdes (clorita, nontronita, etc.) podendo conferir essa cor à rocha alterada (TURNER, 1975).

Outro tipo de mineralização bastante comum nos basaltos, é a formação de zeólitas (silicatos hidratados de alumínio e metais alcalinos ou alcalinos-terrosos), por vezes acompanhados de calcedônia (ágata), quartzo, calcita e outros minerais. A zeolitização pode provocar a substituição de feldspatos na trama da rocha e precipitação de zeólitas nas cavidades (VARGAS *et. al.*, 2001).

#### **2.1.1.3 - Riodacito**

Na Bacia do Paraná, o vulcanismo do tipo fissural atingiu extensas áreas do sul do Brasil originando o Planalto Meridional Brasileiro, alternando extensões de arenito com outras extensões de basalto. Vários autores (LEINZ, (1949); ALMEIDA, (1956); SCHNEIDER, (1964); CORDANI e VANDOROS, (1967), entre outros), generalizadamente referiam esta rocha como basaltos de natureza toleítica. Estudos conduzidos por Sartori *et.al.* (1975) sobre estratigrafia e petrografia demonstraram que os derrames da porção superior eram de composição ácida, com teores de sílica superiores a 52%, variando entre dacitos e riolitos e, por esta razão, denominados por Roisemberg (1977), como riodacitos. O riodacito, rocha de revestimento comercializada como “Basalto Carijó”, possui textura afanítica com coloração cinza médio a claro e marrom, apresentando fraturamento predominantemente horizontal, consequência do plano fluidal que normalmente apresenta.

Figura 9 - Fragmento de riodacito - Basalto Carijó - oriundo da Região de Nova Prata/RS

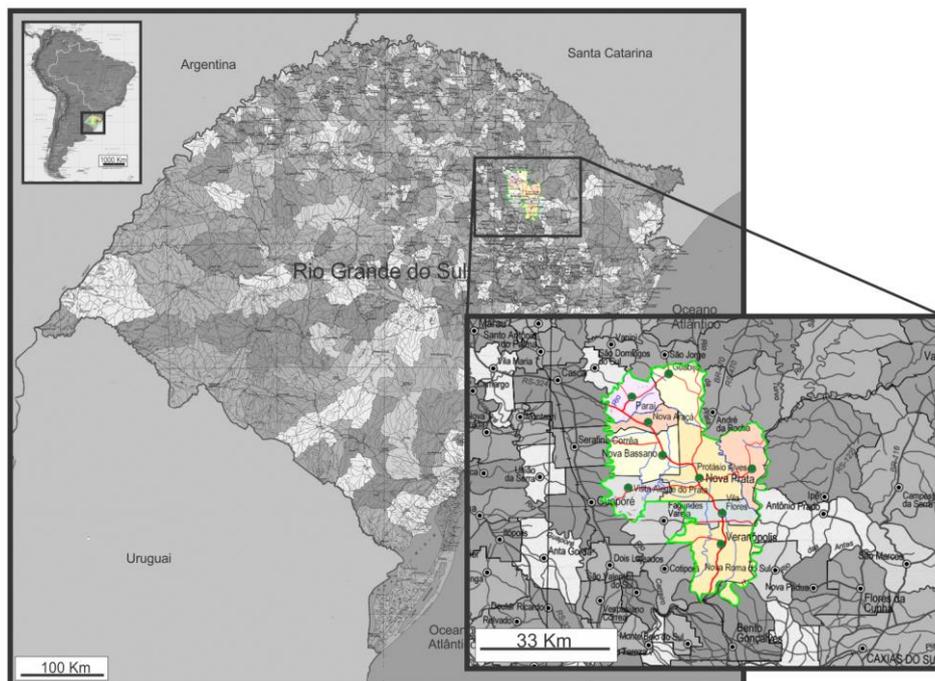


No Brasil, o setor de rochas de revestimento, segundo o Ministério de Minas e Energia - MME, em estudo realizado no ano de 2001, pode ser agrupado em 18 aglomerações produtivas, envolvendo atividades empresariais em 7 estados e 80 municípios sendo no Rio Grande do Sul, o principal produto, o riodacito.

Mais amplamente, o MME aponta no Brasil a existência de 11.500 empresas do setor responsáveis pela geração de 120.000 empregos diretos e por um parque instalado com capacidade de beneficiamento de 40.000 a 50.000 m<sup>3</sup>/ano, o que representa uma produção de 6,0 milhões de toneladas/ano e, deste total, em torno de 7%, se destaca o riodacito. As transações comerciais no setor, incluindo-se máquinas, equipamentos e insumos, movimentaram cerca de US\$ 2,5 bilhões em 2003 (BIZZI, 2003).

O riodacito tem sido utilizado como revestimento na construção civil e explorado principalmente no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul em uma região que, devido a um número expressivo de empresas de extração e beneficiamento, ficou conhecida como “Região do Basalto”. A Região do Basalto abrange, segundo a publicação Revista do Basalto (Sindicato da Indústria da Extração de Pedreiras de Nova Prata e Região, 2000), os municípios de André da Rocha, Guabijú, Nova Araçá, Nova Bassano, Nova Prata, Paraí, Protásio Alves, São Jorge, Veranópolis, Vila Flores e Vista Alegre do Prata (Figura 10).

Figura 10 - Região do Basalto no Rio Grande do Sul



Segundo dados disponibilizados pela Câmara da Indústria e Comércio (CIC), da Região do Basalto, o faturamento bruto com a extração e beneficiamento desse material é de 501,3 milhões de reais, gerando uma arrecadação para o Estado na ordem de 52,7 milhões de reais em impostos e 37 milhões de reais na forma de salários pagos, além de um volume exportado, na ordem de 48 milhões de reais que coloca o setor dentre os mais importantes para a região, sendo significativa sua participação na economia estadual e nacional.

Na região, segundo dados publicados na Hierarquia Socioeconômica, existem 300 frentes de lavra, sendo que no município de Nova Prata, conhecido também como a “Capital Nacional do Basalto”, estão registradas 104 empresas de mineração e 89 que atuam beneficiamento do riocacito, o que representa 10% da economia do município, gerando em torno de 3000 empregos, diretos e indiretos. Na Tabela 1 podem ser verificados os principais produtos, seus volumes e representatividade, obtidos através do beneficiamento do riocacito em Nova Prata.

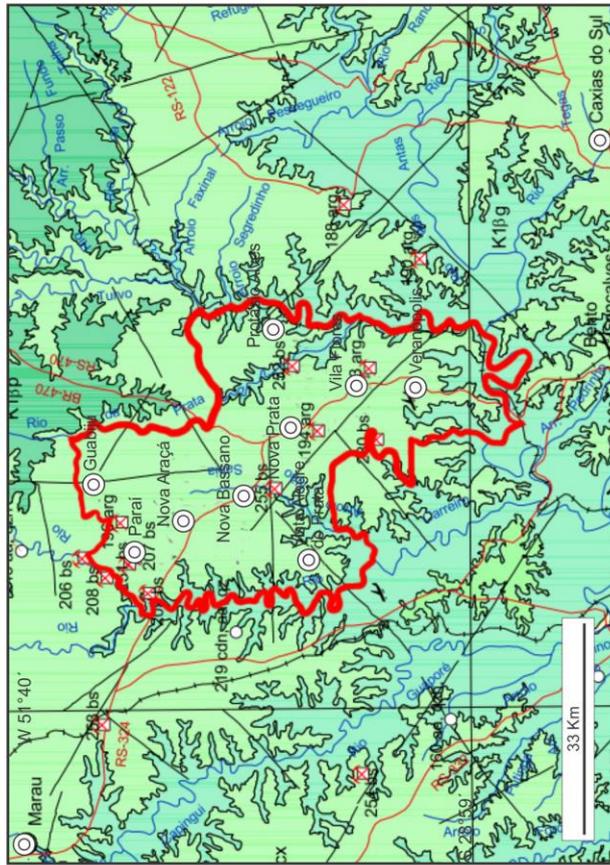
Tabela 1 - Produtos obtidos do riocacito

Principais Produtos	Volume produzido (m <sup>3</sup> /ano)	(%)
Paralelepípedos	30.000	50
Lajes	6.000	10
Retalhos para calçamento	12.000	20
Pedras para alicerce	6.000	10
Outros	6.000	10
<b>Total</b>	<b>60.000</b>	<b>100</b>

Adaptado em 08/01/2011 de Câmara da Indústria de Comércio, Região do Basalto, 2010

Figura 11 - Fragmento do Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul. Em destaque a Região do Basalto. Fazem parte da “Região do Basalto” os municípios de André da Rocha, Guabijú, Nova Araçá, Nova Bassano, Nova Prata, Parai, Protásio Alves, São Jorge, Veranópolis, Vila Flores e Vista Alegre do Prata

### Fragmento do Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul - Região do Basalto - 2006



**CONVENÇÕES DOS RECURSOS MINERAIS INDICADOS NA FOLHA**

- ✕ Mina ativa ou inativa
- ✕ Campo ativo ou inativo

**CONVENÇÕES GEOLÓGICAS**

- ☐ Contato
- Falha ou fratura, tracejada quando encoberta
- Falha ou zona de cisalhamento, tracejada quando encoberta
- Falha ou zona de cisalhamento extensional (hachuras no bloco baixo), tracejada quando encoberta
- Falha ou zona de cisalhamento transcorrente sinistral
- Diques: máficos (dm), félsico (df)

**CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS**

- ⊙ Sede Municipal
- ▬ Campo de Pousio
- Limite Estadual
- Sistema Rodoviário
- Ferrovia
- Hidrografia
- Área Edificada
- AI - Área Indígena
- Região do Basalto

#### PROVINCIA PARANÁ E MANTIQUEIRA

**Formação Serra Geral (sg):** derrames de basalto e de basalto-andesito de filiação theoleítica; riolito e riodacito. Intercala camadas de arenito, litarenito e sedimento vulcanogênico.

**Fácies Esmeralda (e):** derrames basálticos, microgranulados a afaníticos, predominantemente pretos, onde são comuns vesículas milimétricas preenchidas por vidro preto, seladonita, com presença eventual de água e cobre nativo.

**Fácies Parapanama-Pitanga (p):** derrames basálticos, granulares finos a médios, melanocráticos, contendo horizontes vesiculares bem desenvolvidos, preenchidos predominantemente por quartzo (ametista), zeólitas, seladonita e carbonatos.

**Fácies Caxias (cx):** derrames de composição intermediária a ácidas (riodacítica), mesocráticos, granulares finos a microferféricos, horizontes superiores com dijunção tabular regular bem desenvolvida e raras vesículas preenchidas por sílica. Centros de derrames maciços. Estrutura de fluxo laminar e dobras.

**Fácies Gramado (g):** derrames basálticos, granulares finos a médios, melanocráticos, contendo níveis de vesículas bem desenvolvidos no topo e incipientes na base dos derrames, normalmente preenchidos por zeólitas (carbonatos e saponita).

ÉON	ERA	PERÍODO	10 <sup>6</sup> anos
FANEROZÓICO	MESOZÓICO	CRETÁCEO	65
			135

Adaptado em 04/08/2011 de MAPA Geológico do Estado do Rio Grande do Sul . Porto Alegre: CPRM, 2006.

#### 2.1.1.4 - Processamento

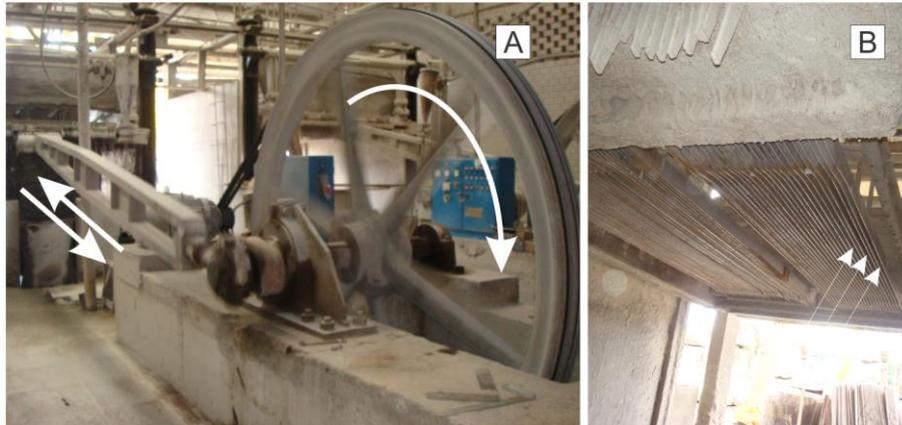
Em geral, segundo Ribeiro *et. al.*, 2005, os blocos retangulares de basalto extraídos em uma pedreira variam em volume, entre 5 e 8 m<sup>3</sup> (Figura 12). Em alguns casos, dependendo da aplicação ou valor comercial, são aproveitados também blocos a partir de 1 m<sup>3</sup>. Após sua retirada da jazida, o bloco é esquadrejado e encaminhado à serraria para seu beneficiamento. Como primeiro processo de desdobramento do bloco, a serragem é, na maioria das vezes, realizada em teares, principalmente por conjugar elevada produtividade e flexibilidade na produção de chapas.

O corte do bloco, em um tear, acontece pela ação de grãos abrasivos (diamante, granalha de aço ou outro material de elevada dureza) conduzidos por um conjunto de lâminas movimentadas alternadamente no tear. As lâminas do tear são alinhadas longitudinalmente ao maior comprimento do bloco de rocha. Os teares multilâminas (Figura 13), os mais utilizados para o beneficiamento primário dos blocos de rocha, podem ser divididos em duas categorias segundo Ribeiro *et. al.*, 2004, a saber: a) teares com cinemática retilínea, que utilizam lâminas diamantadas e refrigeradas a água e; b) teares com cinemática pendular, que utilizam granalha metálica como abrasivo. Em geral a velocidade média de corte é de 4 cm de profundidade por hora.

Figura 12 - Visita realizada em mina de extração e na beneficiadora Pratence em Nova Prata. A) Frente de lavra para retirada de placas (lajes); B) Blocos para beneficiamento.



Figura 13 - A) Tear multilâminas para beneficiamento (corte em placas) de rochas; B) Vista em detalhe do conjunto de lâminas de aço - multilâminas - utilizado no tear.



Também podem, no beneficiamento primário dos blocos, ser utilizados os teares com fios diamantados. O fio diamantado é constituído por um arame de aço tendo grãos abrasivos (diamante) fixados em sua superfície através de um processo de eletrodeposição. Este fio diamantado é pressionado contra o bloco e, em função de um movimento contínuo linear, realiza o corte da rocha igualmente em chapas (COIMBRA FILHO, 2006).

O desdobramento das chapas se dá através de cortes, retilíneos, efetuados com o emprego de discos diamantados, confeccionados em aço e superfície impregnada com grãos de diamante. Através do atrito entre o disco diamantado e a rocha se dá o corte, que ocorre pela combinação dos movimentos de rotação e translação do disco em sucessivas passagens. Posteriormente as peças são submetidas a polimento, quando há necessidade, e calibração de dimensões e por fim são estocadas (Figura 14) (KASCHNER, 1996).

Figura 14 - A) Corte do basalto através da utilização de discos diamantados. No detalhe disco diamantado utilizado no equipamento; B) Equipamento utilizado no polimento de rochas ornamentais; C) Calibração do tamanho das lajes de basalto já beneficiadas; D) Produto final em estoque.



Os produtos oriundos através de quaisquer dos processos utilizados no beneficiamento são restritos a cortes retos como, por exemplo: blocos, chapas, ladrilhos, degraus, espelhos, soleiras, peitoris, rodapés, paralelepípedos para pavimentação, pedras para muro e alicerce entre outros.

## **2.2 - Caracterização das Rochas**

A determinação das propriedades químicas, físicas, mecânicas e petrográficas das rochas é obtida através de um conjunto de ensaios e análises que as qualificam para um determinado uso. As características das rochas variam em função da mineralogia, da textura, da estrutura, do grau de intemperismo e de outros fatores do tipo litológico. Os ensaios de caracterização são realizados em corpos de prova que devem representar as características do maciço de onde foram extraídas. Análises de dureza e microdureza, difratometria de raios X, fluorescência de raios X, estudo da petrografia por microscopia ótica e eletrônica de varredura e microanálise por EDS são usualmente suficientes para o conhecimento de qualquer rocha, podendo ser utilizadas análises adicionais dependendo na especificidade do estudo.

### **2.2.1 - Dureza e Microdureza**

A dureza de uma rocha não depende necessariamente da dureza de seus componentes minerais. Essa propriedade, na maior parte das vezes, é resultado mais do estado de agregação do que propriamente das durezas individuais dos minerais que a forma (QUITETE, 1998).

Para Chiaverini (1986), a dureza de um material é um conceito relativamente complexo de definir, dadas diferentes interpretações que lhe podem ser atribuídas como resistência a penetração, absorção de energia sob cargas dinâmicas, resistência a ação do risco, resistência à abrasão e resistência ao corte. Callister (2008) define como dureza a “... propriedade mecânica ... que é uma medida da resistência de um material à deformação plástica local (por exemplo, um pequeno endentamento ou um risco)”. A resistência à ação do risco é importante para os mineralogistas e baseado nesse conceito foi criada a “Escala Mohs”. Já a “Resistência a Penetração” mede a deformação plástica dos materiais e é a que apresenta maior interesse para os engenheiros.

Ao longo dos anos foram desenvolvidos métodos quantitativos nos quais um pequeno endentador é forçado contra uma amostra de um material, sob controladas condições de carga

e de taxa de aplicação. A medida da profundidade ou o tamanho da resultante endentação determina a dureza do material onde quanto mais macio o material, maior e mais profunda a endentação e menor o número índice de dureza. Existem diferentes métodos mais convencionais para determinação da dureza, dependendo do material, a Dureza Rockwell e a Dureza Brinell (DIETER, 1981).

As limitações dos testes de dureza mencionados, principalmente no que se refere à precisão dos resultados, em função da espessura da amostra, da necessidade de medir a dureza de pequenas peças de precisão, de verificar a dureza em pequenas áreas e determinar a dureza dos microconstituíntes das ligas, assim como de cristais simples, levaram ao desenvolvimento de ensaios de “microdureza”. Duas técnicas de testes de microdureza são Knoop e Vickers (às vezes também denominado pirâmide de diamante). Nos ensaios de microdureza as cargas aplicadas são muito menores do que nos testes Rockwell e Brinell. A resultante é medida em microscópio e convertida no valor da dureza. Nos ensaios de microdureza é muito importante o preparo da amostra com lixamento e polimento para que se assegure uma endentação bem definida que possa ser precisamente medida. Os ensaios Knoop e Vickers são adequados para medição de dureza de pequenas regiões, <500  $\mu\text{m}$ ; além disso, Knoop é usado para testar materiais frágeis tais como cerâmicas e rochas (CHIVERINI, 1986; CALLISTER, 2008).

### 2.2.1.1 - Dureza Mohs

Criada em 1812 pelo mineralogista alemão Friedrich Mohs, a escala Mohs consiste em dez minerais padrões ordenados numa seqüência relacionada com sua capacidade de riscar ou serem riscados como visto na Tabela 2 (PRESS et.al., 2008). No entanto as diferenças de dureza de uma mesma espécie mineral são comumente tão pequenas que só podem ser comprovadas mediante o uso de outras escalas como a Vickers e a Knoop.

Tabela 2 - Escala de dureza Mohs

Escala Numérica	Mineral de Referência
1	talco
2	gipsita
3	calcita
4	fluorita
5	apatita
6	feldspato
7	quartzo
8	topázio
9	coríndon
10	diamante

Adaptado em 08/01/2011 de PRESS, Frank et al.  
Para entender a terra. Porto Alegre: Bookman, 2008.

### 2.2.1.2 - Microdureza Vickers

Este, segundo Chiverini (1986), é um dos ensaios mais amplamente utilizados em trabalhos de pesquisa por apresentar uma escala contínua de dureza para uma determinada carga. Ao contrário do teste de dureza Rockwell ou o teste de dureza Brinell, onde não são possíveis comparações diretas dos resultados medidos entre os extremos da escala, em razão das mudanças de cargas e dos penetradores, o ensaio Vickers utiliza cargas de 1 a 120 kg, dependendo da dureza do material, sem alteração do penetrador. As impressões resultantes são geometricamente similares, não importando seu tamanho e independem da carga utilizada. Apesar dessas vantagens o ensaio Vickers não é amplamente aceito como teste de rotina na indústria por ser muito lento requerendo uma cuidadosa preparação do corpo de prova.

O teste de dureza Vickers (HV) consiste em forçar uma ponta de diamante, de forma piramidal de base quadrada com ângulo entre as faces opostas de 136°, contra o material a ser ensaiado (DIETER, 1981). Devido à forma do penetrador esse teste é freqüentemente chamado de “teste de dureza de pirâmide de diamante (DPH)”.

A dureza Vickers é o quociente da carga aplicada (P) pela área da impressão  $L^2$  onde L refere-se ao comprimento da diagonal em mm, medida através de microscopia demonstrada na fórmula a seguir:

$$HV = 1,8544 \frac{P}{L^2} (kgf / mm^2) \quad (1)$$

### 2.2.1.3 - Dureza Knoop

Assim como o ensaio Vickers, a dureza Knoop é um ensaio de micro impressão determinado pelo endentamento de uma ponta de diamante (Figura 15), de dimensões conhecidas, na peça a ser ensaiada. A área da impressão dividida pela carga aplicada resulta no valor da dureza. Assim, como em outros ensaios de dureza, quanto maior a área de impressão, menor a dureza do material. A ponta Knoop produz uma impressão na forma de um losango (Figura 16) com uma razão largura (W) x comprimento (L) igual a 1:7,1, sendo a área calculada a partir da diagonal maior conforme fórmula a seguir (QUITETE, 2002):

$$HK = \frac{1.450,6 \times 10^3 \times F}{L^2} \times 9,807 \quad (2)$$

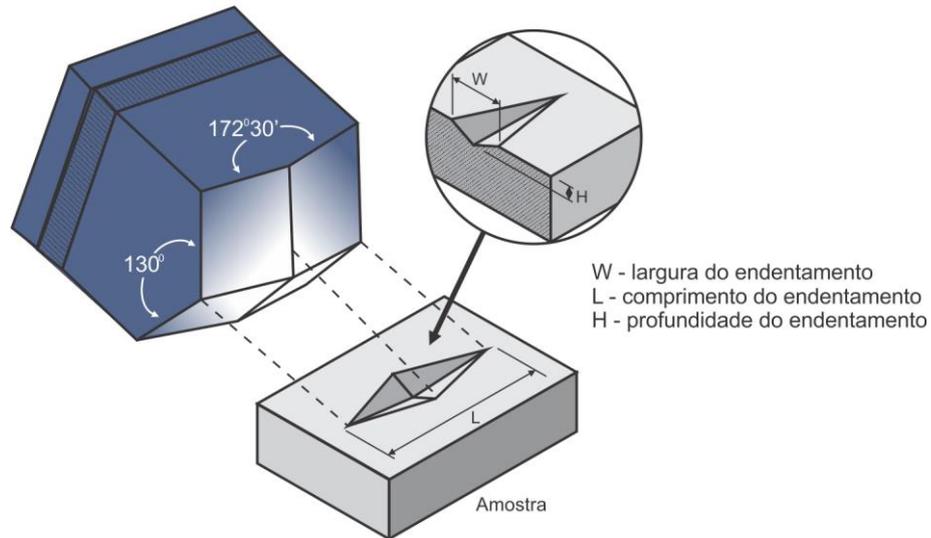
Onde:

HK = Dureza Koop em MPa

F = Carga aplicada em N (1,961 N = 200 gf)

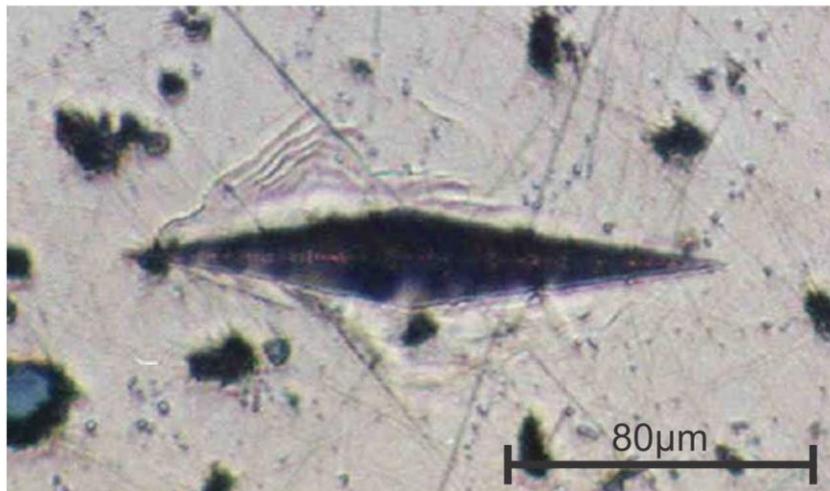
L = Comprimento da diagonal maior da impressão em  $\mu\text{m}$

Figura 15 - Representação de uma ponta de diamante para ensaio de dureza Knoop



Adaptado em 20/06/2012 de  
[http://www.instron.us/wa/applications/test\\_types/hardness/knoop.aspx](http://www.instron.us/wa/applications/test_types/hardness/knoop.aspx)

Figura 16 - Impressão produzida por uma carga de 200 gf em cobre. O comprimento da diagonal maior é de 160  $\mu\text{m}$ . Aumento 480 X.



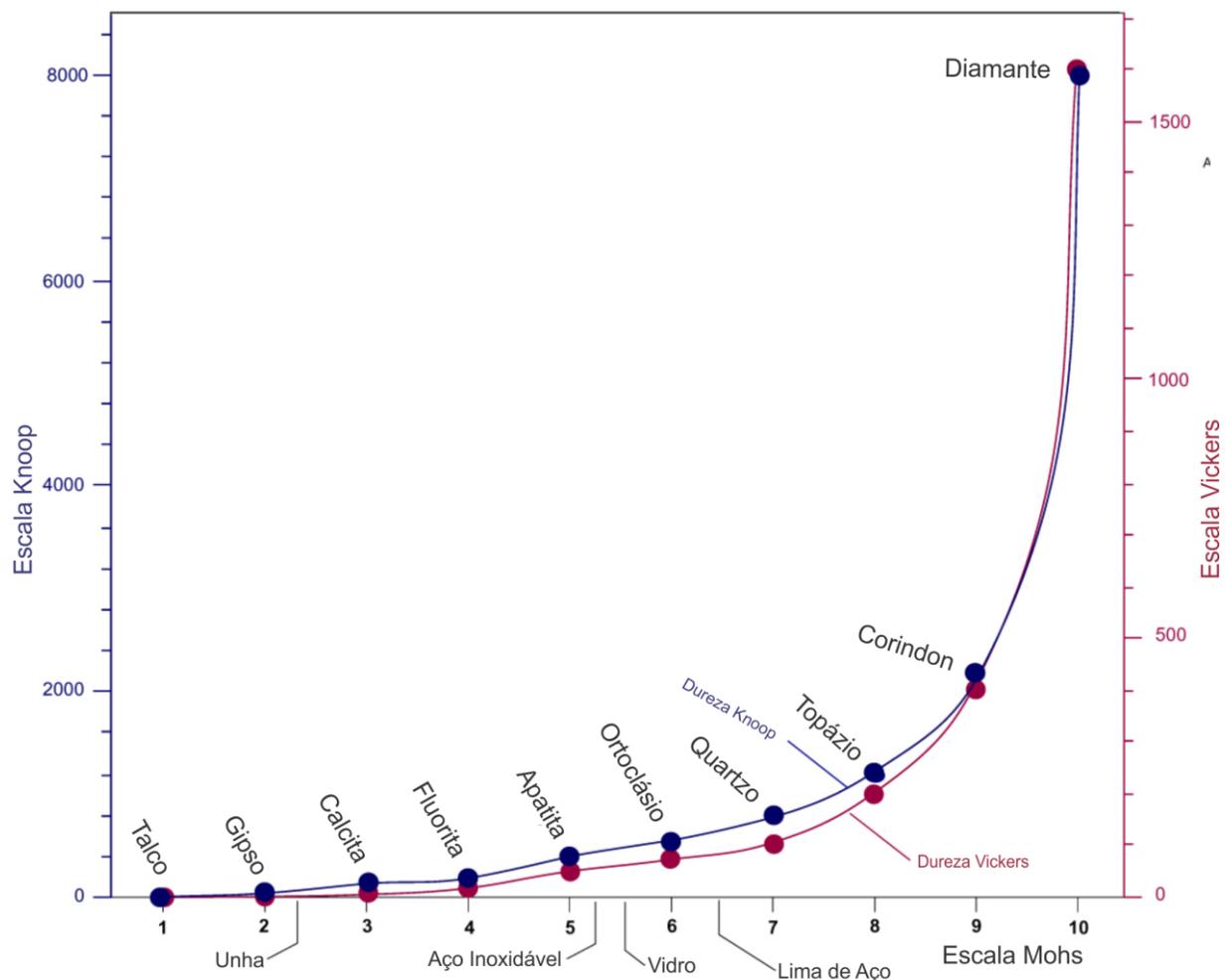
Adaptado em 24/12/2010 de Quitete, 2002

Nos materiais frágeis, como minerais e materiais cerâmicos, a utilização de cargas elevadas geram um fissuramento intenso, o que impede a medição confiável das diagonais.

Nestes tipos de materiais é comum a utilização de cargas entre 0,49 N e 1,96 N devido a sua elevada dureza gerando impressões com pouca profundidade (QUIETETE, 2002). Para facilitar a leitura e diminuir o fissuramento a ponta Knoop é recomendada pois, mesmo em uma impressão rasa é possível a visualização e medição da diagonal maior, com margem de erro de 1%.

O uso do ensaio Knoop, segundo Quietete, (2002), é comumente utilizado para determinação de dureza de rochas ornamentais em países da Europa onde já há normatização para este método. Na Espanha, regido pela normas UNE 22-188, para “mármore”, e UNE 22-178, para “granitos”, a dureza Knoop é determinada com carga de 100gf (TRILLO, 1996). A seguir pode ser visualizado um comparativo entre as escalas de dureza Mohs, Vickers e Knoop em rochas (Figura 17).

Figura 17 - Comparativo entre as escala de dureza Mohs, Vickers e Knoop em rochas.



Adaptado em 24/12/2010 de <http://www.gly.uga.edu/railsback/Fundamentals/HardnessTrends29IL.jpg>

### 2.2.2 - Difractometria de raios X

A difratometria de raios X é considerada uma das principais técnicas de caracterização microestrutural de materiais cristalinos (GOLDSTEIN *et.al.*, 2003). Muito do entendimento referente aos arranjos atômico e molecular de um sólido é resultado das investigações realizadas através desse método que consiste em direcionar os raios X sobre uma amostra do material, sendo recomendada a forma de pó no caso de rochas e cerâmicos (CALLISTER, 2008). Os fótons de raios X colidem com os elétrons da amostra e mudam de trajetória mas mantêm a mesma fase de energia do fóton incidente, ou seja, a onda eletromagnética é instantaneamente absorvida pelo elétron e reemitida com um comprimento de onda característico (BRUNDLE *et.al.* 1992).

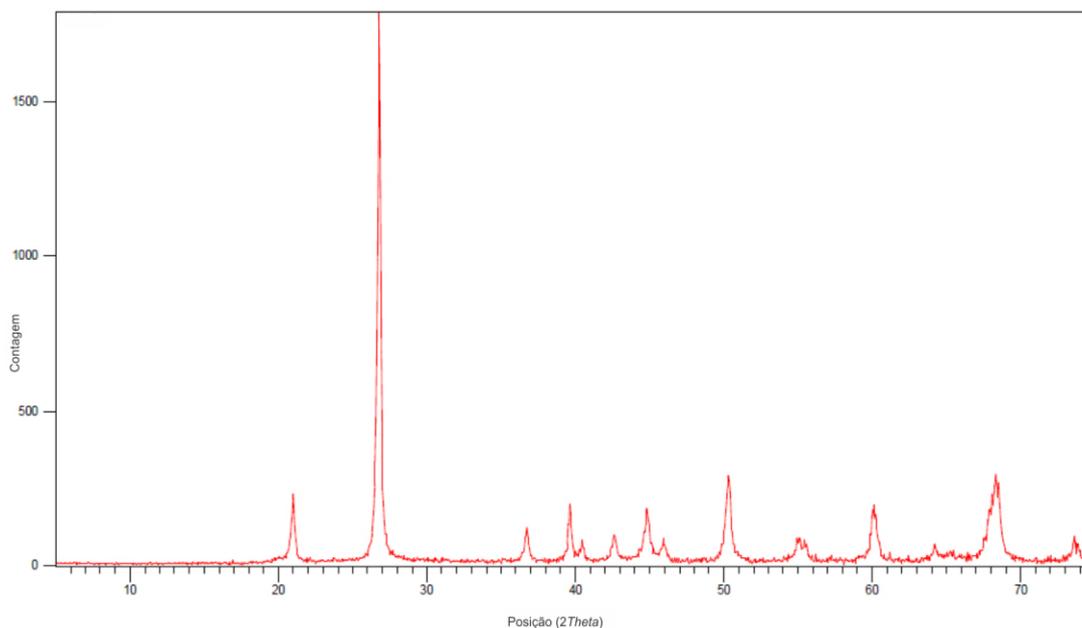
Os arranjos cristalinos são formados por átomos ou grupo de átomos, tendo uma repetição periódica em pontos reticulares. As faces que aparecem com mais probabilidade nos cristais são as paralelas aos planos de átomos, possuindo a densidade máxima desses pontos reticulares. Paralelamente a cada plano reticular, existe um conjunto de planos idênticos com igual espaçamento. Quando um feixe de raios X incidir sobre uma amostra haverá uma “difração”, onde planos paralelos contribuirão, de forma independente, para uma “reflexão total”. Para que as reflexões possuam intensidade suficiente para seu registro, estas devem estar em fase entre si (GOLDSTEIN *et.al.* 1992)

Logo, a intensidade difratada, dentre outros fatores, está diretamente relacionada e dependente do número de elétrons do átomo, de como estes átomos estão distribuídos no espaço e da estrutura cristalina, que possui diferentes densidades de átomos ou elétrons, fazendo com que a quantidade difratada de raios X sejam distintas para os diversos planos cristalinos. Os raios X são gerados a partir de um tubo de raios X onde vários materiais podem ser empregados como anodos, sendo o Cu, Cr, Fe e o Mo os mais usuais. A escolha do anodo gerador dos raios X depende do material a ser analisado buscando uma relação anodo/amostra que apresente o menor coeficiente de absorção de massa, além da relação “resolução x intensidade” dos picos do difratograma (CALLISTER, 2008).

A amostra, em formato de uma placa plana, está sustentada de tal maneira que são possíveis rotações da fonte de raios X em torno do eixo. Os raios X gerados são difratados pela amostra e são detectados em um detector de raios X. A amostra, a fonte de raios X e o contador são coplanares. O contador é montado num carro móvel que pode também ser girado

ao redor do eixo. Sua posição angular em termos de  $2\theta$  (teta) é marcada numa escala graduada. O carro e a amostra estão mecanicamente casados de tal maneira que uma rotação da amostra através  $\theta$  é acompanhada por uma rotação  $2\theta$  do contador; isto assegura que os ângulos de incidência e de reflexão sejam mantidos iguais entre si. Colimadores estão incorporados no caminho dos raios X a fim de produzir um feixe bem definido e focado. À medida em que o contador se move numa velocidade angular constante, um registrador automaticamente gera o difratograma ou espectro da intensidade do feixe difratado (monitorado pelo contador) como uma função de  $2\theta$ , onde  $2\theta$  é denominado ângulo de difração, medido experimentalmente. Na Figura 18 pode ser visualizado um difratograma de ágata caracterizando-o como material de base siliciosa e cristalino (CALLISTER, 2008).

Figura 18 - Difratograma de calcedônia (ágata) - picos difratados caracterizam o material como sendo de base siliciosa e cristalina.



Um dos principais usos da difratometria de raios X é a determinação da estrutura cristalina. O tamanho e a geometria da célula unitária podem ser resolvidos a partir das posições angulares dos picos de difração, enquanto o arranjo de átomos dentro da célula unitária é associado às intensidades relativas destes picos. raios X, bem como feixes de elétrons e nêutrons, são também usados em outros tipos de investigações de materiais que incluem identificações químicas qualitativas e quantitativas, e a determinação das tensões residuais e tamanho cristalino (BRUNDLE *et.al.* 1992).

### 2.2.3 - Fluorescência de raios X

Além da difratometria de raios X, a fluorescência de raios X (*X Ray Fluorescence - XRF*) é uma técnica utilizada para identificação e determinação das concentrações dos óxidos presentes nos sólidos e vem sendo adotada como método padrão de análise elementar de geologia, pois oferece uma boa precisão para os principais compostos e limites de detecção na ordem de 1 ppm (parte por milhão) (REED, 2005).

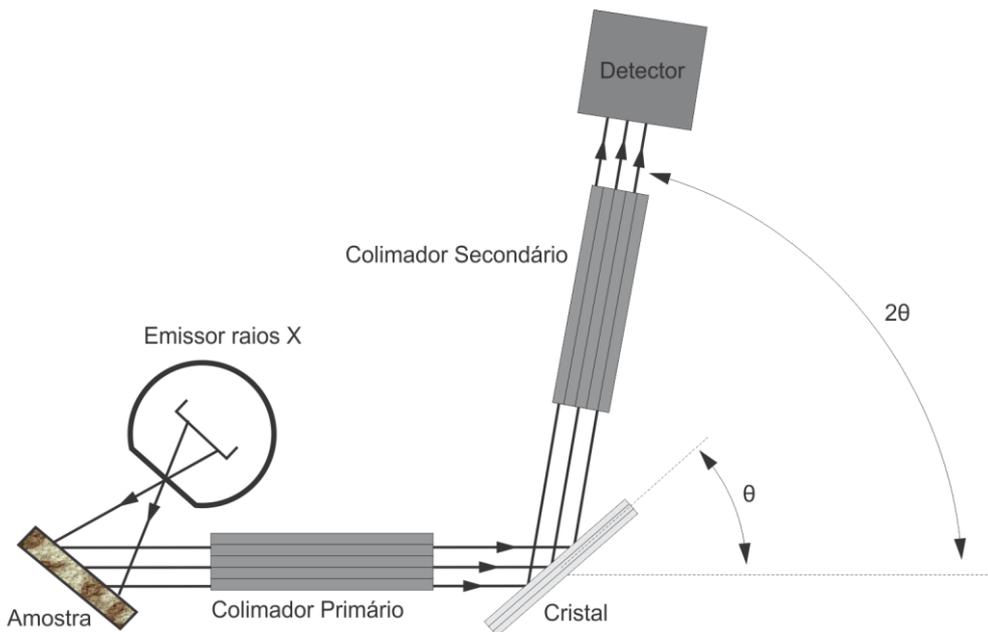
Medições do espectro de raios X característico de um elemento foram utilizadas, pela primeira vez, por HGJ Moseley em 1913. Ele descobriu que a raiz quadrada da frequência dos raios X apresentam uma relação linear com o número atômico do elemento que reflete estes raios. A "Lei Moseley", que descreve esta relação, mostra que cada elemento tem um espectro de raios X característicos e que os comprimentos de onda variam, de uma forma regular, de um elemento para outro. Os comprimentos de onda diminuem à medida que os números atômicos dos elementos aumentam. Além dos espectros puros, Moseley obteve o espectro de latão (liga metálica entre cobre e zinco), que mostraram picos distintos entre o Cu e o Zn. A XRF em análises espectroquímicas de materiais passou a ser rotina somente a partir dos anos 1940 com a introdução de equipamentos de raios X mais modernos. Nos anos 1970 a XRF foi aprimorada sendo utilizada rotineiramente para a determinação da espessura e composição de películas finas materiais de recobrimento, como o cromo e o níquel (BRUNDLE, 1992).

O ensaio por XRF é um método não destrutivo usado para análise elementar de materiais. Uma fonte produtora de raios X é utilizada para irradiar a amostra e fazer com que os elementos, através da interação entre os raios X e os átomos da amostra, emitam fótons característicos (fluorescência). Um sistema detector é utilizado para medir as posições fluorescentes possibilitando a geração de um difratograma, onde podem ser identificados qualitativa e quantitativamente os componentes presentes na amostra (ANTONIASSI, 2005).

O equipamento de análise por fluorescência de raios X é geralmente composto por três partes (Figura 19): fonte primária de raios X, espectrômetro de cristal e sistema de detecção. Os fótons emitidos pela amostra (fluorescência) são originados pela incidência de raios X de alta energia oriundos da fonte primária de raios X. Os raios X provenientes da amostra passam por um colimador primário que os foca sobre um cristal que está orientado para refletir os fótons da amostra a partir de um conjunto de planos cristalinos com espaçamento ( $d$ ), comprimento de onda ( $\lambda$ ) e ângulo ( $\theta$ ) conhecidos. O cristal gira com a metade da

velocidade angular do detector possibilitando, dessa maneira, analisar os ângulos adequados para cada comprimento de onda. A intensidade de cada comprimento de onda é então registrada pelo detector. Esse método é também conhecido como Método do Comprimento de Onda Dispersivo (REED, 2005).

Figura 19 - Esquema de funcionamento da análise por fluorescência de raios X



Adaptado em 10/06/2011 de BRUNDLE *et. al.* . Encyclopedia of Material Characterization . Greenwich: Manning Publications Co., 1992.

São utilizados na XRF, dependendo da análise pretendida, dois tipos de detectores: o Detector por dispersão de Energia - EDS (*Energy Dispersive Spectrometer*) ou o Detector de Dispersão de Comprimento - WDS (*Wavelength Dispersive Spectrometer*). Utilizando o EDS todo o espectro elementar é captado simultaneamente, enquanto que a partir de um detector WDS são captadas as linhas características, individualizadas pelos cristais analisadores (ANTONIASSI, 2010).

Quaisquer dos procedimentos são indicados para análise qualitativa e quantitativa dos elementos, tendo o EDS capacidade de detecção entre 0,1 e 100% enquanto o WDS >0,01%. A técnica XRF cobre praticamente todos os elementos da tabela periódica (ASTM INTERNACIONAL, 2008).

#### 2.2.4 - Microscopia Ótica

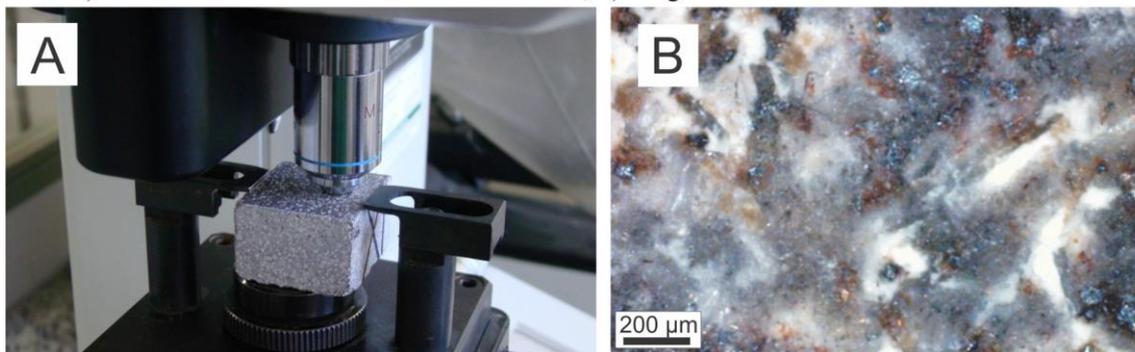
As técnicas de microscopia ótica são utilizadas para identificar o mineral em escala microscópica, avaliando suas propriedades óticas através de lâminas delgadas do mineral. Os minerais são geralmente identificados por sua cor, brilho, clivagem e fratura. A microscopia ótica (Figura 20) é praticamente padrão numa análise preliminar para a identificação dos minerais mais comuns e avaliação do tamanho dos cristais (CALLISTER, 2008).

Os microscópios, tanto o ótico quanto o eletrônico, são instrumentos que auxiliam na determinação das características estruturais dos materiais e na realização de microfotografias. Existem dois tipos de microscópios mais utilizados na identificação de minerais: microscópio ótico de luz transmitida (MOLT) e o microscópio ótico de luz refletida (MOLR). Os dois apresentam similaridade no que se refere ao sistema de lentes, polarizador, analisador e quanto aos vários diafragmas empregados, porém diferem quanto ao sistema de iluminação: o MOLT utiliza uma fonte abaixo da amostra que deve ser translúcida e o MOLR usa a fonte acima da amostra é usado no estudo de minerais opacos, que formam um grupo economicamente importante, já que representam, em sua maioria, os minérios (KLEIN, 2002).

Através da microscopia ótica é possível a investigação resultante das diferenças de reflexibilidade das várias regiões da microestrutura dos materiais. As análises exigem preparação especial das amostras, em secções delgadas e polidas (luz transmitida), e polidas (luz refletida). Também é possível a análise de fragmentos de rochas ou montagens de material particulado, quando embutidos em resinas (geralmente epóxi, acrílica ou poliéster) (CALLISTER, 2008).

Tanto nos microscópios MOLT quanto nos MOLR os minerais podem ser observados sob luz polarizada, com nicóis (elemento polarizador de luz) cruzados ou descruzados, o que permite a determinação de propriedades tais como cor, pleocroísmo (quando minerais apresentam diferentes cores ao serem observados sob ângulos diferentes), relevo, índice de refração em relação ao meio, clivagem, hábito, determinação do ângulo de extinção do mineral, da cor de interferência, birrefringência, gemação, zoneamento, etc. (CRAIG & VAUGHAN, 1994).

Figura 20 - Exemplo de imagem de microscopia ótica de luz refletida - MOLR - de uma amostra de riodacito, onde: A) Amostra observada durante o ensaio de dureza; B) Imagem observada



#### 2.2.4.1 - Petrografia

A petrografia microscópica, segundo Craig & Vaughan (1994), foi reconhecida como ferramenta para o estudo de rochas por Henry Sorby, em meados do século XIX. A partir daí passou a ter considerável importância como ferramenta de pesquisa da petrologia.

A petrografia ou análise petrográfica estuda os caracteres intrínsecos de uma rocha, analisando sua origem, composição química, minerais, arranjo dos grânulos minerais, estado de alteração, etc.. As análises petrográficas contribuíram consideravelmente para o aprofundamento dos conhecimentos da petrologia, ramo das geociências que se ocupa com o estudo de rochas transformadas textural, estrutural, química e/ou mineralogicamente, estabelecendo as relações de causa e efeito, temporais, químicas e termodinâmicas, entre as transformações observadas e os processos geológicos (PHILPOTTS, 2003).

A petrografia é realizada a partir de exames micro e macroscópicos, podendo ser auxiliada por uma lupa ou microscópio ótico de luz transmitida - MOLT - em fatias delgadas da rocha com área de 10 cm<sup>2</sup> (4 x 2,5 cm) e espessura da ordem de 0,03 mm. Para rochas que possuem em seus constituintes minerais metálicos não transparentes (caso de vários sulfetos e óxidos) o exame petroográfico é realizado em microscópios do tipo MOLR a partir de amostras extremamente bem polidas com grãos abrasivos à base de diamante ou alumina com granulometria acima de #1000 (CRAIG & VAUGHAN, 1994).

A partir de análises petrográficas é possível verificar as relações texturais estabelecidas entre os minerais podendo-se determinar as condições físico-químicas e o ambiente predominante da época da formação daquela rocha, podendo ser ígneo, metamórfico

ou sedimentar além de ser possível identificar eventos geológicos que afetaram a rocha desde sua origem.

Através da petrografia pode ser determinado com precisão o comportamento físico-mecânico dos materiais, através de ensaios tecnológicos específicos ou observados durante o seu beneficiamento, podendo-se ainda prever eventuais modificações das propriedades diante das condições ambientais e das solicitações a que são submetidas. As condições de previsibilidade são fundamentais para obras civis e baseiam-se fundamentalmente no conhecimento dos minerais formadores da rocha analisada e nas suas condições físico-químicas (BRUNDLE *et.al.*, 1992).

#### **2.2.4.2 - Polarização da Luz**

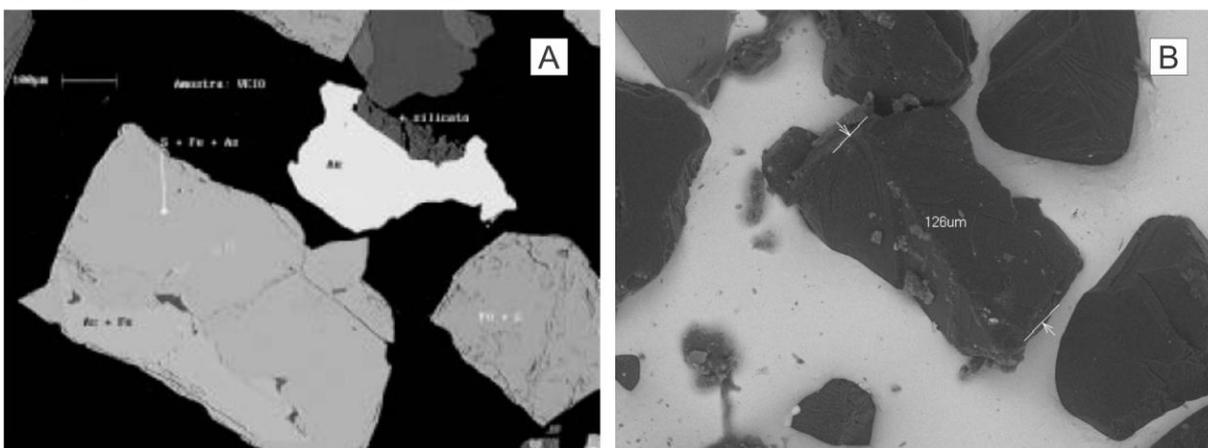
Em quaisquer dos tipos de microscópios utilizados na análise petrográfica é possível através da utilização do polarizador (prismas de Nicol), posicionado entre a fonte de luz e a amostra, determinar as propriedades óticas de minerais transparentes e opacos. A luz polarizada constitui um feixe luminoso onde são restritas as vibrações de propagação a um pequeno número de planos. O plano de vibração do analisador deve ser perpendicular ao do polarizador de modo que a observação seja feita através de nicóis cruzados (CRAIG e VAUGHAN, 1994). Embora a principal função do microscópio óptico seja o exame de seções delgadas e polidas de rochas e minerais sob luz polarizada, para estabelecimento das várias feições cristalográficas de minerais individuais, ele também pode ser utilizado com luz ordinária, não polarizada, para exame de fragmentos de rochas, minerais, materiais cerâmicos, escórias e outros materiais (CRAIG & VAUGHAN, 1994).

#### **2.2.5 - Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV**

A microscopia eletrônica é a técnica de caracterização microestrutural mais versátil disponível, podendo ser utilizada em uma ampla gama de análises, mais particularmente àquelas relacionadas à engenharia e ciência dos materiais, engenharia metalúrgica e de minas, geociências e ciências biológicas (GOLDSTEIN, *et.al.*, 1992).

A versatilidade do MEV deve-se às formas de interação entre a amostra e o feixe eletrônico que, avaliadas através de diferentes detectores, podem fornecer informações sobre a composição, topografia, cristalografia, potencial elétrico e campos magnéticos locais, dentre outras. A interação elétron-amostra pode ocorrer através do espalhamento elástico, onde há interferência na trajetória dos elétrons dentro da amostra mas sem alteração da energia cinética, sendo responsável pelo fenômeno de elétrons retroespalhados; ou através do espalhamento não elástico, que compreende diferentes interações onde ocorre perda de energia cinética dos elétrons para os átomos da amostra, proporcionando a geração de elétrons secundários (Auger, raios X e catodoluminescência) (SOARES & SARON, 2010). Os elétrons retroespalhados possuem estreita relação com o número atômico e a energia dos elétrons permitindo a individualização de fases através de contraste de tons de cinza (Figura 21A). Já os elétrons secundários compreendem os elétrons da camada de valência perdidos que, face a sua baixa energia, emergem das proximidades da superfície permitindo a visualização da topografia da amostra, com elevada profundidade de campo (Figura 21B) (BRUNDLE *et.al.*, 1992).

Figura 21 - Imagens efetuadas através de microscopia eletrônica de varredura - MEV - onde:  
 A) Imagem de elétrons retroespalhados (BSE) de um minério de ouro. Os níveis de cinza correspondem a fases distintas, em ordem decrescente: ouro, arsenopirita, pirita e quartzo;  
 B) Imagem de elétrons secundários de um grão de diamante sintético de uma ferramenta diamantada.



A) Adaptado em 26/12/2010 de <http://www.portalsaofrancisco.com.br/alfa/microscopio/microscopia-eletronica-de-varredura-4.php>

## 2.3 - Usinagem

De uma forma mais geral, segundo Dieter (1981), existem duas classes distintas de manufaturamento no estado sólido: os processos de deformação, que produzem a forma desejada através da conformação plástica dos materiais conservando seu volume inicial e os processos de usinagem onde, para a produção da forma desejada, há remoção de partes do material através de processos específicos. A maioria dos processos de usinagem é realizada pelo tensionamento mecânico oriundo do movimento relativo entre a ferramenta de corte, que pode ser mono ou multicortante e a peça, podendo ocorrer de duas maneiras: ou por corte, quando a ferramenta é forçada sobre o material, vencendo a tensão de ruptura fazendo-o escoar pelo gume cortante formando o cavaco; ou por abrasão quando há remoção do material base (peça) através do atrito de partículas abrasivas.

Embora em sua grande maioria os processos de usinagem utilizem energia mecânica para a transformação dos materiais, alguns também empregam a energia química, elétrica ou térmica. Os processos de usinagem possuem uma dependência crítica do material da ferramenta e a interação das forças de usinagem com o material da peça. Isso significa que as propriedades mecânicas da ferramenta, principalmente a dureza, devem ser superior a do material base (peça a ser usinada).

Segundo Dieter (1981) A usinagem é empregada na produção de peças de elevada tolerância dimensional, com bom acabamento superficial e formas relativamente complexas. Os processos de usinagem de uma maneira mais ampla podem ser classificados como processos secundários visto que ocorrem em peças produzidas, na maioria das vezes, através de um processo primário como por exemplo, a fundição. Também segundo Dieter (1981), um pouco mais de 80% de todas as partes manufaturadas devem ser usinadas antes de completamente prontas. Atualmente há grande desenvolvimento tecnológico nos processos de usinagem, principalmente com a inclusão de comandos numéricos no processamento, o que garante a precisão e repetibilidade dos movimentos. Um dos processos de usinagem que mais se beneficiaram com esta inclusão foram os processos de fresamento.

### 2.3.1 - Fresamento e Fresamento CNC

Segundo Ferraresi (1986), as operações de usinagem são aquelas que, ao conferir à peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes

três itens, produzem cavaco que pode ser definida como a porção de material retirado pela ferramenta e caracteriza-se por apresentar forma geométrica irregular.

Fresamento é definido por Ferraresi (1986), como o processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies quaisquer com o auxílio de ferramentas, geralmente, multicortantes. O fresamento têm como característica o deslocamento da mesa ou ferramenta em 2 (X e Y), 3 (X, Y e Z) ou mais eixos, podendo estes atuarem de forma não interpolada como nas fresadoras convencionais (ou ferramenteiras) de 3 eixos, onde o operador, de forma manual ou auxiliado pelo comando de Controladores Lógico Programáveis (CLP), através da rotação dos eixos em uma mesa de coordenadas, X e Y, promove deslocamento da peça e o deslocamento da ferramenta no eixo.

Já no fresamento CNC a fresadora (Figura 22), por interpretação de instruções expressas por meio digital, aciona um conjunto de servo-motores ou motores de passo que comandam de forma independente cada eixo da máquina (X, Y e Z nas fresadoras de 3 eixos) deslocando a mesa ou a ferramenta de forma automática e interpolada (todos os eixos podem se movimentar ao mesmo tempo). Durante o processo há conversão de alguns ou todos os dados numéricos, como distâncias, ângulos, velocidades, etc., o que permite a elaboração/fabricação de praticamente quaisquer formatos. O surgimento dessa tecnologia só foi possível após a criação das máquinas ferramenta, da automação e da informática (FALLER *et.al.*, 2006).

Segundo Faller *et.al.* (2006) existem outros eixos além dos eixos lineares primários X, Y e Z. Estes eixos complementares se movimentam de maneira rotativa ou angular em torno de um dos três eixos primários. Se o movimento ocorrer com relação a X receberá o nome de eixo A, a Y se chamará B e em torno de Z se chamará C.

Sistemas *Computer-Aided Design* (CAD), *Computer-Aided Engineering* (CAE) e *Computer-Aided Manufacturing* (CAM), são as principais tecnologias auxiliares e tem evoluído junto com as máquinas CNC. O primeiro permite integrar as tarefas de projeto, o segundo simular/otimizar o produto e o último efetuar sua prototipagem/fabricação. Segundo Geist (1999) com estes sistemas é possível realizar tarefas altamente técnicas mais rapidamente, com maior facilidade, maior precisão e com menores custos do que os métodos mais antigos e tradicionais, abrindo caminho para os processos de usinagem em alta velocidade (*High Speed Machining* - HSM).

Figura 22 - Fresadora CNC modelo Digimill 3D



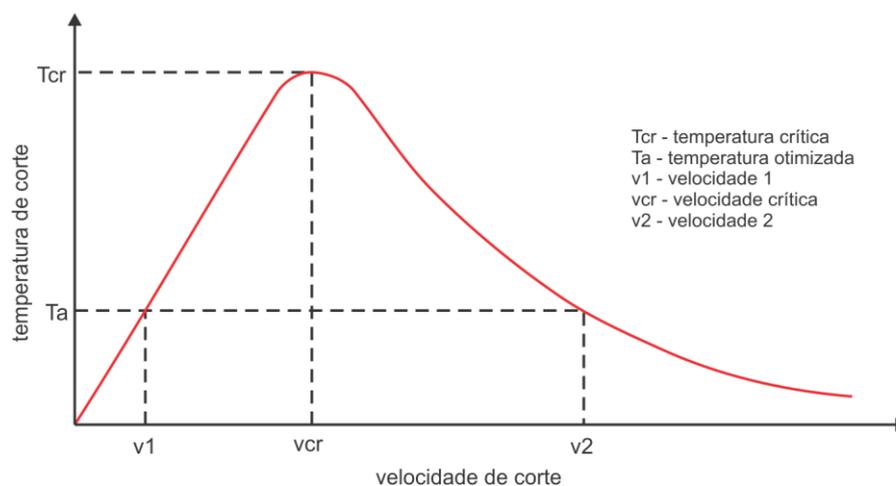
Adaptado em 28/11/2012 de [http://www.tecnodrill.com/prod\\_03.htm](http://www.tecnodrill.com/prod_03.htm)

### 2.3.1.1 - Usinagem em Alta Velocidade - (HSM)

A usinagem em altas velocidades, limitava-se até bem pouco tempo à fabricação de peças experimentais ou estudos desenvolvidos em centros de pesquisa e instituições de ensino (FREITAS, 2006). Basicamente isso se deu ao fato de existirem dificuldades para obtenção de equipamentos de alto desempenho, geralmente importados, e aquisição de ferramentas específicas para este fim. O termo *High Speed Machining* - Usinagem com Altas Velocidades de Corte se refere, na maioria das vezes, ao fresamento de topo onde há grandes velocidades de rotação do *spindle* (motor que confere a ferramenta a sua rotação) e de avanço o que permite altas taxas de remoção de material. Há algumas décadas a HSM têm sido amplamente aplicada em uma gama cada vez maior de materiais metálicos e não-metálicos, incluindo a produção de peças com necessidades específicas em materiais com dureza igual ou superior a 50 HRC (Dureza-Rockwell-C) (MACEDO, 2001).

Proposta originalmente por Dr. J. Salomon, termo sobre o qual obteve patente em 1931, a “Usinagem a Altíssimas Velocidades de Corte” assume que, “a uma determinada velocidade de corte (5-10 vezes mais elevada que na usinagem convencional, em média de 3500 RPM), a temperatura de remoção de cavacos começará a diminuir...” o que levou a crer que pode “haver uma chance para melhorar a produtividade na usinagem com a utilização de ferramentas convencionais a altas velocidades...” (MACEDO, 2001). A conclusão de Solomon, que originou a patente, ocorreu após uma série de experimentos entre os anos de 1924 e 1931, sendo baseada nas curvas de velocidade de corte relacionadas com as temperaturas geradas durante a usinagem de materiais não-ferrosos tais como o alumínio, cobre e bronze (Figura 23).

Figura 23 - Gráfico representando a Teoria de Solomon - velocidade de corte X temperatura de corte



Adaptado em 28/11/2010 de Solomon *apud* Freitas, 2006

Segundo Salomon *apud* Freitas (2006), a temperatura de corte atinge um ponto máximo quando se alcança determinada velocidade de corte mas reduz se a velocidade continua a ser aumentada. Como visualizado na Figura 23 há uma relação direta entre a velocidade de corte e a temperatura no intervalo 0-v1 numa condição normal até o valor máximo Tcr onde se atinge a vcr - velocidade crítica. Se a velocidade de corte for novamente elevada, de vcr para v2, é prevista, conforme mostra a figura, uma redução da temperatura. Próximo ao ponto vcr. Salomon sugere que exista um regime de trabalho instável em que as ferramentas de corte não seriam capazes de suportar as forças e temperaturas alcançadas.

No entanto, conforme sugerido por Freitas (2006), pesquisas não têm sido capazes de verificar essa teoria em toda sua amplitude a não ser no gume da ferramenta onde há uma

diminuição da temperatura, que se inicia em diferentes velocidades de corte e varia conforme o material base. Os estudos conduzidos por Salomon adquirem interesse histórico frente às novas tecnologias HSM.

Vaughn *apud* Macedo (2001), afirma que pesquisadores estão desenvolvendo dados mais concretos a partir do emprego de técnicas mais sofisticadas onde a série de variáveis, como tamanho, potência e tipo de máquina, ferramentas e materiais a serem usinados, velocidades de avanço e corte, envolvidas na usinagem convencional adquirem nova importância nas usinagens em altas velocidades. Davies *et. al.* (1997) afirma que não existe resposta sobre o que é mito ou verdade sobre a HSM e sustenta que os usuários deveriam testar as ferramentas e os parâmetros, para determinar as melhores condições para a operação em particular, não se restringindo às especificações dos fornecedores. A empresa fornecedora de ferramentas Sandvik (2010) caracteriza os processos HSM da seguinte forma: “HSM não é simplesmente alta velocidade de corte; não é necessariamente usinagem com altíssima rotação da árvore; a HSM é realizada no acabamento de materiais de elevada dureza com a utilização de corte e avanço de 4 a 6 vezes maiores que as utilizadas na usinagem convencional; é de alta produtividade e permite o desbaste e acabamento de peças pequenas e acabamento fino em peças de todos os tamanhos e há uma tendência do aumento da importância da HSM devido a sua flexibilidade”.

De acordo com Schulz (1997) há uma redução das forças de usinagem quando há um aumento das velocidades de corte o que resulta uma maior taxa de remoção de material, uma melhoria na qualidade superficial e uma redução da vida útil das ferramentas. A afirmação de Schulz (1997) é complementada por Geist (1999) que afirma que mais importante do que o aumento da velocidade de corte é o aumento da taxa de avanço. Segundo Freitas (2006) na usinagem em altas velocidades os valores de avanço da ferramenta devem ser maiores e as profundidades de corte menores do que aqueles utilizados na usinagem convencional, o que proporciona uma diminuição das forças radiais que atuam sobre a ferramenta, evitando assim o desgaste prematuro dos mecanismos e também modificações térmicas e químicas que possam alterar as características do material base.

### **2.3.2 - Ferramentas e Parâmetros**

O desenvolvimento de ferramentas de usinagem acompanhou o desenvolvimento tecnológico, tanto das características dos materiais base quanto da especialização dos

processos de fabricação. As ferramentas de usinagem geram superfícies de duas maneiras: através do uso de uma ferramenta perfilada, cuja forma assemelha-se a forma a ser produzida na superfície ou avançando a ferramenta ao longo do comprimento da peça. As ferramentas perfiladas possuem um custo relativamente mais elevado, mas são importantes na produção seriada. Para que não haja um desgaste excessivo da ferramenta e/ou equipamentos devem ser considerados os parâmetros de usinagem que variam conforme o material e a ferramenta.

O movimento de corte e o avanço da ferramenta são os dois principais movimentos para usinagem. O primeiro relaciona-se ao deslocamento relativo entre a ferramenta e a peça, fazendo com que a face de uma se aproxime à superfície da outra. Já o segundo é o movimento imposto à ferramenta ou à peça que, quando adicionado ao movimento de corte, provoca a remoção do cavaco e a criação de uma superfície com a geometria desejada. O movimento de avanço absorve uma porção muito menor de energia total do que o movimento de corte.

Os principais parâmetros de usinagem (Figura 24) são a velocidade de corte ( $v_c$ ), a profundidade de corte ( $a_p$ ) e o avanço ( $a_f$ ).

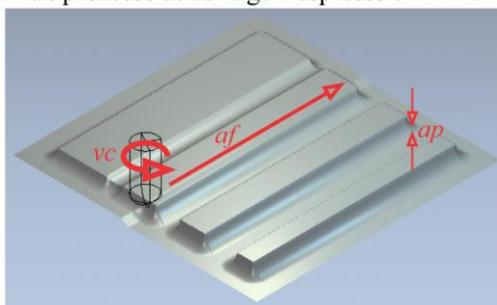
- velocidade de corte ( $v_c$ ): segundo Wrublack (2008), é o parâmetro que possui maior influência na vida da ferramenta. Este parâmetro influencia diretamente na eficiência do corte e no acabamento. Ferraresi (1986), afirma que a velocidade de corte é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante, segundo a direção do corte. Estas considerações são verdadeiras se a profundidade de corte e o avanço permanecerem constantes (WRUBLACK, 2008).

- profundidade de corte ( $a_p$ ): Ferraresi (1986), conceitua profundidade de corte como a profundidade ou largura de penetração da aresta principal de corte a ferramenta, medida numa direção perpendicular ao plano de trabalho. A grandeza  $p$  é sempre aquela que, multiplicada pelo avanço de corte  $a$  origina a área da secção de corte  $s$ . Ela é medida num plano perpendicular ao plano de trabalho, enquanto o avanço de corte é medido sempre no plano de trabalho.

- avanço ( $a_f$ ): é o movimento entre a peça e a ferramenta (ou vice-versa) que, juntamente com o movimento de corte, origina um levantamento repetido e contínuo de cavaco, durante várias revoluções ou cursos (FERRARESI, 1986). O movimento de avanço

pode ser o resultante de vários movimentos componentes, como por exemplo o movimento de avanço principal e o movimento de avanço lateral. Wrublack (2008) afirma que, para seleção deste parâmetro, deve-se considerar o tipo da ferramenta, o material da ferramenta, o acabamento desejado e a potência da máquina. Com o aumento do avanço, consegue-se um decréscimo da potência consumida. Para que seja atingido um melhor acabamento superficial é recomendado por Wrublack (2008) a utilização de valores baixos de avanço, uma profundidade de corte menor e altas velocidades de corte. Com um valor elevado de avanço a espessura média do cavaco se torna maior, reduzindo a pressão específica de corte e, conseqüentemente, da potência consumida na operação, desde que a velocidade de avanço seja mantida constante.

Figura 24 - Representação esquemática dos parâmetros de usinagem onde:  $vc$  indica a velocidade de rotação da ferramenta em RPM;  $af$  indica a velocidade de avanço da ferramenta expressa em mm/s e;  $ap$  indica a profundidade de cada passe durante o processo de usinagem espesso em mm.

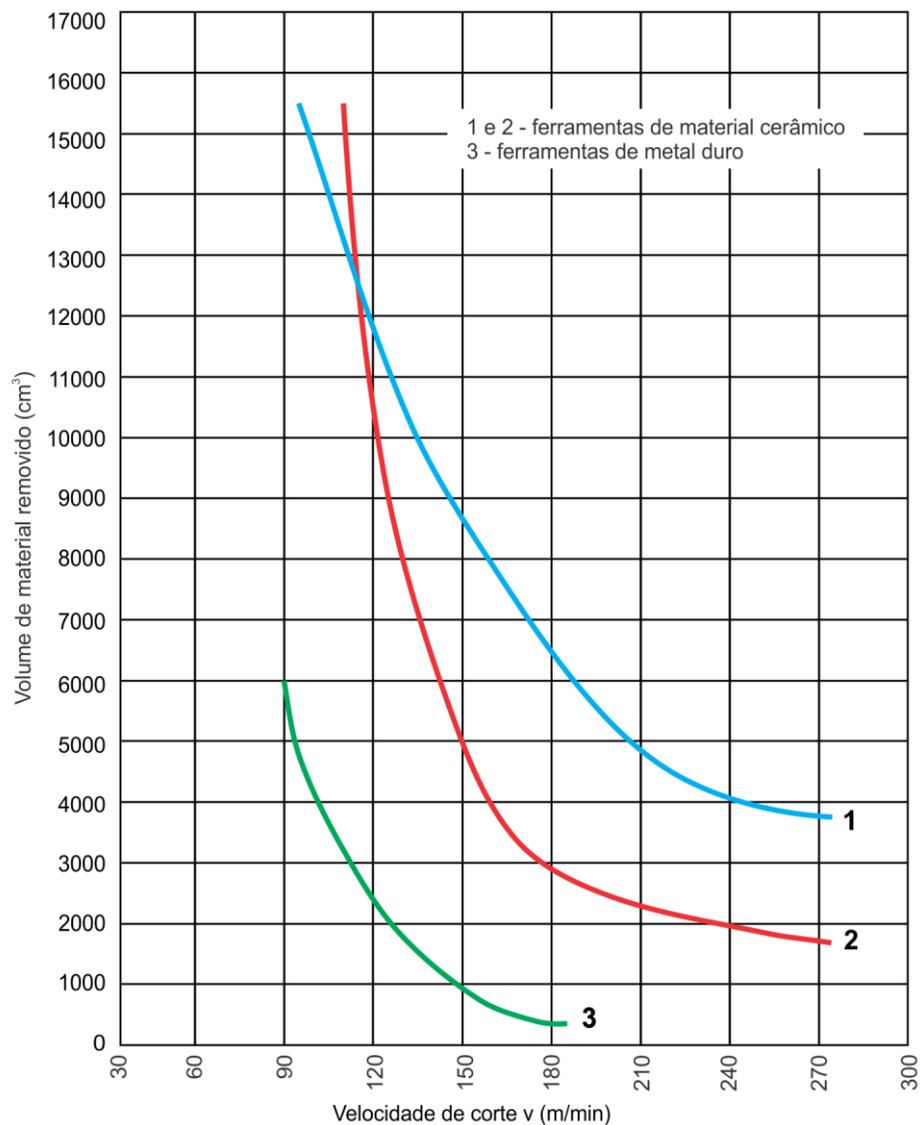


De uma maneira geral, com pequenas exceções, as ferramentas de usinagem podem ser agrupadas em duas categorias: as que geram superfícies de revolução (em torno do eixo da peça a ser usinada) e aquelas que produzem superfícies planas ou relativamente planas (côncavas ou convexas, por exemplo). Em ambos os casos, para um correto procedimento de usinagem e aumento das velocidades de corte, é necessária a seleção correta da ferramenta considerando além de seu diâmetro, número de gumes cortantes e perfil o seu material constituinte. Entretanto para determinação de uma operação econômica e eficiente não se deve considerar apenas a velocidade de corte, outro fator a ser considerado é a quantidade de material removido na unidade de tempo. Uma ferramenta ideal é aquela que permite remover a mesma quantidade de material em quaisquer velocidades. Na Figura 25 é mostrado um comparativo de desempenho das ferramentas considerando a quantidade de material removido em função da velocidade de corte (SANDVIK, 2010).

Segundo Cipelli (2004), não há uma classificação geral de materiais para ferramentas. No contexto histórico (Figura 26), duas categorias de materiais se sobressaem, e podem ser

considerados os mais importantes para usinagem, ainda que não as mais eficientes ou tecnologicamente desenvolvidas. Estes materiais são os aços rápidos e os metais duros. Na época de seu desenvolvimento, os aços rápidos e os metais duros, permitiram um grande salto tecnológico no que tange os processos de usinagem, proporcionando um aumento nas velocidades de corte de uma ordem de grandeza de, segundo Dieter (1981), aproximadamente 3 m/min para até 35 m/min, para os aços rápidos enquanto as de metal duro permitiram que estas velocidades de corte chegassem na faixa de 300 m/min. A maioria das ferramentas de corte modernas continuam sendo fabricadas em aço rápido ou metal duro mas há também as confeccionadas em ligas fundidas, e diamantadas.

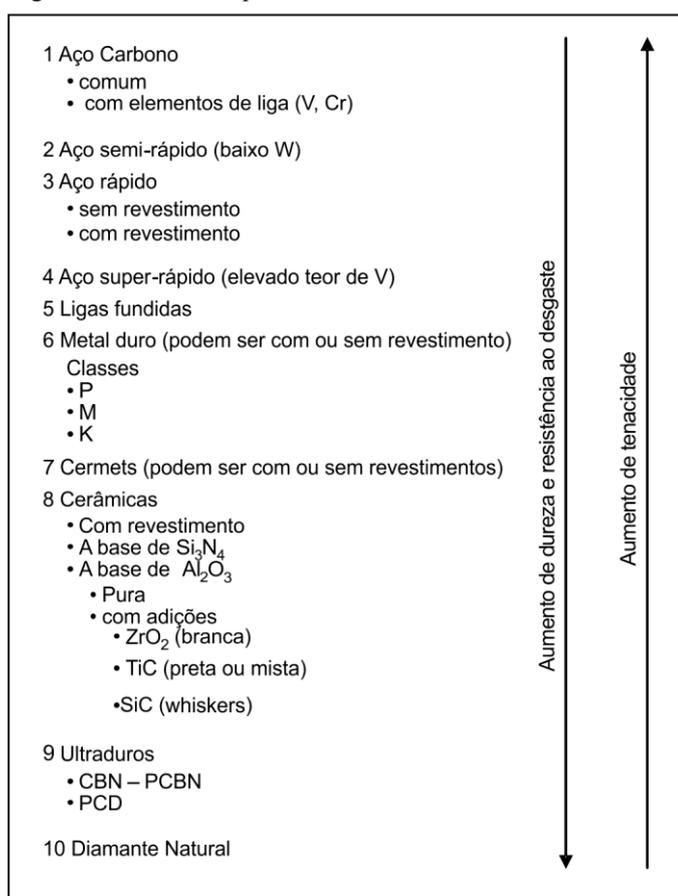
Figura 25 - Vida útil da ferramenta - material removido em  $\text{cm}^3$  X velocidade de corte



Adaptado em 03/12/2010 de Dieter, 1981.

Nas Ferramentas diamantadas o diamante, material mais duro encontrado na natureza, têm sido empregado há bastante tempo como ferramenta de corte mas, devido ao seu alto custo, seu uso é restrito às operações onde outras ferramentas/materiais não apresentam desempenho favorável (TRENT, 2000). Sua elevada dureza ocorre devido ao arranjo cristalino de sua estrutura cristalina. Dessa forma, cada átomo de carbono se liga a outros quatro átomos de carbono em ligações totalmente covalentes. Isso, segundo Callister, 2008, forma a estrutura cristalina cúbica do diamante, que também é encontrada em outros elementos como o Germânio e Silício.

Figura 26 - Materiais para Ferramentas de Corte



Adaptado em 01/12/2010 de Dieter, 1981.

Além de sua dureza, o que o torna um material bastante atrativo, o diamante possui uma condutividade elétrica bastante baixa além de uma condutividade térmica anormalmente alta para um material não metálico. É opticamente transparente nas regiões visível e infravermelha do espectro eletromagnético e possui elevado índice de refração (CALLISTER, 2008).

Diamantes sintéticos passaram a ser desenvolvidos na metade da década de 1950 a partir do aquecimento do carbono grafítico, catalizados a temperaturas superiores a 1500 °C em ultra-altas pressões. As técnicas de produção de diamantes sintéticos foram refinadas até o ponto em que uma grande proporção de ferramentas diamantadas industriais são feitas com cristais produzidos artificialmente (KINDLEIN JÚNIOR, 1999).

As ferramentas diamantadas são as ferramentas mais usadas no desmonte, corte e polimento de rochas ornamentais, materiais cerâmicos e metais não-ferrosos em geral (FILGUEIRA, 2006). Segundo Stemmer (2008), sua extraordinária dureza, que excede a de qualquer outro material, pode variar entre 5000 e 7000 na escala Knoop ou 56 a 102 GPa (Giga Pascal), dependendo da orientação do cristal. A alta condutividade térmica do diamante pode prejudicar o desempenho das ferramentas policristalinas pelo arrancamento prematuro do grão abrasivo em função da matriz metálica (geralmente níquel) que absorve o calor gerado pelo atrito que ocorre entre a peça e a ferramenta.

Segundo Filgueira, 2006, existe uma grande variedade de materiais que podem ser utilizados na manufatura deste tipo ferramenta, mas o mais empregado é o sistema matriz metálica ligante - cristais de diamantes. Os cristais de diamante são impregnados na matriz metálica, ou polimérica conforme o caso, através de duas maneiras: eletrodeposição, no caso das fresas, discos e fios diamantados, ou distribuídos em todo o volume da ferramenta no caso dos rebolos de retificação sinterizados, este último podendo utilizar matriz polimérica em sua confecção. A seleção da matriz é baseada na abrasividade do material a ser cortado ou polido. Para materiais altamente abrasivos como o concreto, carbetto de silício (SiC), nitreto de silício (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) e alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), a matriz de tungstênio deve ser utilizada. A matriz de cobalto é empregada no corte de materiais cujas abrasividades são similares aos granitos. Matrizes de bronze e cobalto, e suas ligas, são empregadas no corte de mármore. Latão, bronze ou cobre são empregados no corte de cerâmicas, vidros, e metais não-ferrosos (PRZYKLENK, 1993). Não é indicado o uso de ferramentas diamantadas na usinagem de aços e ferros fundidos devido à afinidade do carbono, constituinte do diamante, com o elemento ferro.

### 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Dadas as potencialidades do uso dos processos por comando numérico no beneficiamento de rochas o presente trabalho, através de um estudo sistemático, busca permitir o uso do fresamento HSM através da determinação dos melhores parâmetros de usinagem para este fim.

No entanto, para a realização desse estudo foram necessárias a determinação e caracterização da rocha a ser estudada, da ferramenta, das estratégias e geometrias de fresamento e a padronização dos ensaios para, finalmente, verificar quais as melhores condições para uso desse processo.

É importante sempre salientar que a rocha é um material natural e sua formação depende de inúmeros fatores e condições, conforme visto anteriormente. Para a realização dos ensaios, caracterização e fresamento, as amostras de rocha foram subdivididas em corpos de prova representativos da amostra, em função das suas características de formação, heterogêneos entre si.

Durante o mês de junho de 2010, junto ao Centro Tecnológico de Pedras, Gemas e Jóias da Univates de Lajeado, foram realizados dez testes preliminares para verificação da real possibilidade de utilização de fresamento CNC no beneficiamento de rochas. Nestes, foram utilizados amostras de granito, testes 01 a 08, e ágata, testes Ag01 e Ag02 (Figura 27), fresas diamantadas das marcas Vortex, modelo 3018 (nos testes 01, 02 e 03), e Fava, modelo 4137 (nos testes 04 à 08, Ag01 e Ag02), com diâmetros entre 2,831 e 1,868 mm (Figura 28), fresadora CNC da marca Tecnodrill, modelo Digimill 3D com *spindle* de até 23000 RPM, 5

KW de potência e refrigeração por névoa, e geometrias para usinagem confeccionadas no *software* ArtCam® 8.

Figura 27 - Amostras de granito branco (A), granito preto (B) e calcedônia (ágata) (C). Escala 0,5

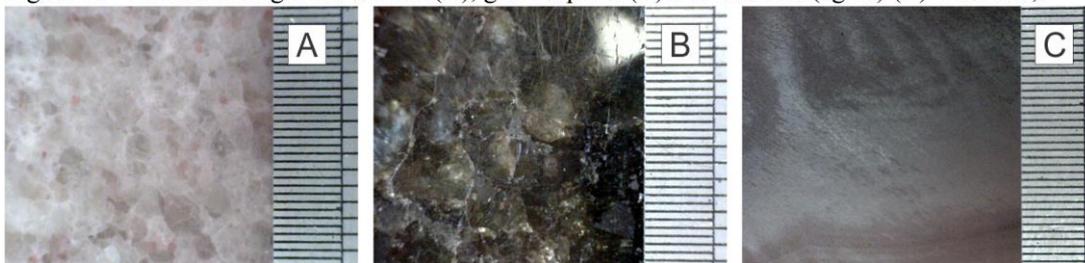
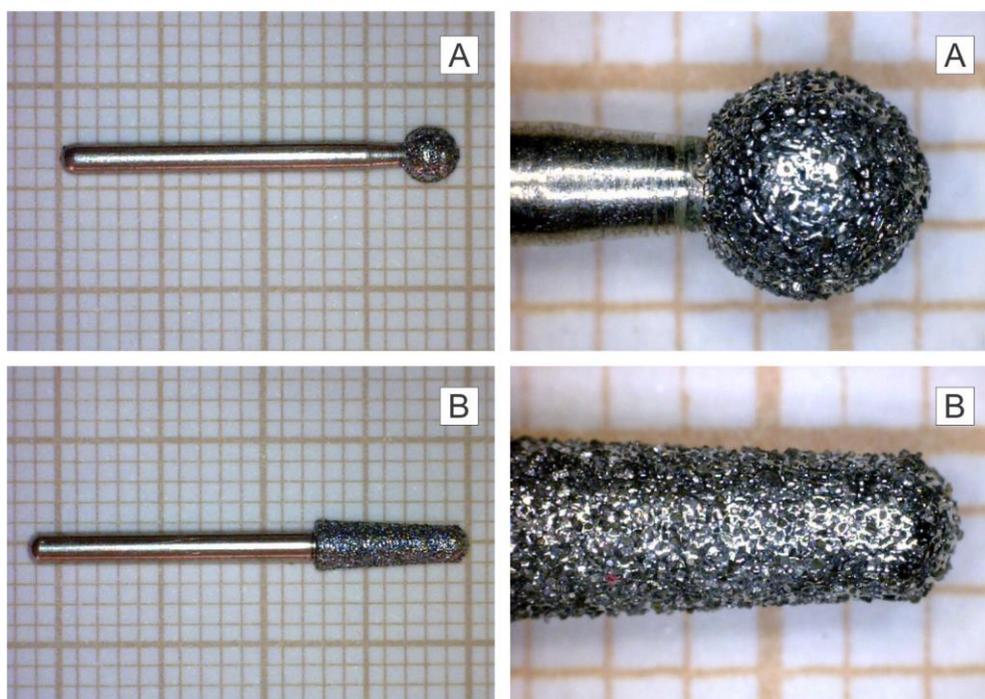


Figura 28 - Fresas dentárias diamantadas das marcas Vortex modelo 3018 (A) e Fava modelo 4137 (B). Escala 1 mm.

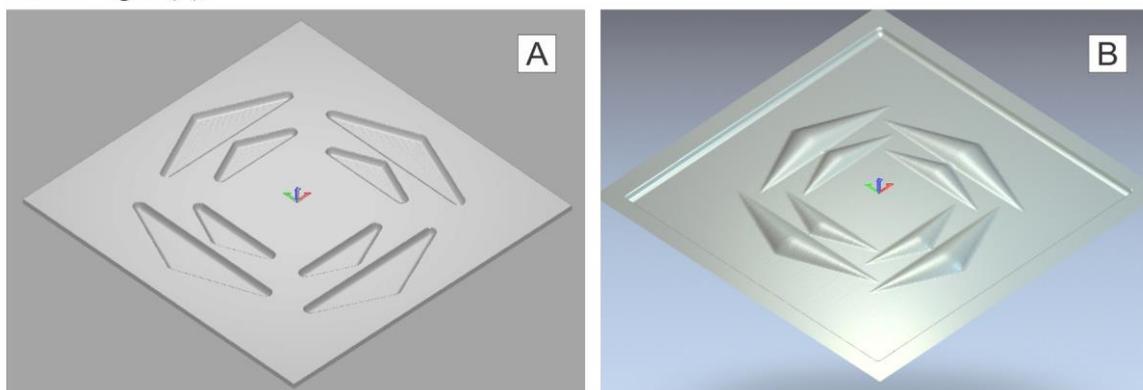


Para o granito a geometria de usinagem utilizada (logotipo da Univates) media  $50 \times 52,075$  mm e o volume previsto de retirada de material foi de  $848,94 \text{ mm}^3$  (volume calculado em *software*). Na ágata a geometria de usinagem media  $22 \times 22,913$  mm e um volume de retirada de material de  $220,824 \text{ mm}^3$  (Figura 29).

Em todos os testes alguns parâmetros de usinagem (velocidade de avanço, velocidade de mergulho e profundidade do passe) foram alterados para verificação do comportamento da ferramenta e o aspecto do material usinado. A velocidade de avanço foi variada entre 5 e 8 mm/s., a velocidade de mergulho entre 0,025 e 1 mm/s. e a profundidade do passe entre 0,1 e 0,34 mm, enquanto a velocidade de rotação do *spindle* foi mantida em 23000 RPM,

considerando que as fresas dentárias trabalham em velocidades elevadas, e a refrigeração por água foram mantidas.

Figura 29 - Geometria em baixo relevo utilizada nos testes em granito (A); Geometria alto relevo utilizada nos testes em ágata (B).



Os resultados das observações realizadas durante os testes serviram como subsídio para o estudo: a necessidade de refrigeração eficiente, para não haver fusão do aglomerante, no caso níquel, e desprendimento prematuro dos grãos abrasivos da fresa; a interferência da velocidade de mergulho no desgaste da ponta ferramenta; a profundidade do corte a cada passe (quando variada entre 0,1 e 0,34 mm), nestes casos pouco significativa no desgaste do gume da ferramenta; e o avanço lateral, nestes casos, interferindo na flexão axial do eixo da fresa. No Apêndice A deste trabalho encontram-se as fichas descritivas de cada um dos testes, os parâmetros utilizados, os resultados obtidos e imagens da condição das fresas e materiais usinados.

É importante salientar que o parâmetro velocidade de mergulho somente interfere na entrada da ferramenta no material no início do processo. Para as demais entradas (deslocamentos em Z), durante o processo de fresamento, é assumida a velocidade de avanço para este deslocamento, o que interfere de forma direta no desgaste da ferramenta.

Com base nos conhecimentos adquiridos nos testes preliminares e no referencial bibliográfico pesquisado, foi definida a metodologia para desenvolvimento do presente trabalho, que consiste nas seguintes etapas: determinação da rocha, preparação e caracterização das amostras, definição das geometrias de usinagem, testes de usinagem e, por fim, a discussão dos resultados.

### **3.1 - Determinação da Rocha**

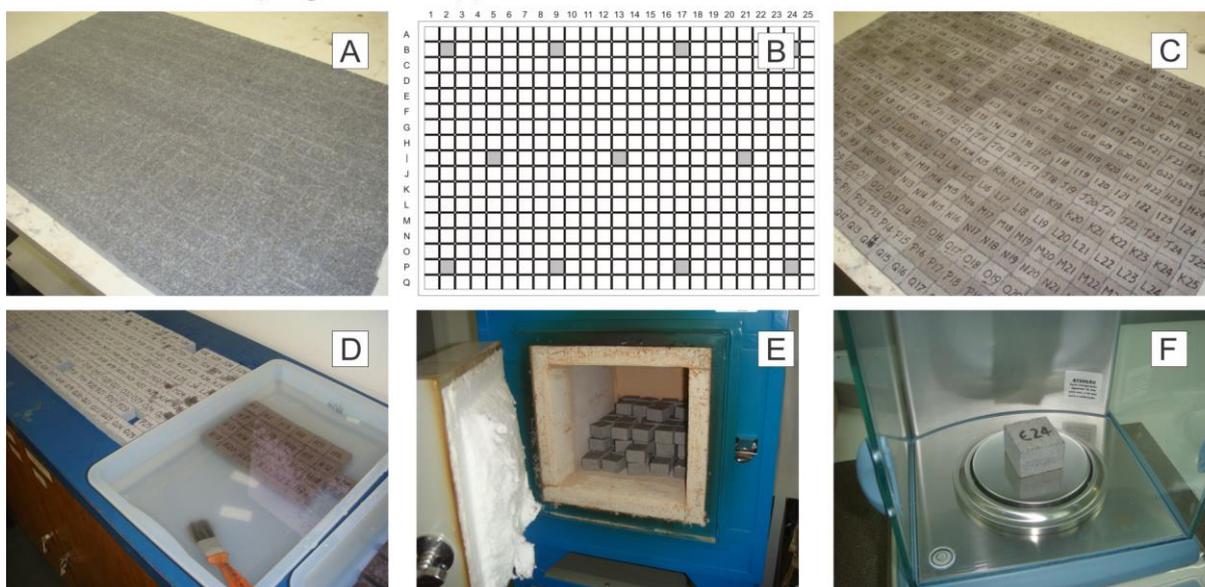
Para a definição da rocha a ser estudada e utilizada nos testes de usinagem foram considerados os seguintes itens: ser uma rocha de revestimento largamente utilizada e com baixo valor agregado; ser representativa, dentro do mercado de rochas de revestimento extraídas no Rio Grande do Sul; ser uma rocha abundante; ter processos de beneficiamento simples, como o martelamento e cortes retos; e, por fim, apresentar potencialidade para a utilização de processos não convencionais de transformação.

O riódacito rocha ornamental utilizada neste estudo, é oriundo de frentes de lavra da Região do Basalto e fazem parte, segundo o Serviço Geológico do Brasil – CPRM, dos derrames da Província Geológica do Paraná, Fácies Caxias, formada no período Cretáceo, entre 65 e 135 milhões de anos atrás, constituída principalmente por derrames basálticos maciços de composição intermediária a ácidas, melanocráticas com textura granular fina e estrutura lamelar, o que explica a facilidade de extração de lajes no sentido horizontal.

#### **3.1.1 - Preparação e Caracterização das Amostras**

Como citado anteriormente, o riódacito é um material natural e sua formação depende diretamente dos tipos de derrames e resfriamento, dentre outros fatores que alteram suas características químicas e físicas. Para aferição de suas características e um melhor conhecimento desse material foram adquiridas 3 placas, uma de 95 x 60 x 2 centímetros, denominada “controle”, além de duas menores denominadas “aleatórias”, uma com 74 x 11 x 2 cm e outra com 45 x 15 x 2 cm. A placa controle, mais escura visualmente, foi mapeada e subdividida em 425 corpos de prova de 3 x 3 x 2 cm. As placas aleatórias, ambas visivelmente com um tom avermelhado, foram subdivididas em 93 amostras 3 x 3 x 2 cm sem controle de posicionamento dos corpos de prova. Os corpos de prova foram lavados, para eliminação da poeira superficial, e secos, para posterior pesagem em balança analítica (Figura 30). A pesagem dos corpos de prova servirá para determinar o volume de retirada do material usinado durante este estudo.

Figura 30 - A placa controle (A) foi mapeada (B) e subdividida em 425 corpos de prova de 3 x 3 x 2 cm (C). As amostras assinaladas no mapa (B) foram analisadas quanto a sua dureza, através de ensaio Knoop; difração e fluorescência de raios X e petrografia. Todas as amostras foram lavadas (D), secagem em estufa (E) e suas massas foram aferidas em balança digital analítica (F).



Para caracterização da rocha quanto sua dureza, através de ensaio Knoop e composição química através de análise por difratometria de raios X foram selecionadas 22 amostras sendo 11 da placa controle e 11 das placas aleatórias, como segue: da placa controle as amostras B2, B9, B17, B24, I5, I13, I21, P2, P9, P17 e P24; das placas aleatórias as amostras 1, 9, 17, 25, 33, 49, 57, 65, 73, 81 e 89. Já para o ensaio de fluorescência de raios X foram selecionadas, dentre as amostras citadas anteriormente, 11 peças, como segue: da placa controle as amostras I7, B2, B17, I5, I13, I21, P9, P17, P24; das placas aleatórias as amostras 1 e 9. Para avaliação petrológica foram confeccionadas lâminas petrográficas das amostras B17, I5, P17, 25.

### 3.1.2 - Dureza Knoop

O ensaio de dureza foi baseado na metodologia apresentada por Quitete, 2002, com algumas adequações, em função do equipamento e material analisado. Para a realização do ensaio de dureza, as amostras foram submetidas a um polimento utilizando-se discos abrasivos com granulometrias decrescentes de 400 à 1200 mesh, para correção das imperfeições superficiais que influenciasssem o endentamento. A dureza Knoop foi então determinada através de 35 impressões em cada corpo de prova, conforme esquema ilustrado na Figura 31. O ensaio foi realizado no Laboratório de Cerâmicos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em um durômetro da marca Buehler modelo 1600-4980. O comprimento

da diagonal é medido, em micrômetro, imediatamente após cada impressão, sob a objetiva de 40x (aumento total de 400x), com o auxílio da escala Vernier, no sistema ocular do equipamento.

Diferentemente da pré-carga de 200 gf utilizada por Quitete, 2002, em seus estudos, a pré-carga utilizada na avaliação da dureza do riodacito em cada endentamento foi de 100 gf, para a não ocorrência de fissuramento o que impediria a correta medição e em consonância com o estabelecido pelas normas UNE 22-188 e UNE 22-178. Quando o endentamento apresentasse algum tipo de dano que prejudicasse sua medida, o mesmo era novamente realizado em região adjacente, de preferência no mesmo grão mineral (Figura 32).

Figura 31 - A) Preparação (polimento) das amostras selecionadas para medição de dureza; B) Esquema de 35 impressões realizadas em cada corpo de prova. Os números indicam a ordem em que foram realizadas.

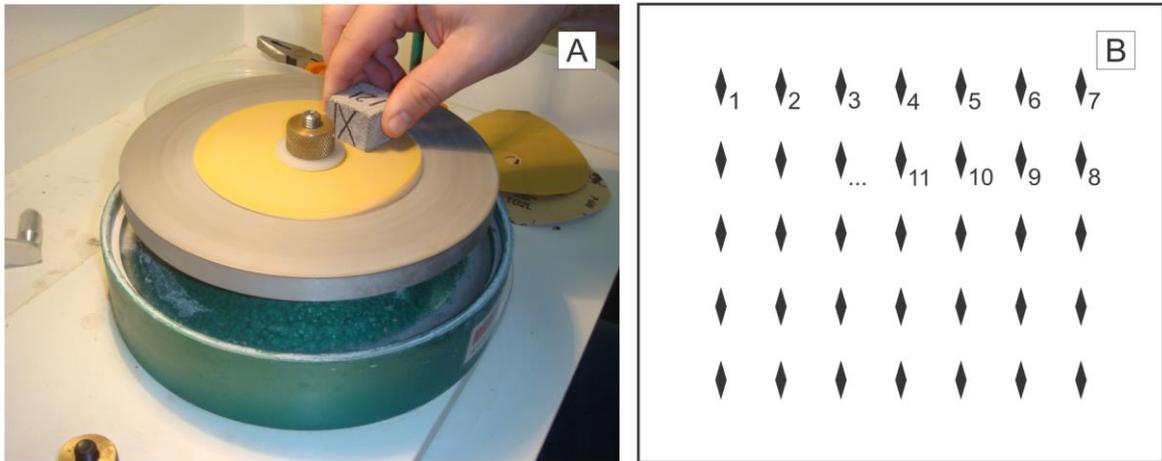
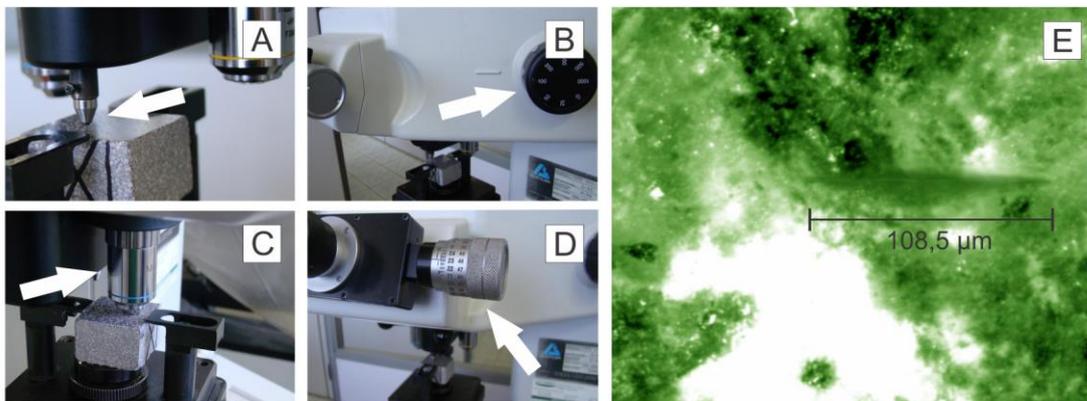


Figura 32 - A) Endentação utilizando ponteira Knoop; B) Seletor de carga aplicada da endentação; C) Objetiva utilizada para visualização da impressão resultante; D) Escala Vernier utilizada para medição da impressão; E) Impressão resultante.



Como o valor de dureza obtida através da escala Knoop, em rochas, depende da combinação e interação das fases minerais, independentes entre si, não se adota distribuição

normal. A dureza Knoop é atribuída através da confecção de um “diagrama de distribuição acumulada de dureza” através de *quartis* dos valores obtidos, organizados em ordem crescente, sendo determinado da seguinte maneira: HK25 (correspondente ao valor de 25% ou quartil inferior), HK50 (correspondente ao valor de 50% do diagrama ou mediana) e HK75 (correspondente a 75% do diagrama ou quartil superior).

### **3.1.3 – Análise do Riodacito por Difratomia de Raios X e Fluorescência de Raios X**

As análises de difratometria de raios X e fluorescência de raios X constituem os melhores métodos para investigação dos complexos no estado sólido. Para a análise por difratometria de raios X as 22 amostras pré-selecionadas foram seccionadas em dois, a fim de manter uma das partes preservada para estudos posteriores, se necessário. As amostras, para otimização das avaliações, foram preparadas conforme as seguintes etapas: rompimento em prensa uniaxial; moagem em moinho de bolas; peneiramento; e acondicionamento.

O rompimento em prensa, no Laboratório de Tecnologia da Construção - LATEC/Univates teve como finalidade a redução das dimensões unitárias para facilidade da moagem em moinho de bolas (Figura 33). Para a moagem foi desenvolvido moinho, constituído por motor elétrico de  $\frac{1}{2}$  cv e 1450 RPM que, através de um conjunto de polias para redução da velocidade, confere a rotação de 30 RPM a dois cilindros de aço de 20 cm de diâmetro cada, com capacidade de processamento simultâneo de duas amostras.

A rotação dos cilindros proporciona o impacto entre as amostras do riodacito e esferas de aço inoxidável, estas com massa média de 24 g cada. Aletas, no interior de cada cilindro, otimizam o processo. As amostras foram mantidas em rotação por um período de 4 horas. O produto oriundo da moagem do riodacito foi peneirado em #320, granulometria indicada para o processo de difratometria e fluorescência, e acondicionados em recipientes selados e identificados (Figura 34).

Figura 33 - Sequenciamento de preparo das amostras para moagem. A) Amostra seccionada em função do volume de material adequado às análises de difratometria e fluorescência de raios X; B e C) Amostra sendo preparada para prensagem e D) Resultado da prensagem.

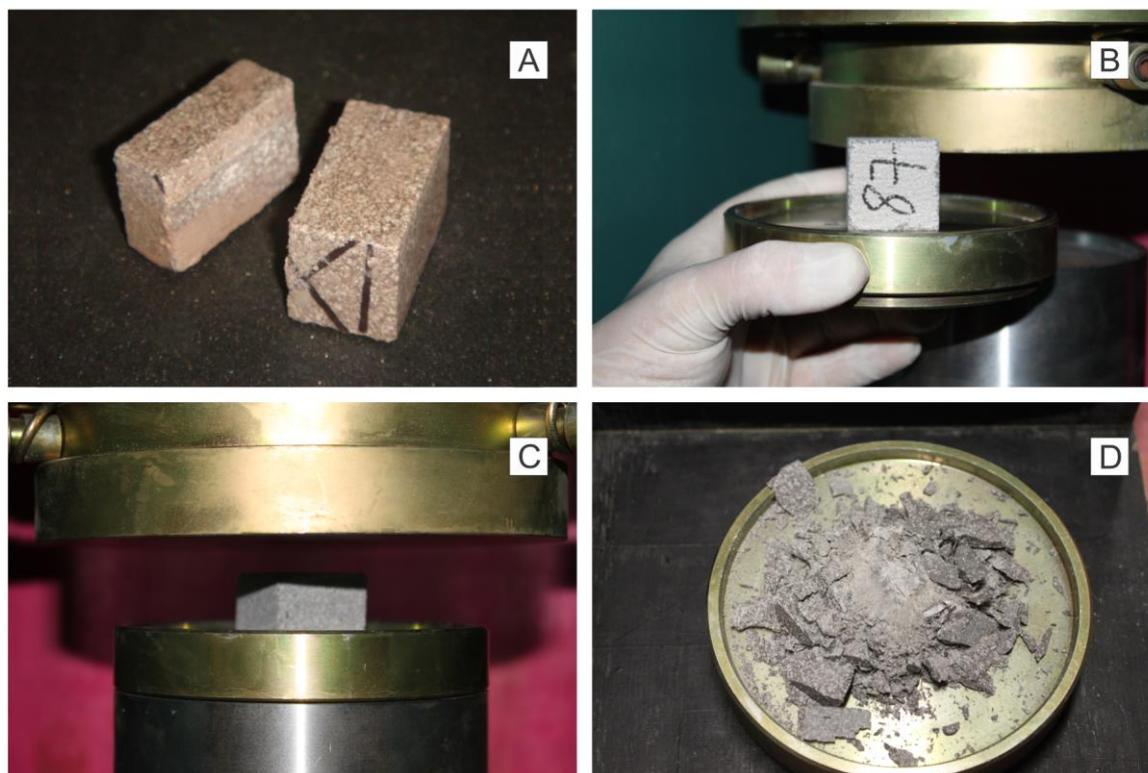
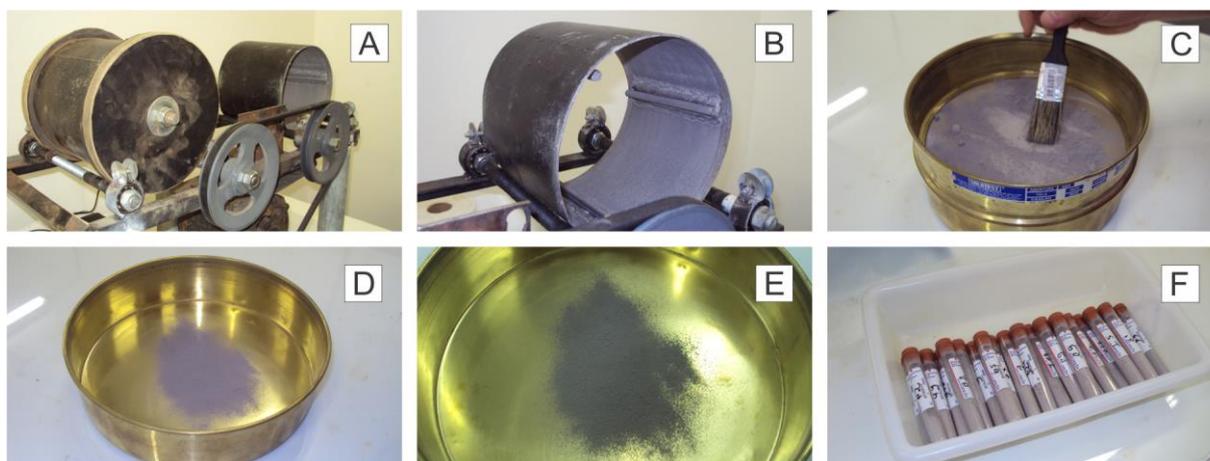


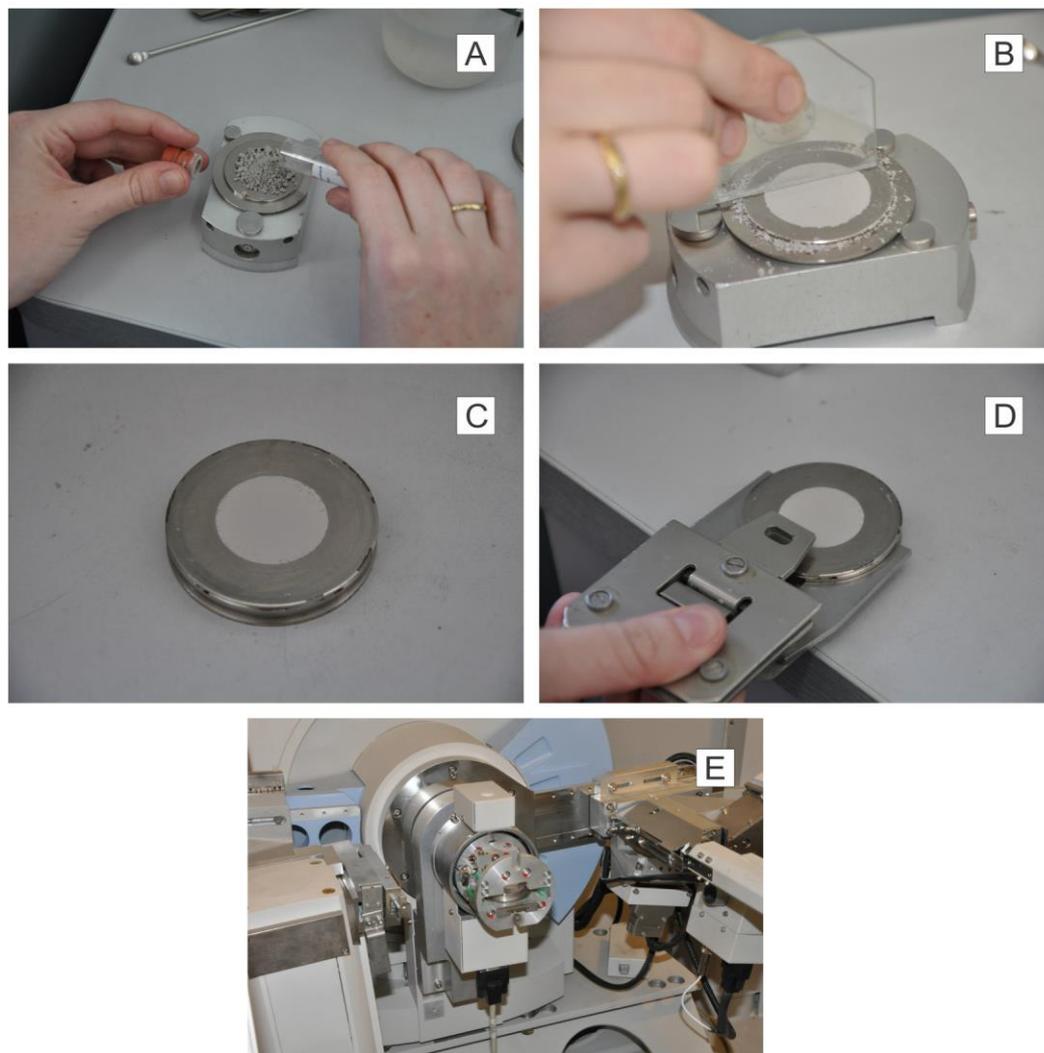
Figura 34 - Sequenciamento do processo de moagem em moinho de bolas e acondicionamento. A) Moinho de bolas; B) Cilindro de moagem; C) Peneiramento em #325; D e E) Amostra peneirada e; F) Amostras acondicionadas.



Para identificação das fases cristalinas presentes nas amostras, por difratometria de raios X, foi utilizado difratômetro automatizado marca Philips X'Pert Pro modelo PW 3040/00, pertencente ao PPGE3M/UFRGS. O difratômetro, com geometria Bragg – Brentano, possui uma fonte de raios X de cobre operado a 40kV e 40mA, com  $2\theta$  variando entre  $5^\circ$  a  $75^\circ$ , passo  $0,02^\circ$  e tempo de contagem de 5 s/passos. O tempo total de análise por amostra ficou em torno de 20 minutos. As amostras analisadas foram acondicionadas, no porta-amostra,

pelo método convencional com acabamento realizado com lâmina de vidro. Entre as análises das amostras foi efetuada a limpeza de todo o material com álcool isopropílico (Figura 35).

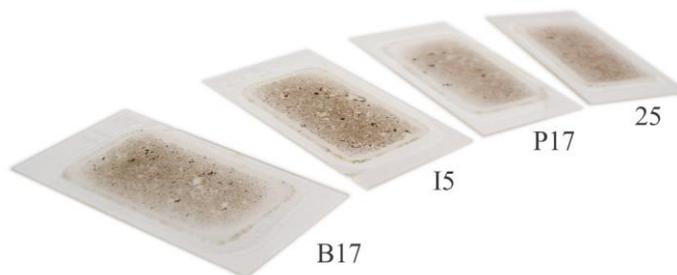
Figura 35 - Exemplo das etapas de preparo das amostras e difratometria de raios X. A e B) Amostra em pó sendo preparada pelo método convencional; C e D) Amostra pronta para análise; E) Amostra sendo analisada.



#### 3.1.4 Análise Petrográfica e EDS

Para a análise petrográfica, que possibilita a classificação da rocha das amostras utilizadas neste estudo, foram selecionadas quatro corpos de prova como segue: B17, I5, P17 e 25. As amostras selecionadas foram encaminhadas aos Laboratórios do Curso de Gestão Ambiental da Universidade do Vale dos Sinos – Unisinos - para confecção de lâminas petrográficas com espessura de 30  $\mu\text{m}$  montadas sobre vidro (Figura 36).

Figura 36 - Imagem fotográfica das lâminas das amostras B17, I5, P17 e 25 utilizadas na análise petrográfica das amostras.



Já para caracterização mineralógica e textural, as lâminas das amostras de riodacito foram submetidas à análise, no Departamento de Mineralogia e Petrologia da UFRGS/Instituto de Geociências, em microscópio tipo MOLT da marca Leitz sendo utilizados aumentos da ordem de 10 e 40 vezes e luz polarizada. Também foram obtidas, através de equipamento Leica, com câmera da marca Sony modelo 3CCD acoplada, imagens fotográficas em luz refletida e polarizada com magnificações da ordem de 2,5; 5; 10; e 50 vezes. Para caracterização da composição química foram realizadas análises em EDS destas mesmas amostras, no Laboratório de Design e Seleção de Materiais/UFRGS, em um Microscópio Eletrônico de Varredura na marca Hitachi TM3000 acoplado a um espectômetro de dispersão de energia que permite a análise de elementos químicos e óxidos.

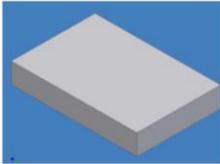
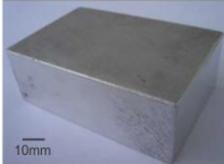
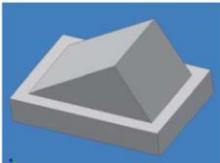
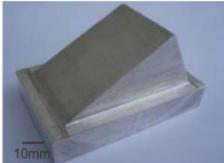
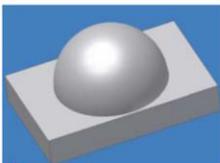
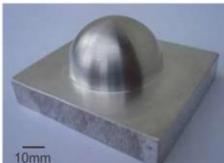
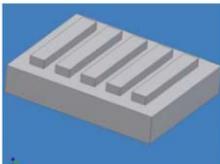
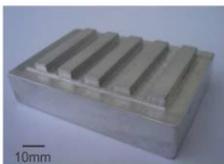
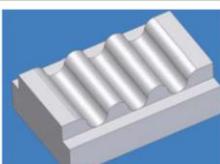
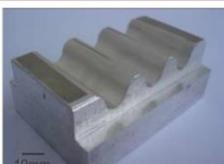
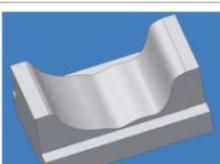
### 3.2 Definição das Geometrias de Usinagem e Ferramentas

A fim de serem sistematizados os processos de fresamento CNC no beneficiamento do riodacito, foi considerado o estudo de aplicação, citado por Freitas (2006), em solados de calçados, por apresentarem inúmeros detalhes e geometrias que servirão como base para os ensaios de usinagem. As complexidades de geometrias são distribuídas em três categorias segundo Cavalheiro (1998): 1) geometrias de baixa complexidade: constituídas por planos inclinados, planos horizontais, superfícies regradas derivadas de retas e curvas planas, raios constantes no arredondamento das arestas; 2) geometrias de média complexidade: aquelas em que as geometrias de baixa complexidade encontram-se irregularmente distribuídas ou sejam resultado da combinação destas em formas irregulares e; 3) geometrias de alta complexidade: constituídas total ou parcialmente por superfícies de forma livre a partir de entidades bi-cúbicas, superfícies regradas derivadas de entidade de terceiro grau e arredondamento de arestas com raio variável.

Baseado nestes conceitos e suas aplicações na indústria calçadista, Freitas (2006), sugere seis padrões (plano, quadrático, angular, esférico, senóide e livre), com representatividade geométrica elevada, que individualmente e/ou combinados entre si resultam em geometrias de baixa, média e alta complexidade (Figura 37).

Para adequação a este estudo, os padrões indicados por Freitas (2006), foram adaptados limitando os pontos em que há uma maior retirada de material, maior profundidade, em até 5 mm devido à dureza e desconhecimento dos padrões de usinagem para o riódacito. Também, os padrões foram reordenados conforme o grau de complexidade da geometria e provável aumento de esforços do processo.

Figura 37 - Padrões geométricos estabelecidos por Freitas (2006). Modelo de referência usinado em Alumínio.

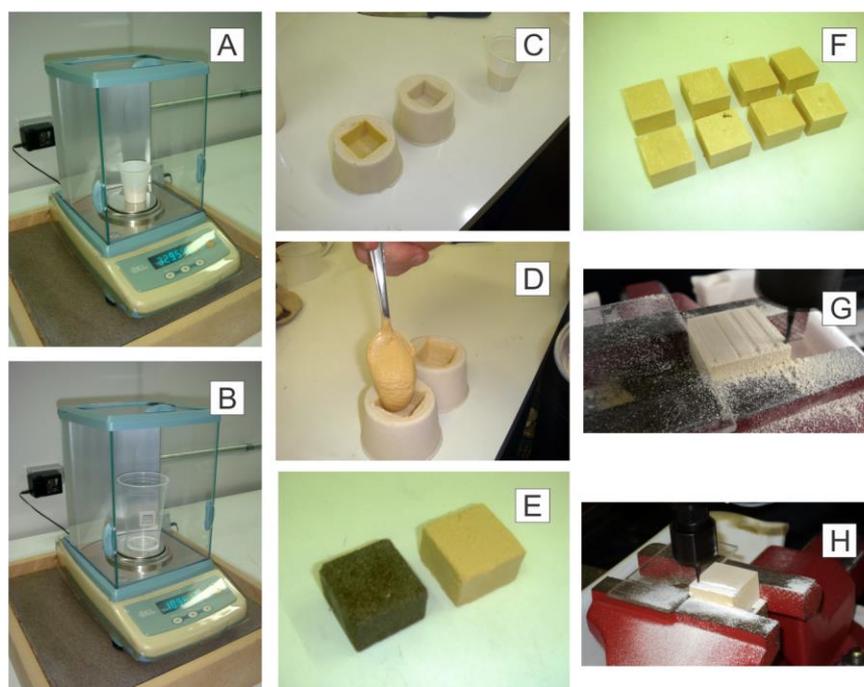
Descrição	Modelo Virtual	Modelo de Referência
Padrão 1 - geometria lisa		
Padrão 2 - perfil em ângulo		
Padrão 3 - perfil esférico		
Padrão 4 - perfil quadrático		
Padrão 5 - perfil ondulado		
Padrão 6 - perfil livre		

Adaptado em 24/05/2011 de FREITAS, 2006.

Os padrões foram desenvolvidos em software CAD (Solid Works® 10) e posteriormente processados em software CAM (Art Cam® versão 8), para sua adequação ao processo de usinagem CNC. Os desenhos técnicos, elaborados em Solid Works® 10, de cada padrão, podem ser visualizados no Apêndice B deste trabalho. Cabe salientar que para haver um comparativo para acabamento e tempo de usinagem os padrões desenvolvidos foram primeiramente executados em gesso e aço SAE 1020.

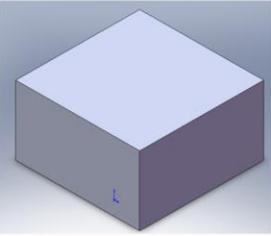
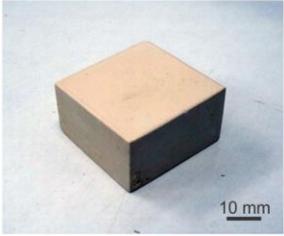
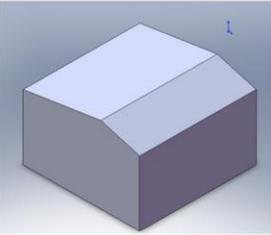
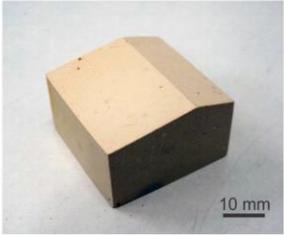
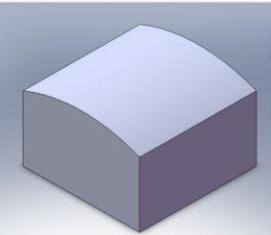
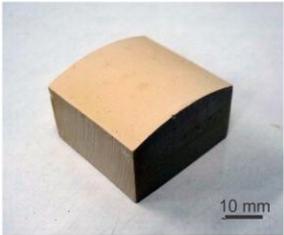
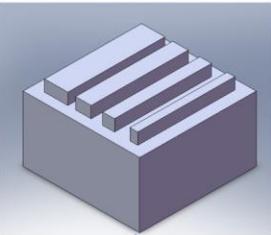
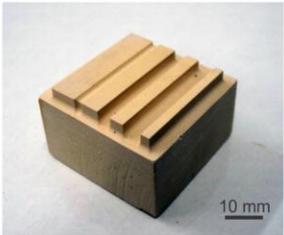
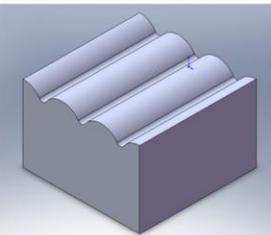
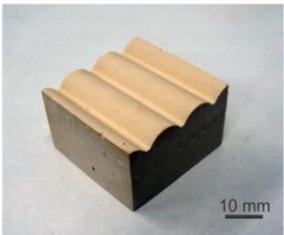
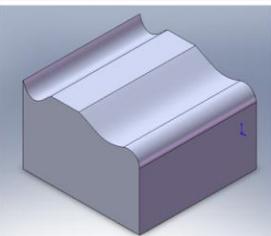
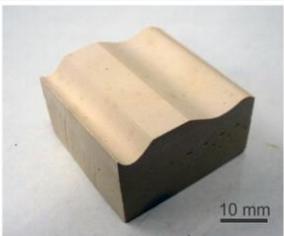
Inicialmente foram confeccionados blocos padrão em gesso pedra tipo III da marca Polident e aço SAE 1020. Os blocos de gesso (Figura 38), que serviram como padrão de acabamento, foram confeccionados com as mesmas dimensões dos blocos de riodacito a serem usinados no experimento (30 mm x 30 mm x 20 mm) utilizando a proporção de 100 g de gesso para 30 ml de água, medida que garante ao gesso, segundo o fabricante, sua maior resistência. Os blocos foram inicialmente calibrados quanto a sua planicidade, utilizando ferramenta de aço rápido e de topo reto com 6 mm de diâmetro, quatro cortes, da marca Hanita® com recobrimento de carbeto de titânio, com os seguintes parâmetros de usinagem: profundidade final de 0,5 mm; estratégia de folga da ferramenta em raster; passo lateral de 1,8 mm; avanço de 34 mm/s, velocidade de mergulho de 8 mm/s e 23000 RPM.

Figura 38 - Sequenciamento da elaboração dos padrões geométricos em gesso. Em A e B) esagem em balança analítica do gesso pedra (100 g) e água (30 ml), respectivamente; C) Molde negativo confeccionado em alginato a partir de peça de “Basalto Carijó”; D) Confeção do bloco padrão em gesso pedra; F) Blocos de gesso pedra prontos para os testes de usinagem; G e H) Usinagem dos padrões geométricos no gesso pedra.



Posteriormente, os padrões geométricos foram fresados utilizando ferramentas de aço rápido com revestimento de carbeto de titânio, de topo esférico, dois cortes, com diâmetro 2 mm. Os resultados obtidos e parâmetros de usinagem utilizados podem ser visualizados na Figura 39.

Figura 39 - Padrões geométricos estabelecidos para testes de usinagem confeccionados em gesso.

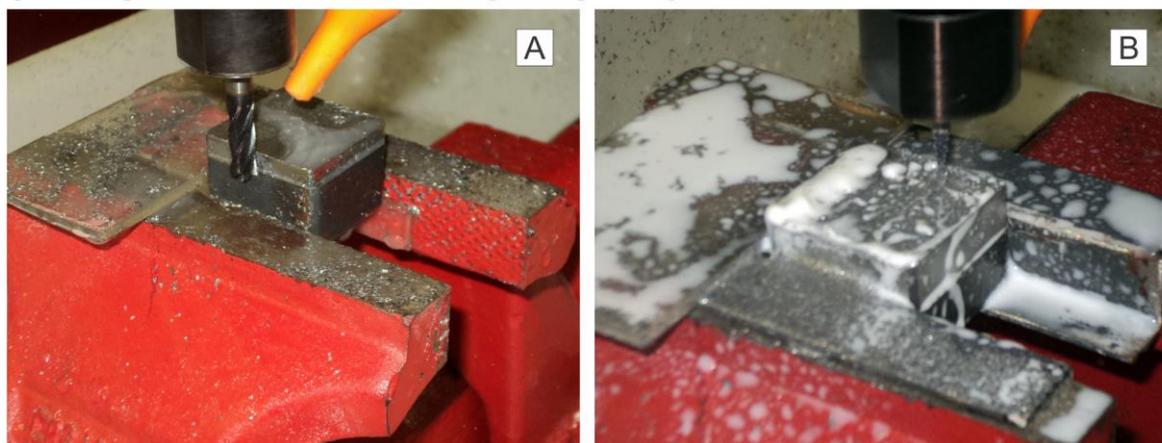
Descrição	Modelo Virtual	Modelo em Gesso
<p><b>Padrão 1 - geometria lisa e plana</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- estratégia - raster</li> <li>- profundidade final - 3 mm</li> <li>- passo lateral - 0,2 mm</li> <li>- passo vertical - 0,5 mm</li> <li>- velocidade de avanço - 17 mm/s</li> <li>- velocidade de mergulho - 4 mm/s</li> <li>- velocidade de rotação - 23000 RPM</li> </ul>		
<p><b>Padrão 2 - perfil inclinado</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- estratégia - raster</li> <li>- profundidade final - 3,008 mm</li> <li>- passo lateral - 0,2 mm</li> <li>- passo vertical - 0,5 mm</li> <li>- velocidade de avanço - 17 mm/s</li> <li>- velocidade de mergulho - 4 mm/s</li> <li>- velocidade de rotação - 23000 RPM</li> </ul>		
<p><b>Padrão 3 - perfil côncavo</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- estratégia - raster</li> <li>- profundidade final - 3 mm</li> <li>- passo lateral - 0,2 mm</li> <li>- passo vertical - 0,5 mm</li> <li>- velocidade de avanço - 17 mm/s</li> <li>- velocidade de mergulho - 4 mm/s</li> <li>- velocidade de rotação - 23000 RPM</li> </ul>		
<p><b>Padrão 4 - perfil quadrático com paredes verticais e cantos bem definidos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- estratégia - raster</li> <li>- profundidade final - 3 mm</li> <li>- passo lateral - 0,2 mm</li> <li>- passo vertical - 0,5 mm</li> <li>- velocidade de avanço - 17 mm/s</li> <li>- velocidade de mergulho - 4 mm/s</li> <li>- velocidade de rotação - 23000 RPM</li> </ul>		
<p><b>Padrão 5 - perfil ondulado</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- estratégia - raster</li> <li>- profundidade final - 2,674 mm</li> <li>- passo lateral - 0,2 mm</li> <li>- passo vertical - 0,5 mm</li> <li>- velocidade de avanço - 17 mm/s</li> <li>- velocidade de mergulho - 4 mm/s</li> <li>- velocidade de rotação - 23000 RPM</li> </ul>		
<p><b>Padrão 6 - perfil livre representando as variações de uma geometria complexa</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- estratégia - raster</li> <li>- profundidade final - 4,934 mm</li> <li>- passo lateral - 0,2 mm</li> <li>- passo vertical - 0,5 mm</li> <li>- velocidade de avanço - 17 mm/s</li> <li>- velocidade de mergulho - 4 mm/s</li> <li>- velocidade de rotação - 23000 RPM</li> </ul>		

Os blocos de aço foram inicialmente calibrados quanto a sua dimensão, em 30 x 30 mm, igualmente utilizando para isso uma ferramenta de 6 mm de diâmetro da marca Hanita® com recobrimento de carbeto de titânio e quatro cortes. Para calibração dos blocos de aço foram utilizados os seguintes parâmetros: profundidade final de 10 mm; estratégia de folga da ferramenta em raster; passo lateral de 1,8 mm; passo vertical de 0,5 mm; avanço de 15 mm/s e velocidade de mergulho de 4 mm/s, velocidade do *spindle* de 15000 RPM.

Para usinagem dos padrões geométricos nos blocos de aço, estes foram calibrados, inicialmente, quanto a sua planicidade, utilizando os mesmos parâmetros citados no parágrafo anterior. Imediatamente após cada calibração um padrão geométrico foi usinado utilizando ferramenta de topo esférico de 2 mm de diâmetro com recobrimento de carbeto do titânio da marca Hanita® com 2 cortes (Figura 40).

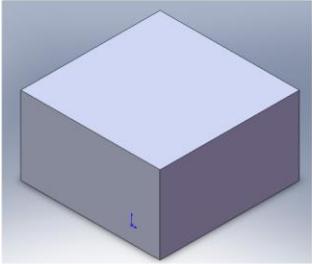
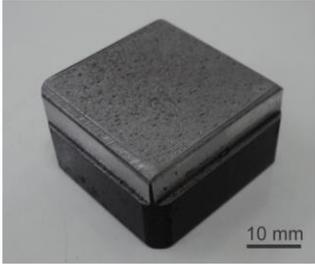
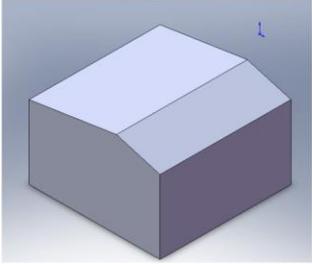
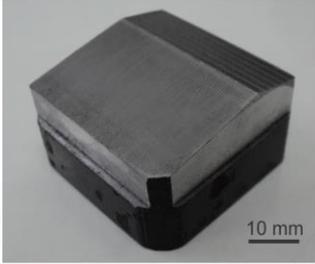
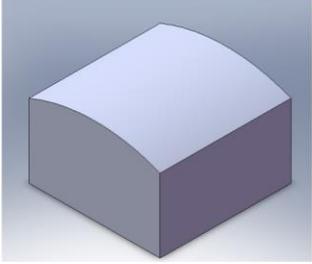
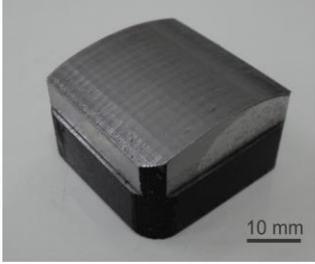
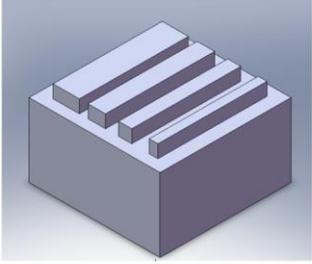
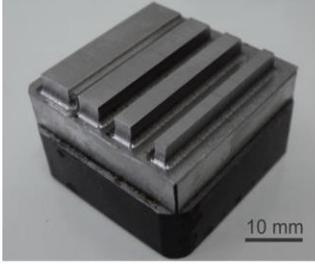
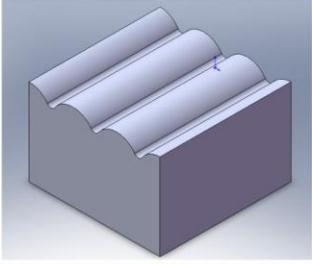
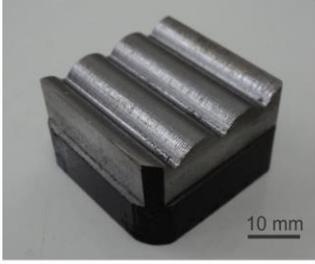
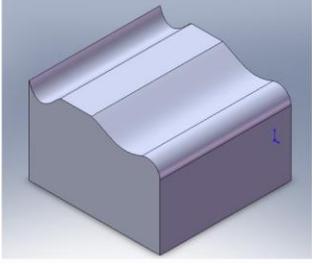
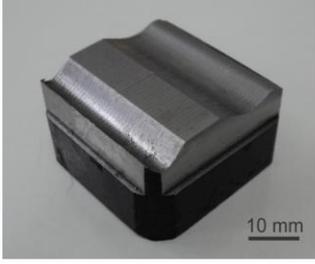
Na usinagem de todos os padrões em aço foram utilizados os parâmetros indicados pelo fabricante da ferramenta, sob refrigeração e lubrificação forçada por névoa com óleo solúvel, marca Unix Solúvel 100 para usinagem leve, diluído em água na proporção de 1 para 19.

Figura 40 - Usinagem dos padrões geométricos em blocos de aço SAE 1020. Em A) Calibração dos blocos quanto sua planicidade e dimensões; B) Usinagem dos padrões geométricos.



A ferramenta utilizada não foi capaz de confeccionar os seis padrões, pré-determinados, sendo necessária a sua substituição após terem sido removidos um total de  $\cong 5250 \text{ mm}^3$  de material em 4 horas 20 minutos, na confecção de 4 padrões (2, 4, 5 e 6). A ferramenta seguinte removeu  $\cong 5030 \text{ mm}^3$  de material em 3 horas 23 minutos e 19 segundos, num total de 3 padrões (1, 3 e 6). O padrão *free form* (6) foi refeito devido ao desgaste apresentado pela primeira ferramenta. Os resultados obtidos e parâmetros utilizados são descritos na Figura 41.

Figura 41 - Padrões geométricos estabelecidos para testes de usinagem confeccionados em aço.

Descrição	Modelo Virtual	Modelo em Aço
<p><b>Padrão 1 - geometria lisa e plana</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- estratégia - raster</li> <li>- profundidade final - 3 mm</li> <li>- passo lateral - 0,2 mm</li> <li>- passo vertical - 0,5 mm</li> <li>- velocidade de avanço - 8,5 mm/s</li> <li>- velocidade de mergulho - 4 mm/s</li> <li>- velocidade de rotação - 15000 RPM</li> <li>- tempo de usinagem - 49 min 37 s</li> <li>- material removido - 2700 mm<sup>3</sup></li> </ul>		
<p><b>Padrão 2 - perfil inclinado</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- estratégia - raster</li> <li>- profundidade final - 3 mm</li> <li>- passo lateral - 0,2 mm</li> <li>- passo vertical - 0,5 mm</li> <li>- velocidade de avanço - 8,5 mm/s</li> <li>- velocidade de mergulho - 4 mm/s</li> <li>- velocidade de rotação - 15000 RPM</li> <li>- tempo de usinagem - 55 min 17 s</li> <li>- material removido - 1350 mm<sup>3</sup></li> </ul>		
<p><b>Padrão 3 - perfil côncavo</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- estratégia - raster</li> <li>- profundidade final - 3 mm</li> <li>- passo lateral - 0,2 mm</li> <li>- passo vertical - 0,5 mm</li> <li>- velocidade de avanço - 8,5 mm/s</li> <li>- velocidade de mergulho - 4 mm/s</li> <li>- velocidade de rotação - 15000 RPM</li> <li>- tempo de usinagem - 55 min 08 s</li> <li>- material removido - 885,67 mm<sup>3</sup></li> </ul>		
<p><b>Padrão 4 - perfil quadrático com paredes verticais e cantos bem definidos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- estratégia - raster</li> <li>- profundidade final - 3 mm</li> <li>- passo lateral - 0,2 mm</li> <li>- passo vertical - 0,5 mm</li> <li>- velocidade de avanço - 8,5 mm/s</li> <li>- velocidade de mergulho - 4 mm/s</li> <li>- velocidade de rotação - 15000 RPM</li> <li>- tempo de usinagem - 1 H 07 min 51 s</li> <li>- material removido - 1575 mm<sup>3</sup></li> </ul>		
<p><b>Padrão 5 - perfil ondulado</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- estratégia - raster</li> <li>- profundidade final - 3 mm</li> <li>- passo lateral - 0,2 mm</li> <li>- passo vertical - 0,5 mm</li> <li>- velocidade de avanço - 8,5 mm/s</li> <li>- velocidade de mergulho - 4 mm/s</li> <li>- velocidade de rotação - 15000 RPM</li> <li>- tempo de usinagem - 59 min 58 s</li> <li>- material removido - 879,68 mm<sup>3</sup></li> </ul>		
<p><b>Padrão 6 - perfil livre representando as variações de uma geometria complexa</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- estratégia - raster</li> <li>- profundidade final - 3 mm</li> <li>- passo lateral - 0,2 mm</li> <li>- passo vertical - 0,5 mm</li> <li>- velocidade de avanço - 8,5 mm/s</li> <li>- velocidade de mergulho - 4 mm/s</li> <li>- velocidade de rotação - 15000 RPM</li> <li>- tempo de usinagem - 1 H 38 min 34 s</li> <li>- material removido - 1444,96 mm<sup>3</sup></li> </ul>		

## 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme procedimentos apresentados no capítulo anterior, os trabalhos foram iniciados pela caracterização da rocha através de ensaios de dureza Knoop, difratometria de raios X, análise petrográfica e EDS. Após, foram efetuados os ensaios de fresamento em riodacito e comparações entre o resultado usinado e projetado. Os resultados obtidos em cada etapa e as respectivas análises são apresentados neste capítulo.

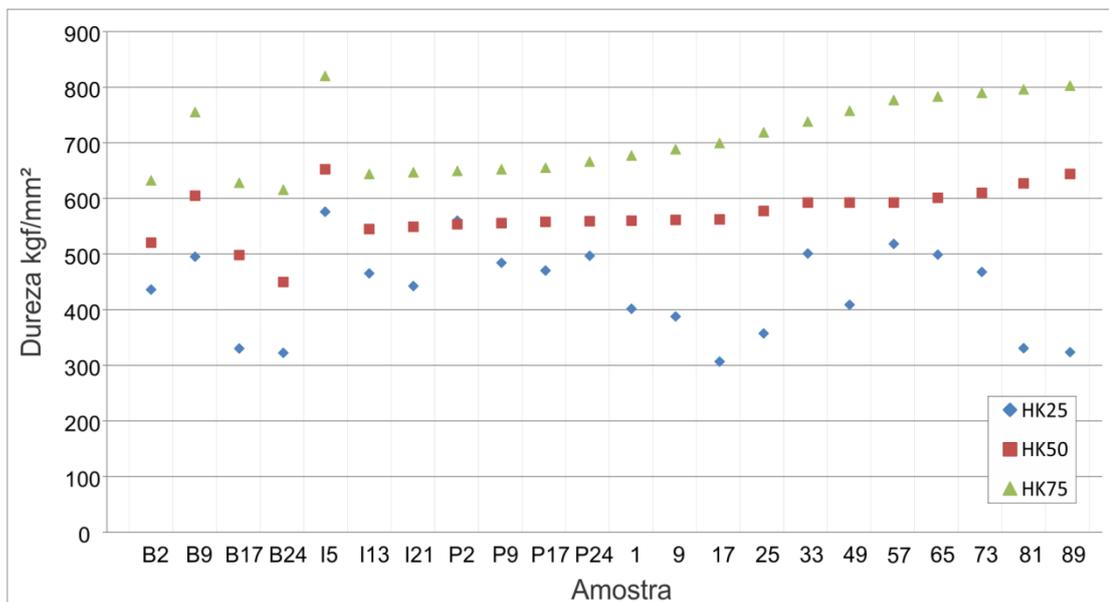
### 4.1 - Dureza Knoop

Foram realizadas um total de 385 impressões nas amostras controladas e 385 impressões nas amostras aleatórias e, após, calculada a dureza em  $\text{kgf/cm}^2$  e desvio padrão com o auxílio do *software* Microsoft Excel®. Para confirmação dos pontos de dureza foram consideradas 95% dos valores obtidos onde estes encontram-se a uma distância média inferior a duas vezes o desvio padrão, ou seja: nas amostras controladas a média calculada de dureza foi de  $598 \text{ kgf/cm}^2$  e um desvio padrão de  $235 \text{ kgf/cm}^2$ . Neste, dos valores obtidos, caso serão considerados válidos todos os pontos de dureza entre  $1067 \text{ kgf/cm}^2$  e  $128 \text{ kgf/cm}^2$ . Já nas amostras aleatórias a média foi de  $550 \text{ kgf/cm}^2$  e um desvio padrão de  $225 \text{ kgf/cm}^2$ . Neste caso serão considerados todos os pontos de dureza entre 225 e  $1000 \text{ kgf/cm}^2$ .

Após o cálculo, todos os pontos fora do intervalo foram desconsiderados. Os valores admitidos foram distribuídos em ordem crescente sendo calculados os *quartis*, 25%, 50% e 75% da curva, designadas “frequências cumulativas”  $\text{HK}_{25}$ ,  $\text{HK}_{50}$  e  $\text{HK}_{75}$ . Também se calculou o coeficiente de heterogeneidade  $\text{HK}_{75}/\text{HK}_{25}$  (Tabela 3 e Figura 47).

Tabela 3 - Resultados de dureza Knoop (kgf/mm<sup>2</sup>) das amostras controladas e aleatórias

Amostra	HK25	HK50	HK75	HKMédia	HK75/HK25
B2	436,07	520,57	632,65	542,28	1,45
B9	495,27	604,91	755,43	644,82	1,53
B17	330,27	498,16	628,10	499,50	1,90
B24	322,29	449,79	615,58	464,59	1,91
I5	576,08	652,44	820,28	698,65	1,42
I13	465,29	544,92	644,14	561,81	1,38
I21	442,60	549,24	646,91	541,66	1,46
P2	560,18	553,55	649,69	665,89	1,16
P9	484,37	555,75	652,47	580,12	1,35
P17	470,38	557,95	655,24	581,92	1,39
P24	497,13	559,05	666,32	595,10	1,34
1	401,58	560,16	677,40	492,83	1,69
9	387,70	561,28	688,48	526,25	1,78
17	306,79	562,39	699,55	505,08	2,28
25	357,36	577,51	718,86	474,79	2,01
33	500,88	592,63	738,16	546,04	1,47
49	408,86	592,63	757,46	491,13	1,85
57	518,22	592,63	776,76	491,13	1,50
65	498,99	601,28	783,27	617,17	1,57
73	467,86	609,93	789,78	554,55	1,69
81	330,65	627,03	796,29	501,81	2,41
89	323,56	644,14	802,81	461,55	2,48
<b>Acumulado Amostras</b>	422,61	548,13	663,76	551	1,57

Figura 42 - Gráfico dos resultados de dureza Knoop. É possível visualizar a dureza as amostras controladas e aleatórias nos *quartis* HK<sub>25</sub>, HK<sub>50</sub> e HK<sub>75</sub>

Destacam-se entre os resultados a baixa dureza, representada pelo *quartil* HK<sub>25</sub>, das amostras B24, 17 e 89 e o alto coeficiente de heterogeneidade das amostras 81 e 89. A dureza Knoop expressa no *quartil* HK<sub>75</sub> está relacionada com os minerais mais duros o que interfere, principalmente, na abrasividade da rocha e no desgaste das ferramentas de corte. Os minerais de baixa dureza, representados pelo *quartil* HK<sub>25</sub>, são passíveis de desgaste abrasivo enquanto os minerais mais duros são removidos por escarificação.

#### 4.2 - Difratomia de Raios X no Riodacito

As amostras controladas e as amostras aleatórias foram analisadas com o auxílio do *software* X'Pert High Score versão 2.0a e parâmetro de identificação de minerais tendo apresentado dados muito similares, com espectro mostrando pouca ou nenhuma variação nos picos difratados.

Foi possível constatar que o basalto da serra gaúcha, das amostras selecionadas, é bastante homogêneo, nas 22 amostras, quanto suas fases cristalinas tendo como principais elementos difratados o dióxido de silício (quartzo), o que corrobora com a elevada dureza apresentada através do ensaio Knoop, e a labradorita (mineral silicato cálcico-sódico do grupo dos plagioclásios), como podem ser visualizados, por exemplo, nas análises das amostras B5 e 9 (Figura 43 e Figura 44). Também foram difratados, em menores índices a sanidina, enstatita e anortita.

Figura 43 - Difratograma da amostra controlada B2 .

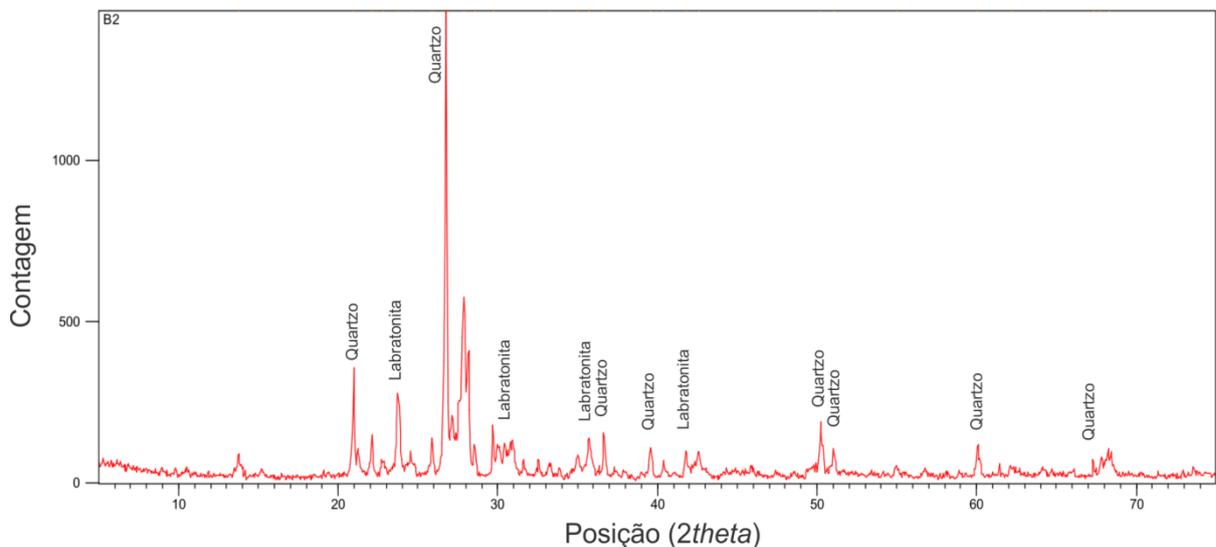
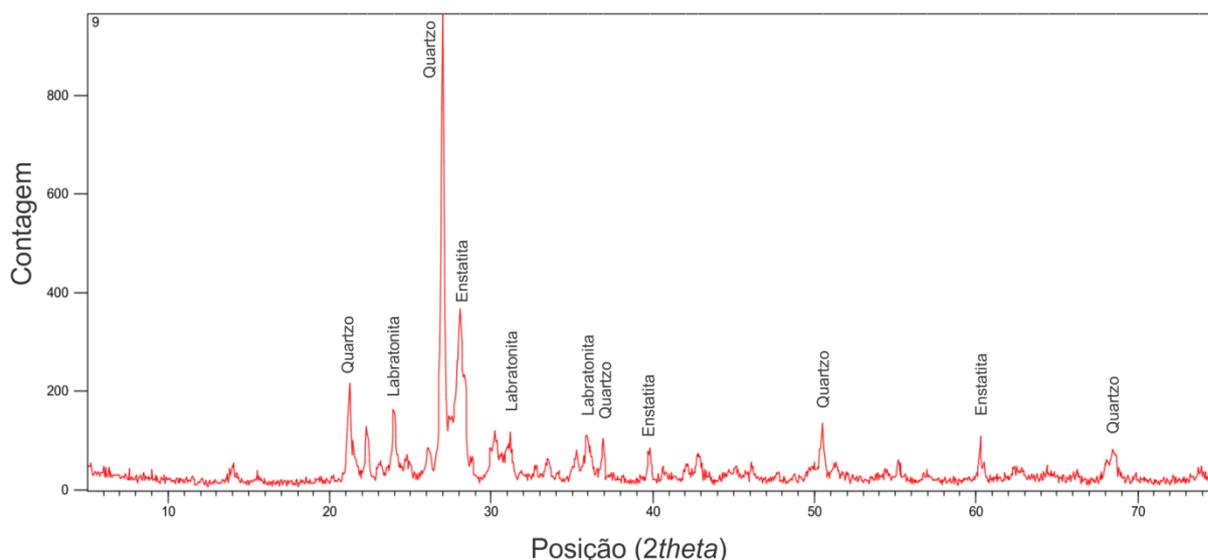


Figura 44 - Difratoograma da amostra aleatória 9.



### 4.3 - Fluorescência de Raios X

Para a análise por fluorescência de raios X, técnica para a identificação e concentração de elementos químicos, foi utilizado o espectômetro seqüencial de fluorescência de raios X, marca Shimadzu, modelo XRF-1800.

Através desta análise é possível afirmar que as amostras do basalto da serra gaúcha utilizadas no experimento possuem alta concentração de  $\text{SiO}_2$ , variando entre 70,3% e 56,95% e baixa concentração de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , variando entre 4,72% e 6,28%. Também é possível verificar que a concentração de óxidos de metais alcalinos ( $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{Na}_2\text{O}$ ) variam entre 8,56% e 6,12%. As concentrações de sílica detectadas em algumas amostras, através da fluorescência de raios X, estão acima daquelas indicadas (até 60%) no diagrama QAPF. No entanto o CPRM – Serviço Geológico do Brasil – classifica como ácidas as rochas ígneas com mais de 66% de sílica. São exemplos deste tipo de rocha o riódacito e o granito. No quadro a seguir (Figura 45) podem ser visualizados os resultados da análise por fluorescência de raios X das amostras B2 e 9 (maior concentração de sílica e menor concentração de ferro, respectivamente). A composição química média das amostras, obtida através da análise por fluorescência de raios X nas amostras no basalto da serra gaúcha, podem ser visualizados na Tabela 4.

As elevadas concentrações de sílica existentes nas amostras analisadas podem ocorrer pela existência de calcedônias (ágata); ou pela existência de sílica na fase vítrea; ou pela

existência de quartzo. Quaisquer das hipóteses somente podem ser confirmadas através da análise petrográfica.

Figura 45 - Resultado da análise elementar quali-quantitativa realizada por fluorescência de raios X das amostras B2 (controlada) e 9 (aleatória). Análise realizada nos Laboratórios do PPG3M/UFRGS em espectrômetro seqüencial de fluorescência de raios X marca Shimadzu modelo XRF-1800.

Amostra: B2  
Operator:  
Comment : 20 deg/min , for Oxide  
Group : [Qual-Quant.]Std-Oxide  
Date : 2011-10-04 17:31  
[Quantitative Result]

Analyte	Result	Proc-Calc	Line	Net Int.	BG Int.
SiO <sub>2</sub>	70,2989%	Quant.-FP	SiKa	1053,487	3,746
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,4621%	Quant.-FP	AlKa	233,364	12,542
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,9761%	Quant.-FP	FeKa	370,183	1,63
K <sub>2</sub> O	4,0818%	Quant.-FP	KKa	212,419	1,76
CaO	3,6701%	Quant.-FP	CaKa	137,131	1,46
TiO <sub>2</sub>	0,8049%	Quant.-FP	TiKa	9,185	0,254
Na <sub>2</sub> O	0,7922%	Quant.-FP	NaKa	2,276	0,086
MgO	0,4968%	Quant.-FP	MgKa	2,598	0,327
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,3514%	Quant.-FP	PKa	6,976	0,791
MnO	0,1004%	Quant.-FP	MnKa	4,961	0,894
BaO	0,0734%	Quant.-FP	BaLa	0,373	0,242
ZrO <sub>2</sub>	0,0445%	Quant.-FP	ZrKa	14,931	15,051
SO <sub>3</sub>	0,0408%	Quant.-FP	SKa	0,653	0,551
ZnO	0,0277%	Quant.-FP	ZnKa	3,508	2,188
SrO	0,0223%	Quant.-FP	SrKa	7,351	11,508
Rb <sub>2</sub> O	0,0214%	Quant.-FP	RbKa	6,885	9,739
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0157%	Quant.-FP	CrKa	0,504	0,615
CuO	0,0093%	Quant.-FP	CuKa	0,991	1,726
CO <sub>2</sub>	1,7100%	Fix			

Amostra: 9  
Operator:  
Comment : 20 deg/min , for Oxide  
Group : [Qual-Quant.]Std-Oxide  
Date : 2011-10-05 10:04  
[Quantitative Result]

Analyte	Result	Proc-Calc	Line	Net Int.	BG Int.
SiO <sub>2</sub>	56,9547%	Quant.-FP	SiKa	876,247	3,173
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,4404%	Quant.-FP	AlKa	189,866	10,016
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,8432%	Quant.-FP	FeKa	351,721	1,422
K <sub>2</sub> O	2,8354%	Quant.-FP	KKa	164,595	1,442
CaO	2,7027%	Quant.-FP	CaKa	115,325	1,254
Na <sub>2</sub> O	0,6917%	Quant.-FP	NaKa	1,914	0,072
TiO <sub>2</sub>	0,6217%	Quant.-FP	TiKa	8,22	0,217
MgO	0,3888%	Quant.-FP	MgKa	1,981	0,277
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,2415%	Quant.-FP	PKa	5,291	0,625
MnO	0,0730%	Quant.-FP	MnKa	4,224	0,843
SO <sub>3</sub>	0,0315%	Quant.-FP	SKa	0,557	0,461
ZrO <sub>2</sub>	0,0312%	Quant.-FP	ZrKa	12,421	12,669
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0183%	Quant.-FP	CrKa	0,682	0,547
ZnO	0,0182%	Quant.-FP	ZnKa	2,719	1,945
SrO	0,0148%	Quant.-FP	SrKa	5,79	9,611
Rb <sub>2</sub> O	0,0138%	Quant.-FP	RbKa	5,263	8,327
CuO	0,0089%	Quant.-FP	CuKa	1,118	1,412
CO <sub>2</sub>	21,0700%	Fix			

Tabela 4 - Resultado da análise elementar quali-quantitativa, parcial e média total, dos óxidos presentes nas amostras de riódacito aleatórias (1, 9 e 17) e controladas (B2, B17, I5, I13, I21, P9, P17 e P24). Análise realizada nos Laboratórios do PPGE3M/UFRGS em espectrômetro sequencial de fluorescência de raios X marca Shimadzu modelo XRF-1800.

Elemento	Composição Amostra (%)													Média
	1	9	17	B2	B17	I5	I13	I21	P9	P17	P24			
SiO <sub>2</sub>	67,5711	56,9547	70,6263	70,2989	63,5817	70,1919	61,2407	65,7173	69,9721	62,9355	69,189	66,2072		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,9825	9,4404	11,4018	11,4621	10,6347	11,4697	10,1362	10,8429	11,3709	10,4721	11,3683	10,8711		
CO <sub>2</sub>	5,8	21,07	1,21	1,71	11,26	1,67	15,63	9,22	2,85	11,76	3,45	7,7845		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,653	4,8432	6,1825	5,9761	5,1404	6,2895	4,7263	4,9042	5,5819	5,9311	5,8716	5,5545		
K <sub>2</sub> O	3,7629	2,8354	3,9959	4,0818	3,6419	4,0281	3,24	3,6225	3,9866	3,4573	3,9722	3,6931		
CaO	3,5715	2,7027	3,7766	3,6701	3,2338	3,5984	2,7892	3,2086	3,5421	3,0652	3,4902	3,3317		
TiO <sub>2</sub>	0,8078	0,6217	0,8733	0,8049	0,7346	0,8342	0,646	0,727	0,7959	0,7341	0,8155	0,7632		
Na <sub>2</sub> O	0,7728	0,6917	0,8198	0,7922	0,7419	0,7679	0,6897	0,7449	0,7606	0,6856	0,7893	0,7506		
MgO	0,415	0,3888	0,4359	0,4968	0,4406	0,4799	0,4267	0,44	0,476	0,445	0,4602	0,4459		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,3449	0,2415	0,3606	0,3514	0,313	0,3316	0,2759	0,3161	0,3444	0,2818	0,3239	0,3168		
MnO	0,0954	0,073	0,1014	0,1004	0,086	0,1015	0,0746	0,0806	0,0961	0,0886	0,0934	0,0901		
BaO	0,0658	0	0,076	0,0734	0,0536	0,068	0	0,0666	0,0597	0	0	0,0421		
ZrO <sub>2</sub>	0,0381	0,0312	0,0576	0,0445	0,0354	0,0406	0,0307	0,0341	0,0417	0,0268	0,0398	0,0382		
SO <sub>3</sub>	0,0358	0,0315	0	0,0408	0,0279	0,0367	0,0247	0	0,0279	0,0417	0,0286	0,0269		
ZnO	0,0179	0,0182	0,0225	0,0277	0,0178	0,0229	0,0153	0,0171	0,026	0,0167	0,0433	0,0223		
SrO	0,0214	0,0148	0,0244	0,0223	0,0181	0,0219	0,0164	0,0192	0,0216	0,0147	0,0198	0,0195		
Rb <sub>2</sub> O	0,0197	0,0138	0,0234	0,0214	0,0176	0,0206	0,0158	0,0174	0,0207	0,0137	0,0198	0,0185		
CrO <sub>3</sub>	0,0137	0,0183	0	0,0157	0,0135	0,019	0,0144	0,0138	0,0162	0,021	0,0169	0,0148		
CuO	0,0106	0,0089	0,0121	0,0093	0,0073	0,0078	0,0073	0,0078	0,0097	0,0085	0,0081	0,0089		
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0006	0	< 0,000005		

#### 4.4 - Análise Petrográfica e EDX

A análise petrográfica das amostras B17, I5, P17 e 25 permitiu sua classificação como vulcânica, de cor cinza e homogênea. Através da microscopia é possível identificar o arranjo textural microporfirítico com microfenocristais (0,6 a 1,5 mm) e micrólitos (0,05 a 0,2 mm) e matriz constituída por agregado complexo quartzo-feldspático e vidro vulcânico com desvitrificação esferolítica e sub micrográfica. O plagioclásio (pl), o clinopiroxênio (cpx) e os minerais metálicos constituem os microfenocristais. Já os micrólitos apresentam composição semelhantes aos microfenocristais acrescidos de apatita e hornblenda. O óxido de ferro e os argilominerais compõe porção diminuta sendo incipiente na alteração da rocha. Fotomicrografias, realizadas em lâminas delgadas das amostras, indicam seus constituintes (Figura 46). Amplamente dominante em volume a matriz de composição quartzo-feldspática envolve totalmente as demais fases cristalinas intercalando partes sub-vítreas e com desvitrificação parcial, gerando arranjos esferolítico. Já os argilominerais são dominantes como fase de alteração derivando do piroxênio com aspecto ferruginoso.

Figura 46 – Fotomicrografias do riadacito. Em (A) fotomicrografia em luz polarizada (LP), com destaque para microfenocristal de clinopiroxênio subédrico microfraturado (acastanhado) e plagioclásios límpidos em matriz vítrea e textura esferulítica; Em (B) fotomicrografia em luz polarizada (LP) com destaque para micrólitos de clinopiroxênio subédrico microfraturado (acastanhado), plagioclásios límpidos em matriz vítrea e textura esferulítica e mineral metálico (amarelado) na lateral direita da imagem.

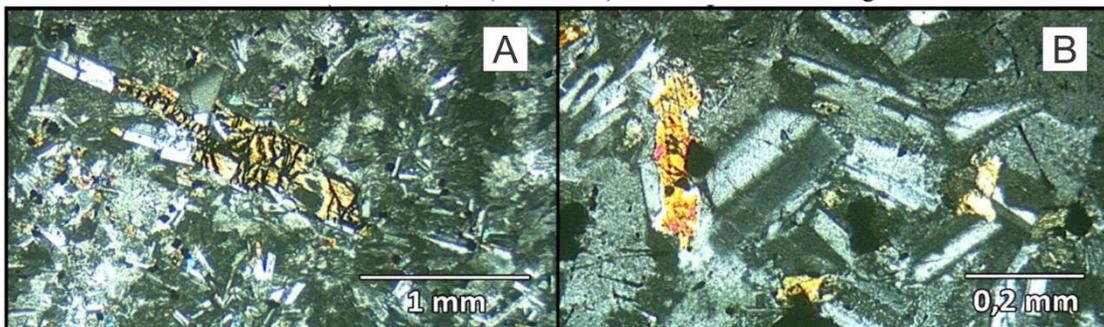
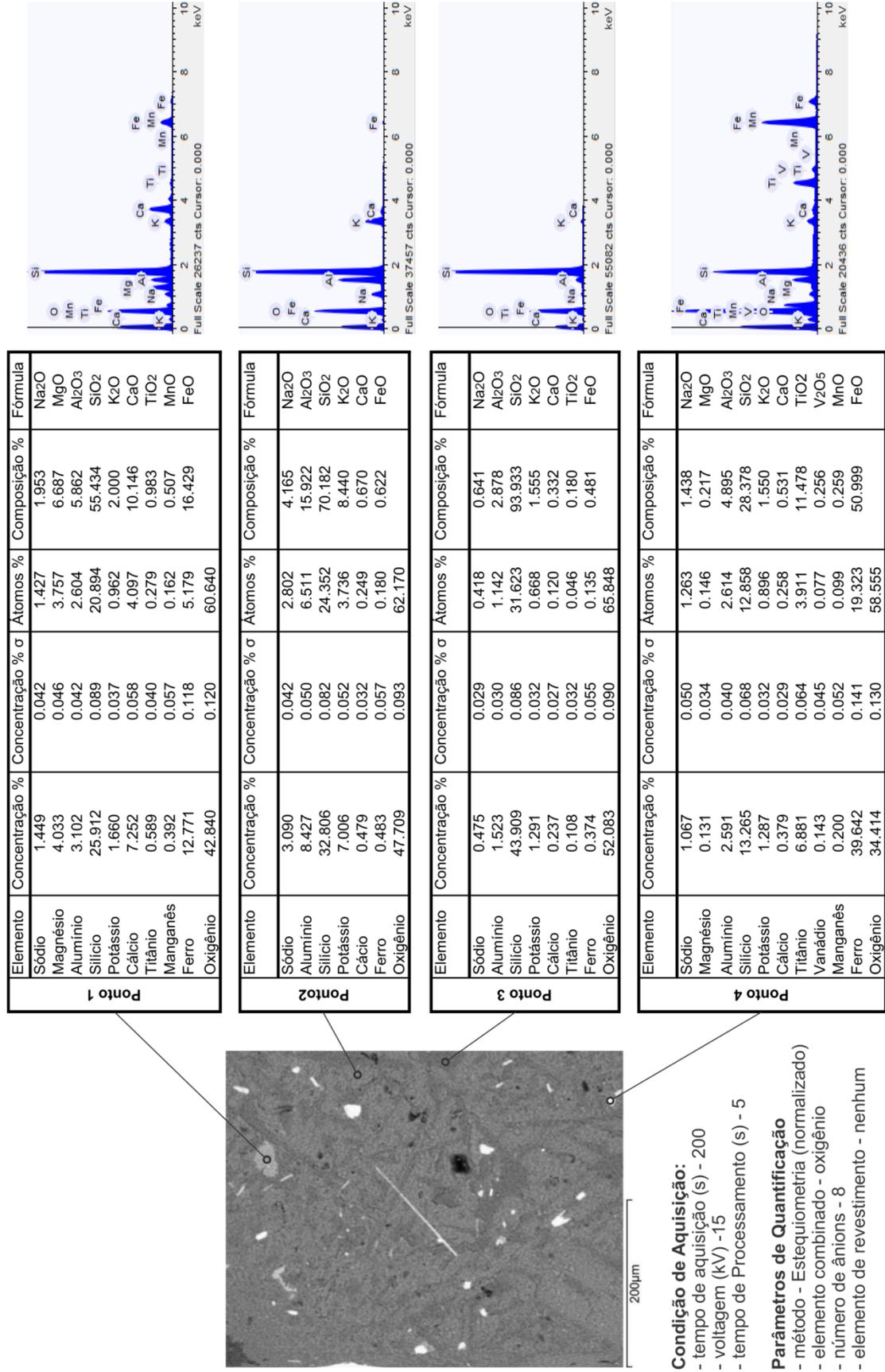


Imagem de Gustavo Greve

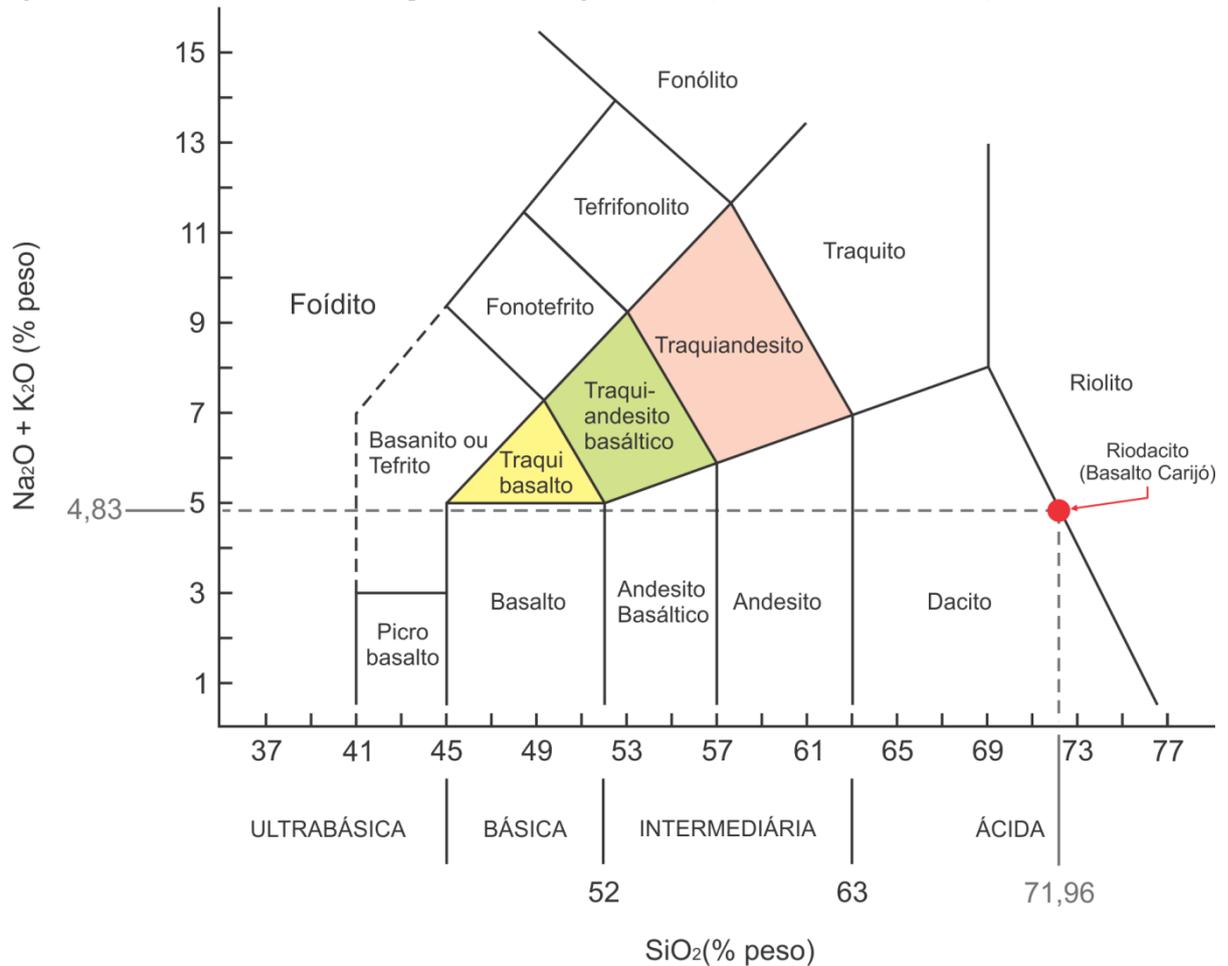
As lâminas das amostras foram submetidas a análise em espectrômetro de dispersão de energia (EDS). Em todos os pontos verificados nas amostras é possível identificar uma alta concentração de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), em média 62%. A sílica presente está dispersa na fase vítrea (amorfa) da amostra que durante o processo de resfriamento pode cristalizar formando o quartzo. Também é possível verificar a presença de óxido de ferro ( $\text{FeO}$ ) em concentrações que variam entre 0,481% e 50,999%, dependendo do ponto analisado. Na imagem a seguir (Figura 47) é possível a visualização dos espectros obtidos nas análises EDS em diferentes regiões da amostra, bem como as tabelas de concentração dos óxidos presentes.

Figura 47 - Análise petrográfica do Riódacito realizada em microscópio eletrônico de varredura + EDS em diferentes regiões da amostra. Nas tabelas e diagramas é possível visualizar a concentração dos elementos presentes em cada região analisada.



Considerando as análises por difratometria de raios X, fluorescência de raios X, Petrografia e EDS além da pesquisa bibliográfica é possível afirmar, baseado na classificação TAS (Figura 48), que as amostras do basalto da serra gaúcha adquiridos em pedreiras da Região do Basalto são, cientificamente, denominados riodacitos embora comercializados como “Basalto Carijó” ou simplesmente basalto.

Figura 48 - Classificação do riodacito por meio do diagrama TAS (Total-Alcali versus Sílica)



Valores obtidos através da análise por Fluorescência de raios X

Elemento	1	9	17	B2	B17	I5	I13	I21	P9	P17	P24	Média
SiO <sub>2</sub>	67,5711	56,9547	70,6263	70,2989	63,5817	70,1919	61,2407	65,7173	69,9721	62,9355	69,189	<b>66,2072</b>
92% para 100%	73,44685	61,90728	76,76772	76,41185	69,11054	76,29554	66,56598	71,43185	76,05663	68,40815	75,20543	<b>71,9643</b>
K <sub>2</sub> O	3,7629	2,8354	3,9959	4,0818	3,6419	4,0281	3,24	3,6225	3,9866	3,4573	3,9722	<b>3,6931</b>
92% para 100%	4,090109	3,081957	4,34337	4,436739	3,958587	4,37837	3,521739	3,9375	4,333261	3,757935	4,317609	<b>4,0143</b>
Na <sub>2</sub> O	0,7728	0,6917	0,8198	0,7922	0,7419	0,7679	0,6897	0,7449	0,7606	0,6856	0,7893	<b>0,7506</b>
92% para 100%	0,84	0,751848	0,891087	0,861087	0,806413	0,834674	0,749674	0,809674	0,826739	0,745217	0,857935	<b>0,8158</b>

Valores considerados para elaboração do diagrama TAS conforme LE MAITRE, 2002

SiO <sub>2</sub>	<b>71,9643</b>
K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O	<b>4,8301</b>

Adaptado em 17/08/2012 de LE MAITRE, 2002

#### 4.5 - Ensaios de Fresamento CNC no Riodacito

O basalto da Serra Gaúcha, classificado cientificamente, através das análises experimentais descritas nos capítulos anteriores, como riodacito apresenta, conforme revisado, grandes potencialidades para agregação de valor. Uma das potencialidades é a utilização de fresamento CNC em seu beneficiamento. Este tipo de processamento possibilita, em outros materiais, a produção de formas, das mais simples às mais complexas e, no caso do riodacito a possibilidade de texturização e gravações especiais em sua superfície. Os testes experimentais de fresamento CNC no riodacito ocorreram entre os meses de fevereiro e novembro de 2011 no Centro Tecnológico de Gemas e Joias da Univates.

Como demonstrado em outros testes, não houve necessidade de classificação das amostras antes dos testes de usinagem, visto sua homogeneidade. Para os testes de usinagem em riodacito foram considerados, como referências iniciais, os parâmetros de usinagem utilizados no aço, por este possuir dureza 179 HV (Dureza Vickers) e ter seus parâmetros já conhecidos. Entretanto, por serem utilizadas ferramentas diamantadas, policristalina com matriz de níquel, a rotação do *spindle* foi mantida em 23000 RPM.

Também, para minimização das possíveis variáveis foram adquiridas 100 ferramentas da marca KG Sorensen modelo 3018 dos lotes 2266 e 5359. As ferramentas foram classificadas conforme o seu diâmetro, aferido com micrômetro milesimal digital da marca Mitutoyo. O diâmetro das ferramentas variaram entre 2,766 e 3,005 mm, mantendo a média de 2,911 mm e desvio padrão de 0,04 mm. Considerando, estatisticamente, 95% de acerto foram descartadas as ferramentas com diâmetro menor que 2,81 mm. As ferramentas também foram aferidas quanto sua massa em balança de precisão, variando entre 0,3193 g e 0,3372 g, tendo em média 0,3219 g. A aferição da massa e comprimento da ferramenta foram utilizadas para determinar seu desgaste em relação ao parâmetro de usinagem utilizado.

Nos testes de usinagem em riodacito, assim como nos testes de usinagem em aço e gesso, foram utilizadas as mesmas geometrias: plana e lisa (padrão 1), plano inclinado (padrão 2), perfil côncavo (padrão 3), perfil quadrático (padrão 4), perfil ondulado (padrão 5) e perfil livre (padrão 6). Todos os padrões foram desenvolvidos no *software* SolidWorks® versão 10 e as estratégias de usinagem definidas a partir do *software* ArtCAM® 8.

#### 4.6 - Testes de Fresamento em Riodacito

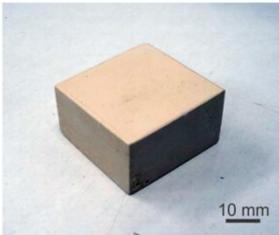
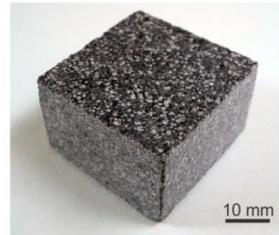
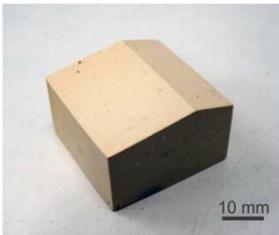
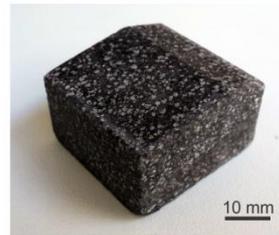
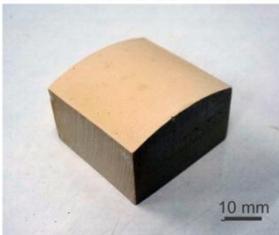
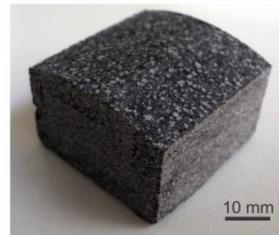
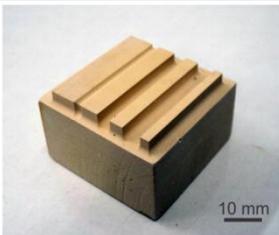
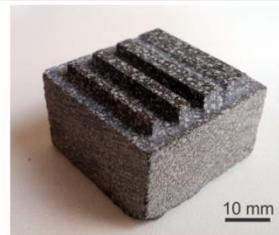
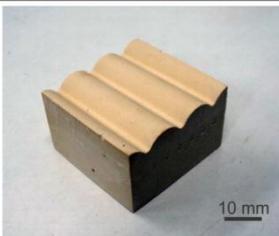
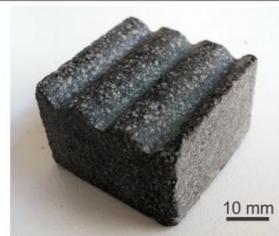
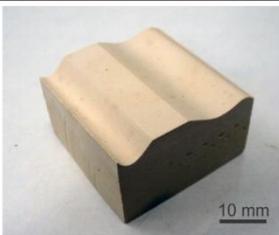
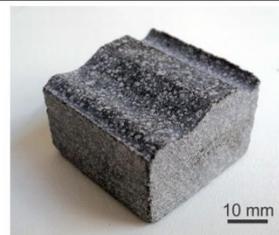
Após terem sido concluídos os experimentos iniciais para verificação do aspecto visual esperado - acabamento em gesso pedra - e tempos de usinagem a serem alcançados - padrões usinados em aço - deu-se início aos testes de usinagem HSM no riodacito. Anteriormente ao início dos testes todas as amostras de riodacito foram calibradas quanto a sua planicidade e um suporte de fixação, nivelado com auxílio de relógio comparador, foi adaptado a fresadora para permitir a rápida troca da amostra. Também foram utilizadas duas pinças porta macho ISO 15488-A com possibilidade de fixação de ferramentas com haste entre 1 e 2 mm de diâmetro (Figura 49). Tais procedimentos visaram à otimização dos tempos de *setup*.

Figura 49 - A) Aferição do nível do bloco de riodacito com auxílio de um relógio comparador; B) Conjunto de dispositivos utilizados nos testes de usinagem. A cada teste a ferramenta é substituída.



Todos os testes (Figura 50) foram realizados com refrigeração forçada, por névoa, com óleo solúvel em água (Unix Solúvel 100 para usinagem leve) diluído na proporção de 1/19, conforme recomendação do fabricante. Os testes dos padrões 1, 2, 3, 5 e 6 foram realizados com uma ferramenta cada e não foi detectada perda de massa. Já para o padrão 4 foram necessárias quatro ferramentas utilizadas em testes distintos onde houve redução gradativa de velocidade de avanço até 6,38 mm/s, 25% inferior ao padrão utilizado nos testes em aço e nos demais testes em riodacito não sendo concluído nenhum dos procedimentos. Com o insucesso do processo de usinagem no padrão 4, devido ao desgaste excessivo da extremidade inferior das ferramentas utilizadas, provado pelo grande número de inserções verticais na amostra, como alternativa, foi alterada a estratégia de usinagem *raster*, originalmente no eixo X para o eixo Y. Esta alteração no sentido da usinagem reduziu os deslocamentos descendentes em Z da ferramenta de 486 para 126, diminuindo significativamente o impacto na amostra. Estimou-se, calculando através de *software*, que o tempo de usinagem utilizando esta nova estratégia, mantendo-se os parâmetros utilizados no aço, seria de 57 min e 53 s, reduzindo, portanto, o tempo de usinagem em 9 min e 58 s.

Figura 50 - Comparativo de acabamento entre os padrões geométricos estabelecidos usinados em gesso e riodacito.

Descrição	Modelo em Gesso	Modelo em Riodacito
<p><b>Padrão 1 - geometria lisa e plana</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- estratégia - raster</li> <li>- profundidade final - 3 mm</li> <li>- passo lateral - 0,2 mm</li> <li>- passo vertical - 0,5 mm</li> <li>- velocidade de avanço - 12 mm/seg.</li> <li>- velocidade de mergulho - 4 mm/s</li> <li>- velocidade de rotação - 23000 RPM</li> <li>- tempo de usinagem - 49 min 37 s.</li> <li>- material removido - 2700 mm<sup>3</sup></li> </ul>		
<p><b>Padrão 2 - perfil inclinado</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- estratégia - raster</li> <li>- profundidade final - 3 mm</li> <li>- passo lateral - 0,2 mm</li> <li>- passo vertical - 0,5 mm</li> <li>- velocidade de avanço - 8,5 mm/s</li> <li>- velocidade de mergulho - 4 mm/s</li> <li>- velocidade de rotação - 23000 RPM</li> <li>- tempo de usinagem - 55 min 17 s.</li> <li>- material removido - 1350 mm<sup>3</sup></li> </ul>		
<p><b>Padrão 3 - perfil côncavo</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- estratégia - raster</li> <li>- profundidade final - 3 mm</li> <li>- passo lateral - 0,2 mm</li> <li>- passo vertical - 0,5 mm</li> <li>- velocidade de avanço - 8,5 mm/s</li> <li>- velocidade de mergulho - 4 mm/s</li> <li>- velocidade de rotação - 23000 RPM</li> <li>- tempo de usinagem - 55 min 08 s</li> <li>- material removido - 885,67 mm<sup>3</sup></li> </ul>		
<p><b>Padrão 4 - perfil quadrático com paredes verticais e cantos bem definidos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- estratégia - raster</li> <li>- profundidade final - 3 mm</li> <li>- passo lateral - 0,2 mm</li> <li>- passo vertical - 0,5 mm</li> <li>- velocidade de avanço - 6,4 mm/s</li> <li>- velocidade de mergulho - 1,5 mm/s</li> <li>- velocidade de rotação - 23000 RPM</li> <li>- tempo de usinagem - 1 H 16 min. 51 s</li> <li>- material removido - 1575 mm<sup>3</sup></li> </ul>		
<p><b>Padrão 5 - perfil ondulado</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- estratégia - raster</li> <li>- profundidade final - 3 mm</li> <li>- passo lateral - 0,2 mm</li> <li>- passo vertical - 0,5 mm</li> <li>- velocidade de avanço - 8,5 mm/s</li> <li>- velocidade de mergulho - 4 mm/s</li> <li>- velocidade de rotação - 23000 RPM</li> <li>- tempo de usinagem - 59 min 58 s</li> <li>- material removido - 879,68 mm<sup>3</sup></li> </ul>		
<p><b>Padrão 6 - perfil livre representando as variações de uma geometria complexa</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- estratégia - raster</li> <li>- profundidade final - 3 mm</li> <li>- passo lateral - 0,2 mm</li> <li>- passo vertical - 0,5 mm</li> <li>- velocidade de avanço - 8,5 mm/s.</li> <li>- velocidade de mergulho - 4 mm/s.</li> <li>- velocidade de rotação - 23000 RPM</li> <li>- tempo de usinagem - 1 H 38 min 34 s</li> <li>- material removido - 1444,96 mm<sup>3</sup></li> </ul>		

Mesmo havendo alteração da estratégia de usinagem não foi possível o término do teste, sendo necessária ainda a redução da velocidade de avanço para 6,38 mm/s, aumentando, conseqüentemente, o tempo de usinagem para 1 hora, 16 min e 50 s. Mesmo com as alterações na estratégia e parâmetros de usinagem houve visível desgaste da ferramenta e perda de

massa, de 0,3250 g para 0,3224 g, sugerindo que a velocidade de deslocamento em Z ainda não fora a mais adequada.

Novos ensaios foram realizados excluindo as variáveis de deslocamento em X e Y com a finalidade de determinar a velocidade de avanço em Z para menor desgaste da ferramenta. Nos deslocamentos em Z, conforme programado, a ferramenta penetrava no material 0,5 mm, mesma profundidade utilizada nos demais testes, mantendo um recuo de 0,3 mm para lubrificação, refrigeração e retirada do material usinado. A velocidade de avanço inicial dos testes foi de 6,38 mm/s, sendo reduzida, gradativamente na proporção de 50% até 1,59 mm/s.

Foram realizados 2 testes (ferramentas 22 e 93) com a velocidade inicial, sem sucesso, havendo no primeiro, a quebra da ferramenta e, no segundo, fusão da matriz de níquel (Figura 51). A velocidade foi reduzida para 3,19 mm/s, sendo realizado com esta velocidade 4 testes (ferramentas 26, 30, 34 e 90) e em todos houve desgaste excessivo da ferramenta em diferentes intensidades, variando de 0,421 mm à 1,973 mm. Com os resultados não favoráveis houve nova redução da velocidade de avanço, para 1,59 mm/s. Foram realizados 2 testes (ferramentas 86 e 57) com esta velocidade e novamente o resultado não foi satisfatório havendo desgaste excessivo da ferramenta, a primeira com 2,181 mm e a segunda com 1,114 mm. Mesmo que houvesse sucesso com esta última velocidade de avanço, esta seria inviável já que o tempo de usinagem do padrão 4 seria, calculado em *software*, de 5 horas e 9 minutos, sendo prevista uma retirada de 1546 mm<sup>3</sup> de material. Para uma melhor visualização é apresentado na Figura 52 resultados e imagens das ferramentas utilizadas.

Novos ensaios foram realizados, desta vez isolando o deslocamento em X (ou Y) para verificação da velocidade de avanço *versus* desgaste da ferramenta. Nestes testes, para que não houvesse possível influência da textura a ser usinada (deslocamento em Z) foi escolhido o padrão 1, superfície plana, para execução. Os testes foram iniciados com velocidade de avanço de 8,5 mm/s sendo gradativamente aumentada, na razão de 20%, até 17,62 mm/s. A velocidade de rotação do *spindle* foi mantida em 23000 RPM, velocidade de mergulho em 2 mm/s e segurança em Z de 0,5 mm.

Com a velocidade de avanço estabelecida em 8,5 mm/s, o desgaste médio das ferramentas, nos 5 testes executados, foi de 0,0602 mm; com a velocidade de avanço em 10,2 mm/s, o desgaste médio, nos 4 testes, foi de 0,0348 mm; já com a velocidade 12,24 mm/s, nos

4 testes, o desgaste médio foi de 0,0482 mm. Com a velocidade de avanço fixada em 14,688 mm/s o desgaste médio, nos 4 testes que se seguiram, foi de 0,036 e com o avanço de 17,62 mm/s o desgaste medido foi de 0,0357 mm. O menor desvio padrão apresentado nos testes foi de 0,015305 mm com a velocidade de 17,72 mm/s, seguido por 0,019097 mm, 0,025263 mm, 0,026796 mm e 0,092131 mm para as velocidades 12,24 mm/s, 10,2 mm/s, 14,688 mm/s e 8,5 mm/s respectivamente. Se mantida a velocidade de avanço em 17,72 mm/s para realização do padrão 4, desconsiderando o desgaste da ferramenta quando houvesse deslocamento em Z, o tempo de trabalho seria, calculado em *software*, de 27 min e 43 s. Os valores obtidos em cada teste pode ser melhor visualizado na Tabela 5.

Figura 51 - Imagem realizadas em MEV da extremidade cortante da ferramenta 22. As setas amarelas indicam a região com diamantes sintéticos fixados em uma matriz de níquel. As setas vermelhas indicam o excessivo desgaste da ferramenta durante o processo de fresamento. É possível visualizar regiões onde houve fusão da matriz (seta azul). As setas laranjas indicam locais onde os grãos de diamante foram «arrancados» por escarificação.

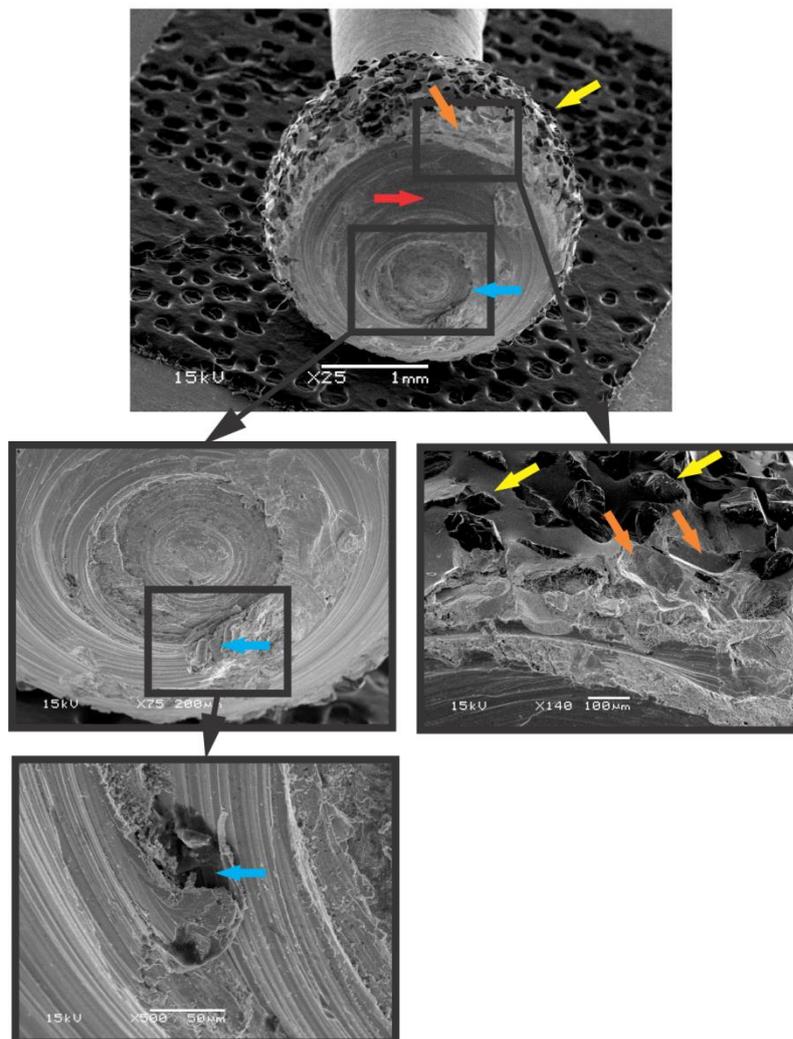
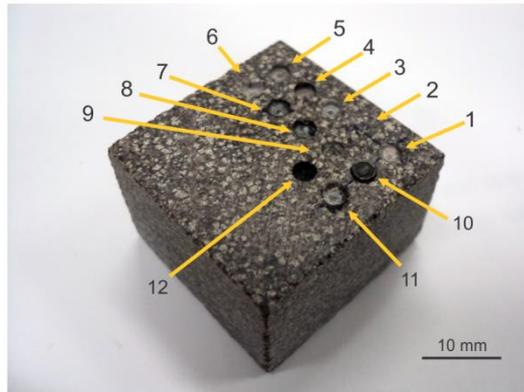


Figura 52 - Quadro comparativo dos ensaios de usinagem realizados para verificação da velocidade de deslocamento em Z otimizado para este tipo de trabalho. As setas indicam a ordem de execução dos testes. Os resultados podem ser visualizados e comparados na tabela a seguir.



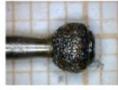
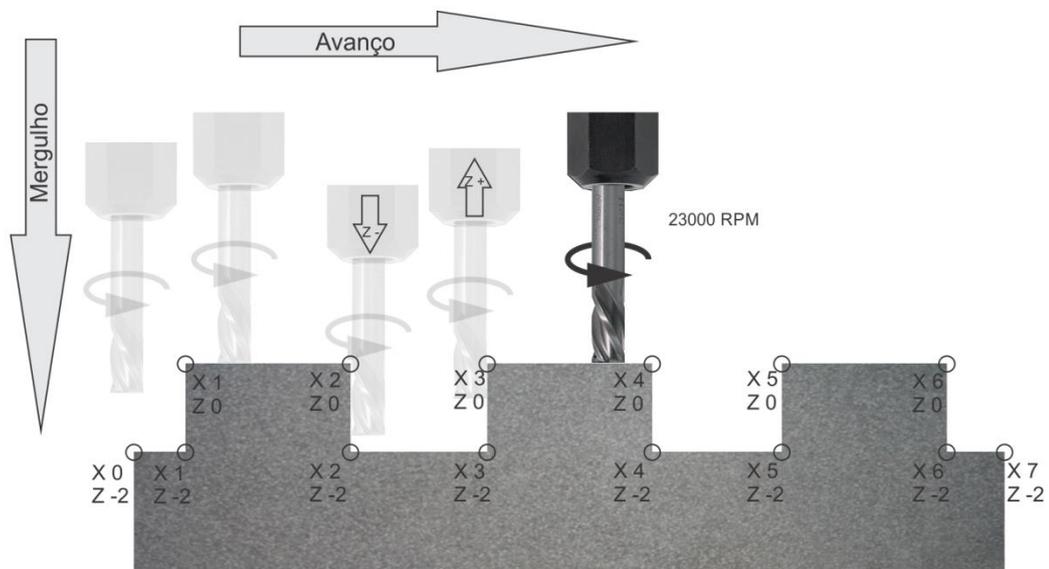
Teste número	Ferramenta	Lote	comprimento inicial	comprimento final	Comprimento Inicial - Comprimento Final	Velocidade Avanço (mm/seg)	Spindle (RPM)	Imagem Ferramenta
1	22	5359	19,027	X	X	6,38	23000	
2	93	5359	19,261	18,925	0,336	6,38	23000	
3	57	2266	19,331	18,441	0,89	3,19	23000	
4	28	5359	19,06	18,643	0,417	3,19	23000	
5	12	5359	19,564	19,377	0,187	3,19	23000	
6	26	5359	18,967	16,994	1,973	3,19	23000	
7	30	5359	19,077	17,499	1,578	3,19	23000	
8	34	2266	19,326	18,905	0,421	3,19	23000	
9	90	5359	19,078	15,735	3,343	3,19	23000	
10	56	2266	19,299	17,118	2,181	1,59	23000	
11	87	5359	19,076	17,962	1,114	1,59	23000	
12	29	5359	19,122	X	X	1,59	23000	

Tabela 5 - Quadro comparativo dos ensaios de usinagem realizados para verificação da velocidade de deslocamento em X ou Y otimizado para este tipo de trabalho.

Teste	Ferramenta	Lote	Diâmetro Inicial (mm)	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Comprimento Inicial (mm)	Comprimento Final (mm)	Desgaste (mm)	Avanço (mm/seg)	Tempo Usinagem	Média (Desgaste - mm)	Desvio Padrão (Desgaste)
1	84	5359	2,853	0,3295	0,3262	19,081	19,079	0,002	8,5			
2	81	5359	2,863	0,3273	0,3268	19,034	19,006	0,028	8,5	08:08	0,0602	0,092131428
3	53	2266	2,866	0,3296	0,3258	19,309	19,085	0,224	8,5			
4	74	2266	2,869	0,3336	0,3332	19,609	19,584	0,025	8,5			
5	99	2266	2,869	0,3193	0,3189	19,341	19,319	0,022	8,5			
6	36	2266	2,87	0,3353	0,3352	19,628	19,625	0,003	10			
7	16	2266	2,873	0,328	0,3274	19,331	19,296	0,035	10	06:57	0,0348	0,025262621
8	65	2266	2,873	0,3193	0,3189	19,302	19,276	0,026	10			
9	21	5359	2,874	0,3279	0,3266	19,118	19,045	0,073	10			
10	25	5359	2,874	0,3333	0,3327	19,096	19,059	0,037	12			
11	52	2266	2,874	0,3261	0,3252	19,421	19,369	0,052	12	05:50	0,0482	0,01909712
12	71	2266	2,874	0,3245	0,3236	19,295	19,244	0,051	12			
13	59	2266	2,876	0,3239	0,3235	19,364	19,339	0,025	12			
14	15	2266	2,881	0,3297	0,3284	19,355	19,279	0,076	14,5			
15	73	2266	2,882	0,3243	0,3239	19,3	19,276	0,024	14,5			
16	5	2266	2,883	0,3233	0,3230	19,223	19,204	0,019	14,5	04:47	0,036	0,026795522
17	60	2266	2,884	0,3266	0,3262	19,361	19,336	0,025	14,5			
18	86	5359	2,885	0,3308	X	19,094	X	X	17,4			
19	37	2266	2,886	0,3237	0,3228	19,386	19,331	0,055	17,4			
20	88	5359	2,886	0,325	0,3246	19,101	19,076	0,025	17,4	04:01	0,03575	0,015305228
21	33	2266	2,888	0,329	0,3283	19,347	19,306	0,041	17,4			
22	19	2266	2,889	0,3341	0,3337	19,59	19,568	0,022	17,4			

Considerando a necessidade de redução das velocidades de avanço em Z e possibilidade de aumento do avanço em X ou Y, para otimização dos tempos de processamento, e mínimo desgaste da ferramenta, uma nova proposta de velocidades de avanço foi considerada: o controle independente das velocidades em X, Y, e Z. No entanto o *software* ArtCAM® 8, utilizado na programação CNC dos padrões propostos, não permite tal controle e considera a velocidade de avanço em Z, durante o processamento, a mesma atribuída para X ou Y, exceto na primeira entrada na amostra/material, denominada “velocidade de mergulho” (Figura 53).

Figura 53 - Representação esquemática dos deslocamentos em um programa CNC. A Velocidade de Mergulho somente ocorre na primeira entrada da ferramenta no material. Após é atribuído a todos os deslocamentos a Velocidade de Avanço. É possível visualizar no «programa exemplo» os dados de cada etapa.



```

T1M6
G0Z5.000
G0X0.000Y0.000S23000M3 ← Velocidade de Rotação do Spindle
G0X-9.999Y-9.999Z5.000
G1Z-2.000F300.0 ← Velocidade de Mergulho em mm/min
G1X0F600.0 ← Velocidade de Avanço em mm/min
X0Z-2
X1Z-2
X1Z0
X2Z0
X2Z-2
X3Z-2
X3Z0
X4Z0
X4Z-2
X5Z-2
X5Z0
X6Z0
X6Z-2
X7Z-2
X-0.200Z-2.000
G0Z5.000
G0X0.000Y0.000
G0Z5.000
G0X0Y0
M30

```

Coordenadas de posicionamento da ferramenta

Outra possibilidade foi a reprogramação dos padrões de usinagem utilizando o *software* EdgeCAM® 2010, mais especializado que o ArtCAM® 8, indicado para programações complexas, pertencente ao Laboratório de Design e Seleção de Materiais. Assim como o ArtCAM® 8, este *software* não permite o controle independentes de velocidades, atribuindo para Z as mesmas velocidades de avanço determinadas para X ou Y. Dadas as dificuldades em ser identificado *software* para controle independente das velocidades, foi necessário o desenvolvimento um de pós-processador, com a finalidade de permitir os controles de velocidade fundamentais ao experimento.

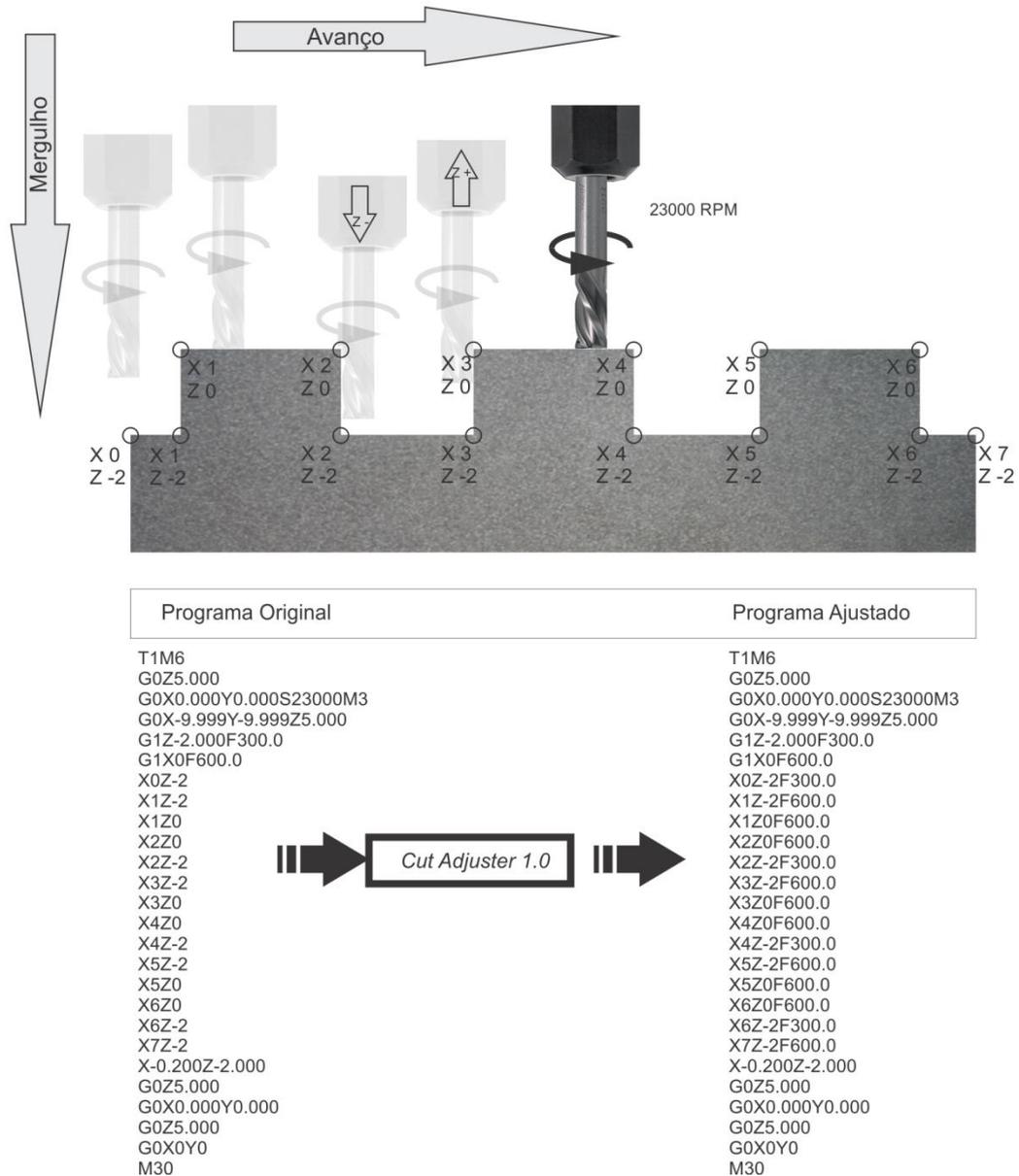
O pós-processador, para este fim, é responsável pela análise do programa CNC gerado por *softwares* CAM, neste caso com extensão .tap, atribuindo valores específicos para as velocidades de avanço nos eixos X ou Y, dependendo da estratégia estabelecida, e Z de forma individual permitindo desta maneira um controle preciso e otimização dos tempos de usinagem.

O pós-processador CNC *CutAdjuster*, desenvolvido em linguagem Java®, em sua versão 1.0, atribui para os deslocamentos em Z, quando descendente, a mesma velocidade utilizada no mergulho da ferramenta determinado através da programação CAM. Quando Z for ascendente é atribuída a velocidade de avanço de X ou Y.

Analisando o programa inicial linha a linha, o *software* verifica a existência da variável Z (eixo de deslocamento). Sendo identificado Z, o pós-processador avalia a coordenada da linha anterior do programa verificando o sentido de deslocamento em Z (ou positivo ou negativo) e acrescenta a velocidade de avanço especificada (F).

Apesar de apresentar avanços significativos no controle dos deslocamentos, o CNC *CutAdjuster*, em sua versão 1.0, não permite alteração desses valores, devendo a cada teste ser realizada nova programação nos *softwares* CAM. Este processo pode ser melhor visualizado a seguir (Figura 54). Em sua nova versão 1.1 e 1.2 já é possível a alteração dos valores da velocidade de mergulho e avanço sem a necessidade de nova intervenção através do *software*.

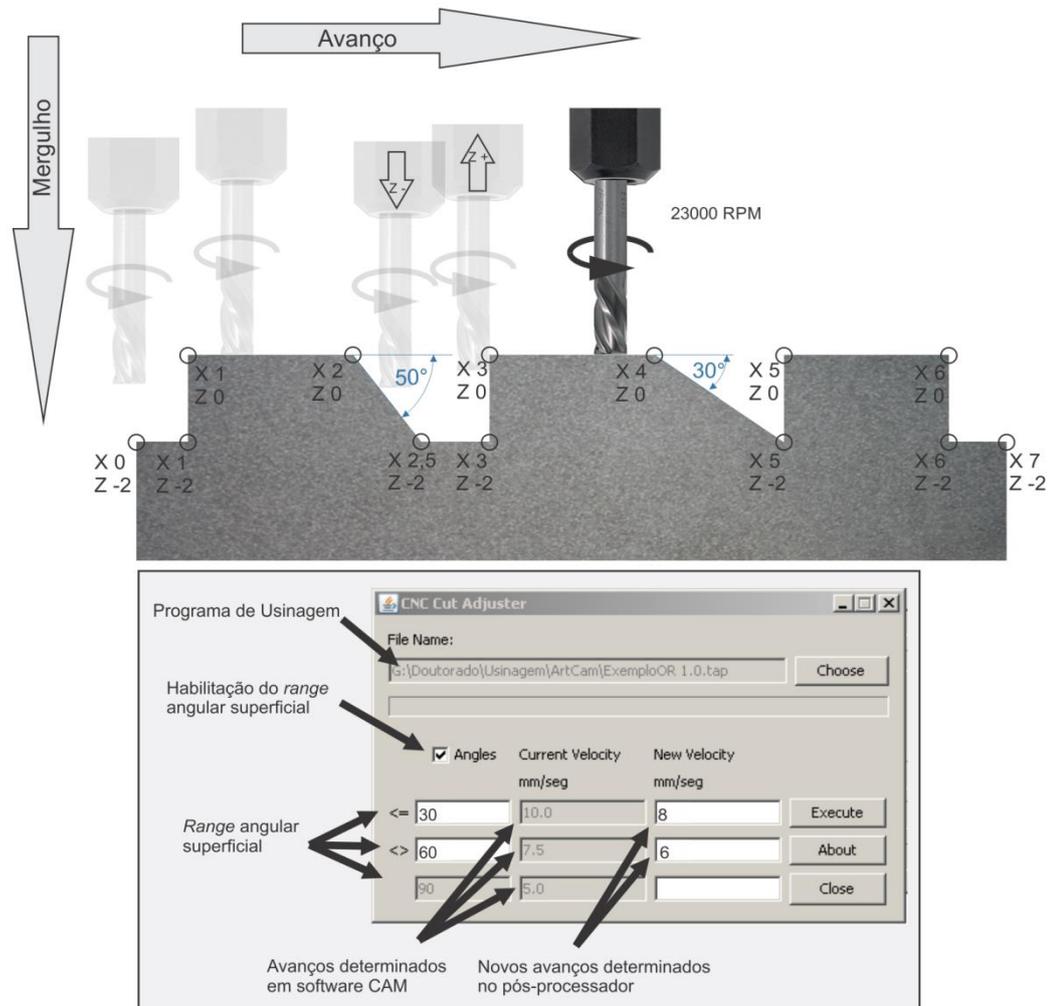
Figura 54 - Representação esquemática dos deslocamentos em um programa CNC utilizando o pós-processador *CutAdjuster*. Durante a programação é atribuído pelo operador os valores de deslocamento da ferramenta. O valor de avanço é o mesmo tanto para os deslocamentos em X (ou Y) quanto para os deslocamentos em Z. O pós-processador analisa o programa original atribuindo valores diferenciados, também definido pelo operador, para os deslocamentos descendentes em Z (Z -). Nesta versão os valores descendentes em Z são iguais ao atribuído a Velocidade de Mergulho. Para demais deslocamentos são atribuídos os valores da Velocidade de Avanço



A versão 1.3 além de ser possível a alteração das velocidades de avanço e mergulho, sem a necessidade de nova programação nos *softwares* CAM, também permite através de análise trigonométrica das coordenadas em X (ou Y) e Z do programa, o livre controle das velocidades de avanço, a critério do profissional, do deslocamento descendente em Z, considerando o ângulo da superfície a ser usinada. O *range* das angulações superficiais também pode ser determinado pelo operador do equipamento bem como as velocidades

específicas para cada intervalo. A interface da versão 1.3 pode ser visualizada na figura a seguir (Figura 55).

Figura 55 - Representação esquemática de funcionamento do pós-processador *CutAdjuster* versão 1.3. Nesta versão é possível o operador determinar diferentes velocidades de avanço para Z além dos *ranges* angulares de superfície onde estas serão aplicadas.



Programa Original	Programa Ajustado
T1M6	T1M6
G0Z5.000	G0Z5.000
G0X0.000Y0.000S23000M3	G0X0.000Y0.000S23000M3
G0X-9.999Y-9.999Z5.000	G0X-9.999Y-9.999Z5.000
G1Z-2.000F300.0	G1Z-2.000F300.0
G1X0F600.0	G1X0F600.0
X0Z-2F720.0	X0Z-2F720.0
X1Z-2	X1Z-2F720.0
X1Z0	X1Z0F720.0
X2Z0	X2Z0F720.0
X2,5Z-2	X2,5Z-2F360.0
X3Z-2	X3Z-2F720.0
X3Z0	X3Z0F720.0
X4Z0	X4Z0F720.0
X5Z-2	X5Z-2F480.0
X5Z0	X5Z0F720.0
X6Z0	X6Z0F720.0
X6Z-2	X6Z-2F300.0
X7Z-2	X7Z-2F720.0
X-0.200Z-2.000	X-0.200Z-2.000
G0Z5.000	G0Z5.000
G0X0.000Y0.000	G0X0.000Y0.000
G0Z5.000	G0Z5.000
G0X0Y0	G0X0Y0
M30	M30

#### 4.7 - Comparativo de Usinagem e Elaboração de Mapa de Tomada de Decisão

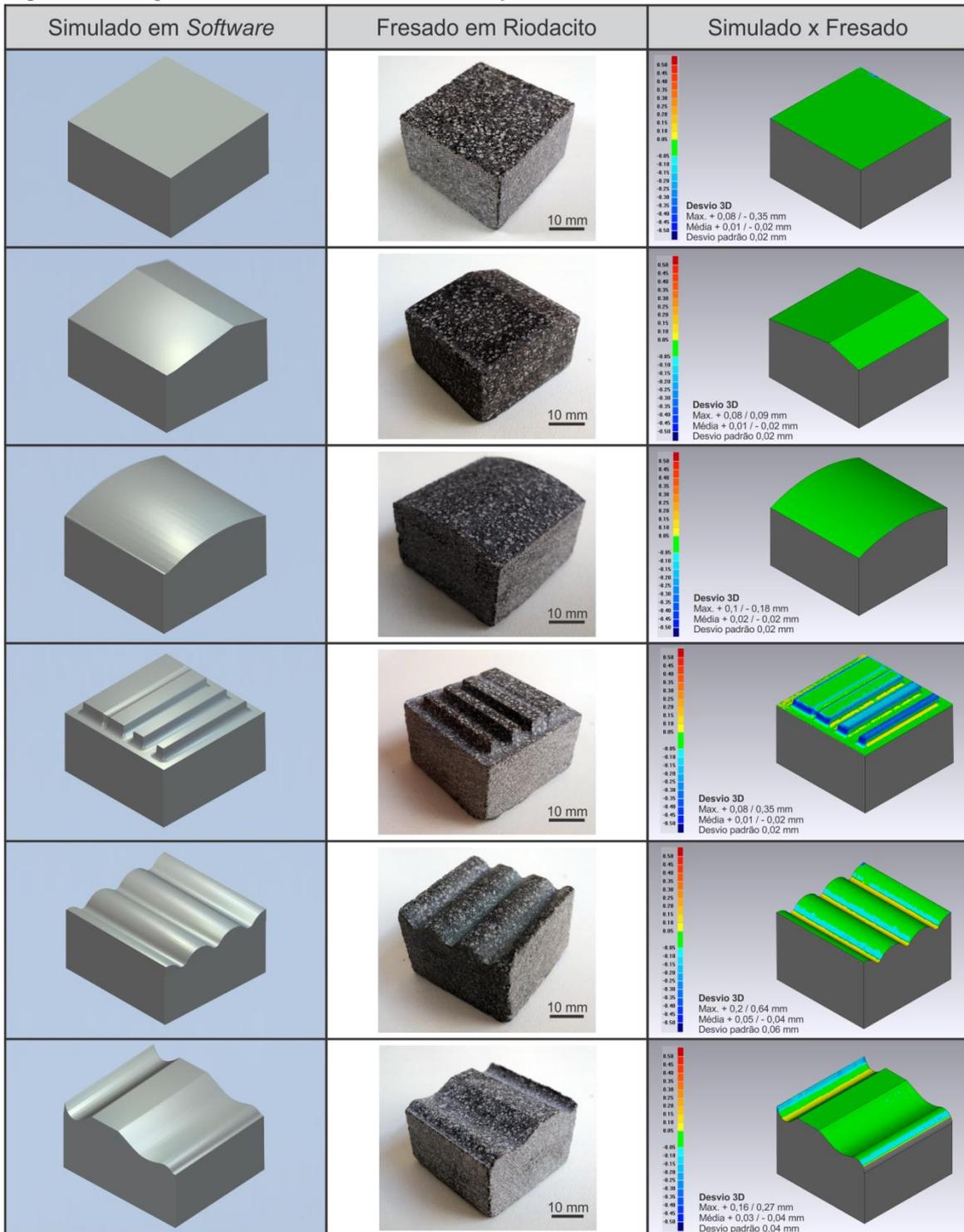
Um total de sessenta e cinco testes foram executados utilizando os diferentes padrões de usinagem estabelecidos. Os parâmetros utilizados para execução dos processos de usinagem nos padrões 1 (geometria lisa e plana), 2 (perfil inclinado), 3 (perfil côncavo), 5 (perfil ondulado) e 6 (perfil livre) tiveram um aproveitamento entre 85 % (padrão 1) e 66 % (padrão 5) dentre as usinagens finalizadas. No padrão 4 o sucesso dos processos ficou abaixo dos 10 % estabelecendo este padrão como o de maior dificuldade de execução.

Todos os testes considerados satisfatórios, aqueles que foram concluídos, tiveram - em novo corpo de prova, com nova ferramenta e através da utilização dos mesmos critérios e padrões - sua condição de sucesso verificada. Mesmo tendo o controle rigoroso das velocidades de avanço em quaisquer dos eixos de deslocamento da ferramenta, através da utilização do pós-processador, não foi possível determinar um parâmetro ótimo que possibilitasse a repetibilidade do procedimento sem que houvesse intervenções constantes nos diferentes parâmetros de usinagem estabelecidos, principalmente as velocidades de avanço e mergulho.

Para verificação da precisão do procedimento, as amostras de riodacito fresadas com os padrões 1, 2, 3, 4, 5 e 6 foram escaneadas a laser com digitalizador conoscópico Optmet® modelo ConoLine® acoplada a uma Digimill3d®. A resolução utilizada foi de 0,02 mm em X e em Y. A análise dimensional foi efetuada no *software* Geomagic® Control™, *software* utilizado na inspeção e medição de peças industriais. Nesta análise foram comparadas as simulações de usinagem realizadas em *software* CAM com as obtidas através do processo de digitalização.

Na Figura 56 são apresentados os resultados onde é possível visualizar as medições máximas e mínimas além do desvio padrão e média de cada aferição. Os padrões 1 e 2 a diferença ficou, em média, entre 0,01 e - 0,02 mm. Já o padrão 3 entre 0,02 e - 0,02 mm. Nos padrões 4, 5 e 6 as diferenças foram mais significativas em razão da profundidade do corte e aos esforços aos quais as ferramentas foram submetidas. No padrão 4 a variação máxima foi de 0,27 mm enquanto no padrão 5 o desvio padrão foi de 0,06 mm.

Figura 56 - Comparativo de fresamento simulado em *software* com o fresamento executado em riodacito.



Dentre as variáveis existentes, inerentes à quaisquer processos de usinagem - como as variações no equipamento e ferramentas - estas são as que possuem maior controle, condições de aferição e determinação de um padrão. Já a matéria-prima utilizada, riodacito, por ser natural, apresenta variações de composição e dureza, como verificado nas análises efetuadas, que interferem diretamente no desgaste da ferramenta não permitindo uma uniformidade, ou

determinação de um parâmetro, que sirva para quaisquer processos de fresamento HSM utilizando este tipo de equipamento, refrigeração e ferramenta para este material. No entanto, por ter sido obtido sucesso em determinadas condições é possível traçar um mapa de tomada de decisão, facilitador para este tipo de trabalho. O mapa considera, como balizadores iniciais, as superfícies dos padrões pré-estabelecidos neste trabalho e as ações tomadas para a realização dos testes até a obtenção de um resultado positivo.

O mapa de tomada de decisão é dividido em duas etapas: na primeira, mapa de tomada de decisão 1, são considerados os procedimentos possíveis sem a utilização de um pós-processador; na segunda, mapa de tomada de decisão 2, são utilizados controles de parâmetros possíveis somente com o uso de *software* de pós-processamento. Todos os padrões estabelecidos foram usinados com sucesso sem a utilização pós-processador. No entanto o uso do *software* otimiza e facilita os procedimentos tornando-o mais rápido e com menor risco de avaria da ferramenta. Inicialmente, no mapa de tomada de decisão 1, são estabelecidos alguns parâmetros fundamentais baseados naqueles que obtiveram sucesso no fresamento do riodacito. Nos padrões 1, 2, 3, 5 e 6 as velocidades de avanço (VA) e mergulho (VM) bem como os passos laterais (PL) e verticais (PV) são iguais em função dos esforços sofridos pelas ferramentas serem similares. Já no padrão 4 as velocidades de avanço e mergulho são reduzidas com o objetivo de minimizar estes esforços. Grande parte das texturas superficiais utilizadas comercialmente em produtos podem ser enquadradas, conforme já discutido, em um dos 6 padrões ou na combinação destes (Figura 57 – A).

O mapa de tomada de decisão 1 inicia com a usinagem da superfície do riodacito utilizando os parâmetros estabelecidos. Após o término do procedimento inicial é questionado se houve sucesso. Não havendo sucesso é sugerido que ocorra troca de ferramenta e reinício dos procedimentos utilizando os mesmos parâmetros (Figura 57 – B). Novamente é questionado o sucesso do procedimento. Se o processo não foi concluído é necessário que se determine se houve desgaste da ferramenta, que pode ocorrer em dois momentos: durante o processo, ou seja, durante o percurso realizado pela ferramenta na usinagem, ou durante a entrada, ou seja, durante o mergulho da ferramenta no início do processamento. Cabe ao operador observar em quais das condições ocorreu o desgaste (Figura 57 – C).

Para desgaste durante o processo é sugerida redução da velocidade de avanço em 10 % (para padrão 4 reduzir 50 %) e para desgaste durante a entrada é sugerida redução da velocidade de mergulho em 10 % (para padrão 4 reduzir 50 %). Em ambos os casos a redução

das velocidades ocorre em relação ao parâmetro inicial. Posteriormente sugere-se troca de ferramenta e reinício do procedimento. Se o procedimento não foi concluído e se não ocorreu desgaste visível, a ferramenta está avariada (quebra ou flambagem) sendo necessária nova redução da velocidade de avanço em 10 % (para padrão 4 reduzir 50 %) e do passo vertical em 0,1 mm para minimização dos esforços axiais e reinicialização do processo com nova ferramenta (Figura 57 – D).

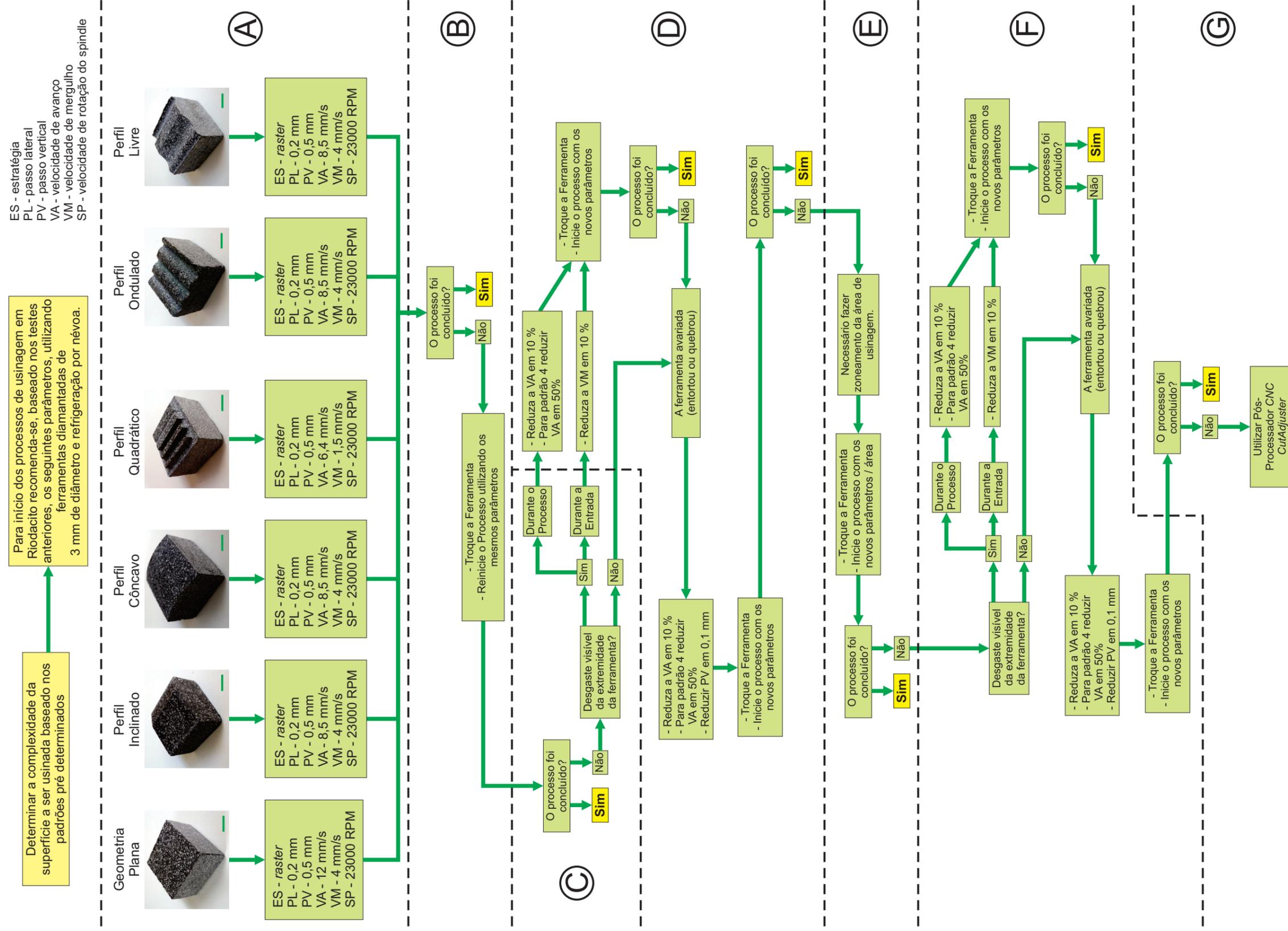
Se mesmo com todas as alterações sugeridas o desgaste ou avaria da ferramenta são recorrentes é necessário fazer alteração do programa CNC realizando zoneamento, divisão, da superfície a ser usinada em áreas de 9 cm<sup>2</sup>, conforme dimensões das amostras testadas. Para cada setor nova ferramenta deve ser utilizada e o processo reinicializado. Ao término do procedimento na primeira área é questionado se houve sucesso. (Figura 57 – E).

Não havendo sucesso é necessário que se determine se houve alguma avaria na ferramenta como desgaste na extremidade ou flambagem. Este desgaste pode ocorrer em duas situações: ou durante a entrada da ferramenta no rodacito no início do procedimento de usinagem; ou durante o processo de usinagem onde há deslocamento da ferramenta nos eixos X ou Y e Z. Para que se determine em qual situação ocorreu a avaria é necessária a observação atenta do operador.

Caso a avaria observada ocorra durante o processo de usinagem, é sugerida a redução da velocidade de avanço em 10 % (para padrão 4 reduzir 50 %). Desta forma os esforços axiais são minimizados favorecendo o processamento. Já, se foi observado o desgaste durante a entrada é necessária redução da velocidade de mergulho em 10 %, minimizando, desta maneira, o desgaste prematuro da ferramenta. Em quaisquer dos casos a redução das velocidades ocorrem em relação ao parâmetro inicial. Após estas alterações é necessário troca de ferramenta e reinício do procedimento. Se o procedimento não foi concluído e se não ocorreu desgaste visível, a ferramenta está avariada (entortou ou quebrou) sendo necessária nova redução da velocidade de avanço em 10 % (para padrão 4 reduzir 50 %) e do passo vertical em 0,1 mm, em relação aos parâmetros anteriormente utilizados, para minimização dos esforços axiais durante a usinagem. É necessário a reinicialização processo, na zona trabalhada, com nova ferramenta (Figura 57 – F). Novamente é questionado o sucesso do procedimento. Se mesmo com todas estas intervenções não houve conclusão ou não houve melhorias nas condições de usinagem e/ou redução de avarias na ferramenta não será possível a finalização do procedimento (Figura 57 – G).

Figura 57 - Mapa de tomada de decisão desconsiderando a utilização do software CNC *CutAdjuster* para adequação dos parâmetros de usinagem do Riodacito.

## Mapa de Tomada de Decisão



No mapa de decisão 2 (Figura 58) o processo ocorre após o restabelecimento de todos os parâmetros iniciais. Este procedimento é sugerido para que se tenha um ponto de partida conhecido. Com o auxílio do pós-processador CNC *CutAdjuster 1.3* é sugerido igualar a velocidade de deslocamento em Z (VDZ) à velocidade de mergulho (VM) definida no *software* CAM. Desta maneira todos os deslocamentos descendentes em Z terão sua velocidade reduzida favorecendo a preservação da ferramenta (Figura 58 – A). Sem a utilização do *software* não é possível alterar de forma independente as velocidades de avanço, deslocamento em Z e mergulho.

Após o término do procedimento é questionado se houve sucesso. Não havendo sucesso é sugerido que ocorra troca de ferramenta e reinício dos procedimentos utilizando os mesmos parâmetros (Figura 58 – B). Novamente é questionado o sucesso do procedimento. Caso tenha ocorrido sucesso há possibilidade otimização incrementando em 10 % a velocidade de avanço e repetindo o procedimento. Se houve sucesso, incrementar novamente em 10 % a velocidade de avanço. Em caso de insucesso reverter o incremento (Figura 58 – C).

Se o processo não foi concluído é necessário que se determine se houve desgaste da ferramenta, que também pode ocorrer em dois momentos, como mostrado no mapa de decisão 1: ou durante o processo, ou seja, durante o percurso realizado pela ferramenta na usinagem, ou durante a entrada, ou seja, durante o mergulho da ferramenta no início do processamento. Cabe ao operador observar em quais das condições ocorreu o desgaste (Figura 58 – D).

Para desgaste durante o processo é sugerida redução da velocidade de avanço e a velocidade de deslocamento em Z em 10 % (para padrão 4 reduzir ambas em 50 %) e para desgaste durante a entrada é sugerida redução da velocidade de mergulho em 10 %. Em ambos os casos a redução das velocidades ocorrem em relação ao parâmetro inicial. Posteriormente sugere-se troca de ferramenta e reinício do procedimento. Se o procedimento não foi concluído e se não ocorreu desgaste visível, a ferramenta está avariada (flambagem ou quebra) sendo necessária nova redução da velocidade de avanço e velocidade de deslocamento em Z em 10 % (para padrão 4 reduzir ambas em 50 %) e do passo vertical em 0,1 mm para minimização dos esforços axiais e reinicialização processo com nova ferramenta (Figura 58 – E). Como há maior controle dos parâmetros de usinagem é possível, caso o processo seja concluído, sua otimização aumentando gradativamente, com incremento de 10 %, a velocidade de deslocamento em X da ferramenta. Como há aumento da velocidade de

deslocamento da ferramenta, as chances de avaria também aumentam. Caso ocorra alguma avaria na ferramenta é necessário reiniciar o procedimento com a última velocidade de avanço em que houve sucesso. (Figura 58 – F).

Se mesmo com todas as alterações sugeridas o desgaste ou avaria da ferramenta são recorrentes é necessário zoneamento, divisão, da superfície a ser usinada em áreas de 9 cm<sup>2</sup>, conforme dimensões das amostras testadas. Para cada setor nova ferramenta deve ser utilizada e o processo reinicializado. Ao término do procedimento na primeira área é questionado se houve sucesso. (Figura 58 – G). Não havendo sucesso é necessário que se determine se houve alguma avaria na ferramenta como desgaste na extremidade ou flambagem. Este desgaste, como já mencionado, pode ocorrer em duas situações: ou durante a entrada da ferramenta no riodacito no início do procedimento de usinagem; ou durante o processo de usinagem onde há deslocamento da ferramenta nos eixos X ou Y e Z. Para que se determine em qual situação ocorreu avaria é necessária a observação atenta do operador.

Caso a avaria observada ocorra durante o processo de usinagem, é sugerida a redução da velocidade de avanço e velocidade de deslocamento em Z em 10 % (para padrão 4 reduzir ambas em 50 %). Desta forma os esforços axiais são minimizados favorecendo o processamento. Já, se foi observado o desgaste durante a entrada é necessário redução da velocidade de mergulho em 10 %, minimizando, desta maneira, o desgaste prematuro da ferramenta. Em quaisquer dos casos a redução das velocidades ocorrem em relação ao parâmetro inicial. Após estas alterações é necessário troca de ferramenta e reinício do procedimento. Se o procedimento não foi concluído e se não ocorreu desgaste visível, a ferramenta está avariada (entortou ou quebrou) sendo necessária nova redução da velocidade de avanço e velocidade de deslocamento em Z em 10 % (para padrão 4 reduzir ambas em 50 %) e do passo vertical em 0,1 mm, em relação aos parâmetros anteriormente utilizados, para minimização dos esforços axiais durante a usinagem. É necessário a reinicialização processo, na zona trabalhada, com nova ferramenta (Figura 58 – H).

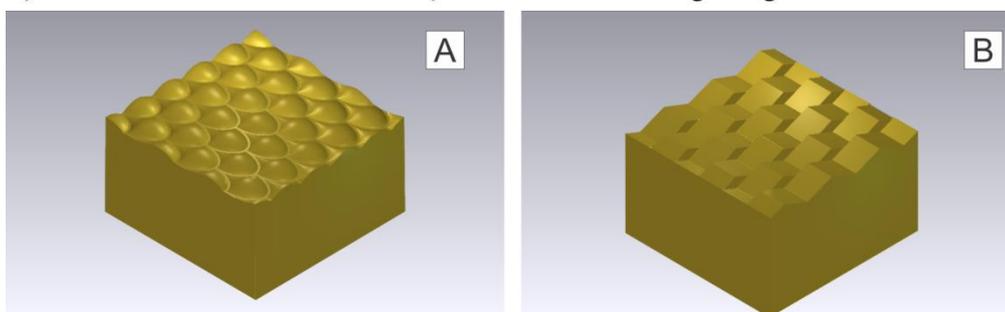
Novamente é questionado o sucesso do procedimento. Se houve conclusão da usinagem há possibilidade de otimização do procedimento conforme orientações descritas anteriormente (Figura 57 – I). Se mesmo com todas estas intervenções não houve conclusão ou não houve melhorias nas condições de usinagem e/ou redução de avarias na ferramenta não será possível a finalização do procedimento (Figura 58 – J).



#### 4.8 - Validação da Metodologia

Para validação da metodologia duas texturas foram desenvolvidas e testadas utilizando os mesmos parâmetros iniciais sugeridos nos mapas de tomadas de decisão. As texturas denominadas escama e zigue-zague (Figura 59) foram inicialmente classificadas conforme sua complexidade. Baseado nos padrões pré-estabelecidos, por possuir vários deslocamentos negativos em Z com angulação superior a  $45^\circ$ , foram adotados os parâmetros iniciais de usinagem do perfil quadrático para a textura escama. Já a textura zigue-zague, por possuir deslocamentos negativos em Z inferiores a  $30^\circ$ , foram adotados os parâmetros estabelecidos para o perfil inclinado.

Figura 59 - Texturas desenvolvidas para validação do Mapa de Tomada de Decisão. Em A) textura denominada “escama” e em B) textura denominada “zigue-zague”.



Após configurados, em *software* CAM, os parâmetros para o perfil quadrático o processo para confecção da textura escama foi iniciado. Quarenta minutos após houve fusão da matriz em níquel da ferramenta e seguindo o sugerido no mapa de tomada de decisão, a mesma foi substituída e o processo reiniciado utilizando os mesmos parâmetros de usinagem estabelecidos. Passados 52 minutos e 3 segundos a ferramenta apresentou, novamente, o mesmo comportamento. Como houve desgaste visível na extremidade cortante durante o processo, a velocidade de avanço foi reduzida em 50%, para 5,76 mm/s. A ferramenta foi trocada e o processo reiniciado. Novamente não foi concluído havendo necessidade de substituição de ferramenta e redução da velocidade de avanço em 50%, para 2,88 mm/s. Também houve necessidade de redução do passo vertical em 0,1 mm, para 0,4 mm. O processo foi reiniciado. Após 1 hora 49 minutos 38 segundos o processo foi concluído. Nas imagens a seguir podem ser observados o resultado do processo de usinagem em riodacito (Figura 60) bem como os procedimentos adotados conforme sugerido pelo mapa de tomada de decisão (Figura 61).

Figura 60 - Textura “escama” usinada em riocardito

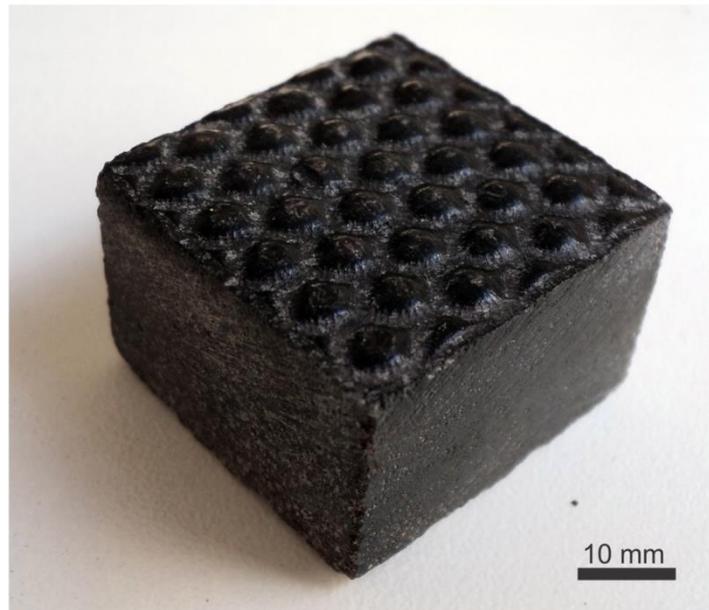
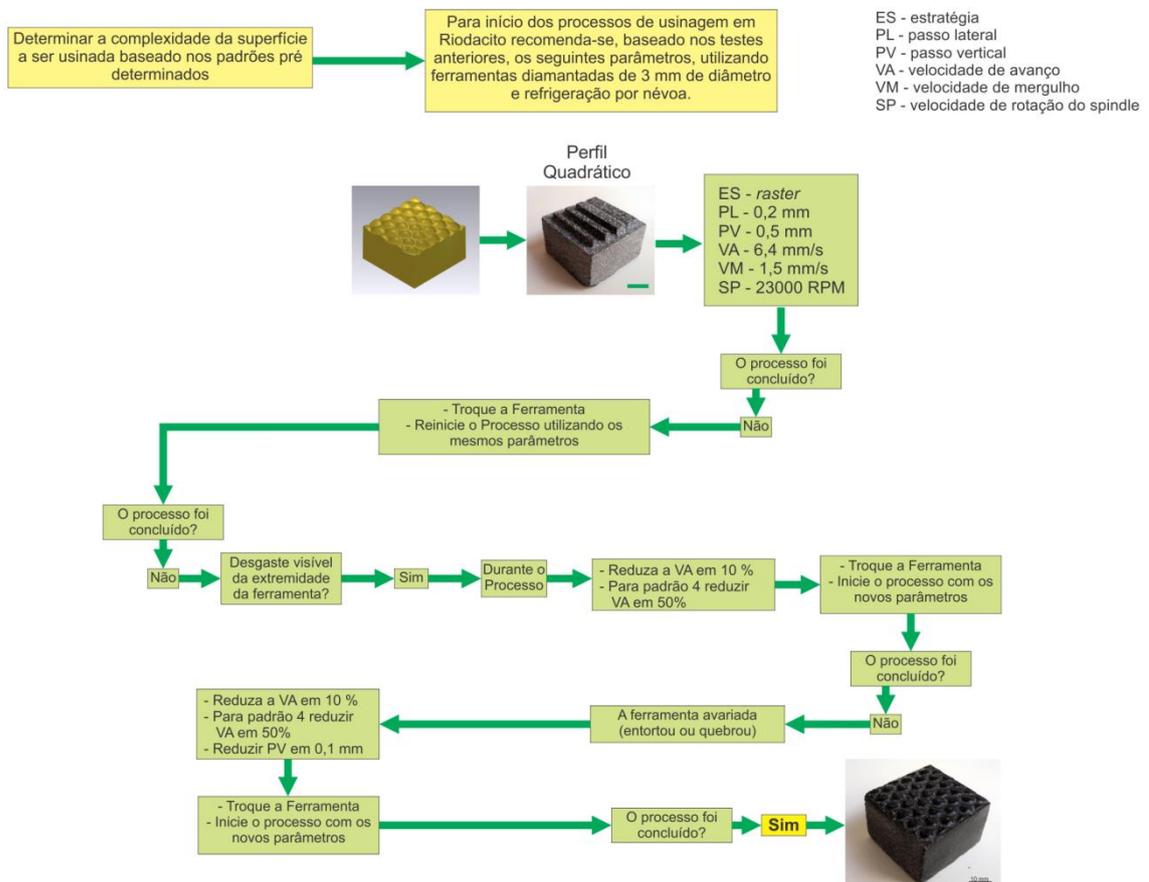


Figura 61- Processo decisório orientado pelo Mapa de Tomada de Decisão utilizado para confecção da textura escama em riocardito

### Mapa de Tomada de Decisão



Para textura zigue-zague foram configurados, com auxílio de *software* CAM, os parâmetros para o perfil inclinado. Vinte e dois minutos após houve fusão da matriz em níquel da ferramenta e seguindo o sugerido no mapa de tomada de decisão, a mesma foi substituída e o processo reiniciado utilizando os mesmos parâmetros de usinagem estabelecidos. Passados 57 minutos e 9 segundos o processo foi concluído. Nas imagens a seguir podem ser observados o resultado do processo de usinagem em riodacito (Figura 62) bem como os procedimentos adotados conforme sugerido pelo mapa de tomada de decisão (Figura 63).

Figura 62 - Textura “zigue-zague” usinada em riodacito

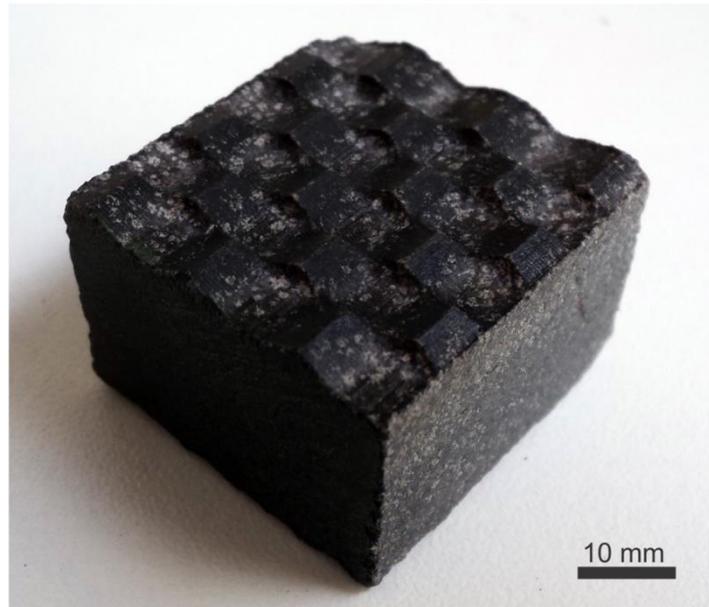
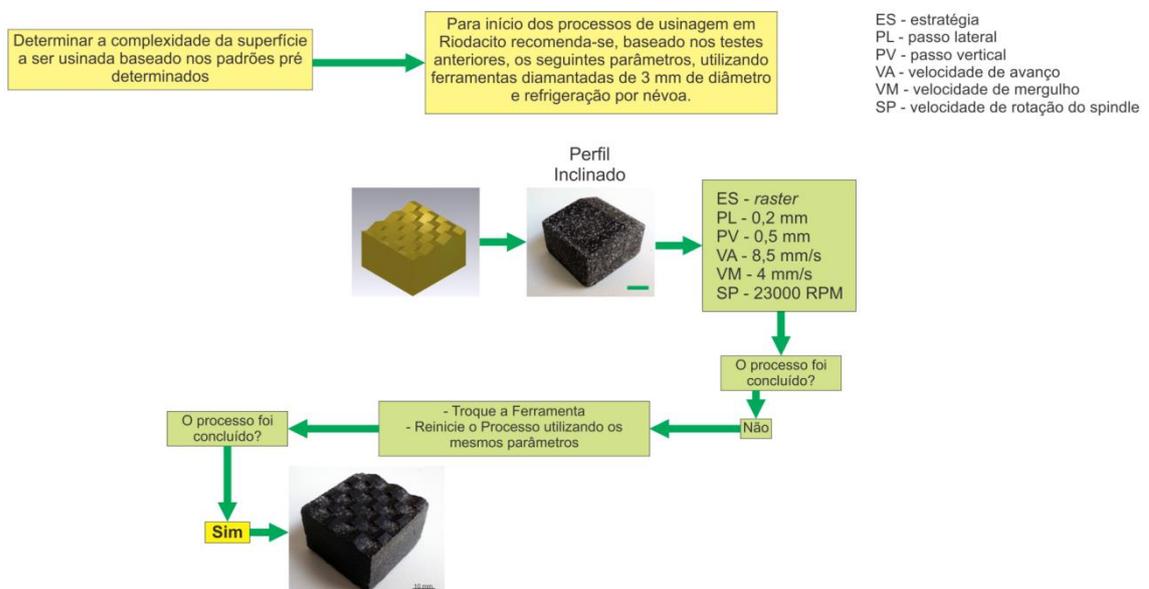


Figura 63- Processo decisório orientado pelo Mapa de Tomada de Decisão utilizado para confecção da textura zigue-zague em riodacito

### Mapa de Tomada de Decisão



## 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Neste trabalho, realizou-se um estudo sobre seleção de materiais, caracterização e processamento por fresamento em altas velocidades (HSM) no beneficiamento do riodacito (basalto carijó). Foram realizadas abordagens sobre rochas ígneas focando no basalto e riodacito, objeto de estudo desta pesquisa. A visão sobre formação destas rochas, suas características, usos como revestimento para construção civil e potencialidade de agregação de valor através do incremento dos processos de transformação utilizados atualmente foram fundamentais para o início desta tese.

Tecnologicamente, a contribuição deste trabalho ocorreu através da sistematização do procedimento de fresamento HSM, pelo desenvolvimento de mapas de tomada de decisão e comparativos entre o projetado e o efetuado, o que comprova a possibilidade do uso desta tecnologia no beneficiamento desta rocha.

Este estudo possibilitou ainda a caracterização do riodacito através de análises de fluorescência e difração de raios-x além da determinação de sua dureza através do ensaio Knoop, fundamentais para a elaboração desta pesquisa, o que permite contribuir incrementalmente para o desenvolvimento de um *know-how* nacional neste tipo de desdobramento e caracterização mineralógica.

Pela observação dos aspectos analisados é possível verificar que os resultados obtidos através ensaio de microdureza Knoop são parâmetros fundamentais que podem ser associados a situações onde ocorre desgaste, seja da rocha ou da ferramenta. Considerando este aspecto é possível concluir que os constituintes mais duros da rocha são retirados, durante o processo de usinagem, por escarificação e não por abrasão. Também, estes mesmos constituintes, por estarem fortemente ancorados na massa rochosa acabam por eliminar os grãos de diamante da

ferramenta ou por escarificação ou por proporcionar a fusão da matriz de níquel através de atrito, mesmo havendo refrigeração forçada por névoa.

A contribuição original deste estudo ocorreu quanto à utilização de ferramentas diamantadas policristalinas de baixo custo no processamento e beneficiamento do riodacito correlacionando as propriedades da rocha ao desgaste da ferramenta durante o processamento com o objetivo de se determinar parâmetros para sua utilização. Este estudo mostrou que as ferramentas diamantadas policristalinas, de baixo custo, com matriz de níquel comercializadas não suportaram os esforços a que foram submetidas sendo necessário para a conclusão desta tese a elaboração de um pós-processador específico para maior controle dos parâmetros fornecidos pelos softwares CAM.

Neste sentido, para iniciar a utilização de tecnologias HSM no beneficiamento, em escala industrial, do riodacito é necessário o incremento tecnológico no desenvolvimento de ferramentas diamantadas de baixo custo, compatível com o valor comercial desta rocha, com a utilização de monocristal de diamante ou utilização de ferramentas cerâmicas de alta dureza.

### **5.1 - Sugestões para Futuros Trabalhos**

É interessante estender o presente trabalho a outras investigações, tanto em tecnologia quanto pesquisa básica. Sugere-se, portanto, as seguintes ações para continuidade deste estudo:

- realizar estudo com a utilização de fresamento HSM no beneficiamento do riodacito ferramentas diamantadas monocristalinas e sua aplicabilidade na produção seriada;

- realizar estudo com a utilização de fresamento HSM no beneficiamento de rochas ornamentais de alta dureza utilizando pastilhas cerâmicas de carbeto de tungstênio ou alumina;

## 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIROCHAS. **Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais**. São Paulo, 2010. Disponível em: < <http://www.abirochas.com.br> > Acesso em: 07 de setembro de 2010.

ALENCAR, C. R., CARANASSIOS, A. CARAVALHO, D. . **Tecnologias de Lavra e Beneficiamento de Rochas Ornamentais** . IEL/FIEC, Fortaleza, Ceará, 1996.

**Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR)** . Normas une 22-170 a une 22-190

ANTONIASSI, Juliana Livi . **A Difração de Raios X com o Método de Rietveld Aplicada a Bauxitas de Porto Trombetas, PA** . São Paulo: USP, 2010. 129 f. Dissertação (Mestrado em Ciências), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

ASTM INTERNACIONAL . E1508-98: **Standard Guide for Quantitative Analysis by Energy-Dispersive Spectroscopy** . Philadelphia: ASTM, 2008.

BIZZI, Luiz Augusto; SCHOBENHAUS, Carlos; VIDOTTI, Roberta Mary; GONÇALVES, João Henrique (Org.) . **Geologia Tectônica e Recursos Minerais do Brasil** . Brasília: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2003.

BRANDÃO, V., SARDDOU FILHO, R., QUEIROZ, E. T. . Mármore, Granitos e Outras Rochas Ornamentais no Brasil . In: SCHOBENHAUS, C., QUEIROZ, E. T., COELHO, C. E. S. (edit). **Principais Depósitos Minerais do Brasil** . Brasília: DNPM, 1991.

BRANDÃO, Vladimir; GONÇALVES, Ada Cristina . **Brasil Inovador: 40 Histórias de Sucesso de Empresas que Investem em Inovação** . IEL, Brasília, 2006.

BRASIL . Ministério de Minas e Energia – MME . **Desenvolvimento de Estudos para Elaboração do Plano Duodecenal (2010-2030) de Geologia, Mineração e Transformação Mineral** . Brasília, julho de 2009.

BRUNDLE, C. Richard; EVANS JR., Charles; WILSON, Shaun, (Org.) . **Encyclopedia of Materials Characterization** . Greenwich: Manning Publications Co., 1992.

CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro (RJ): LTC, 2008.

CHIAVERINI, Vicente . **Tecnologia Mecânica – Volume II – Estrutura e Propriedades das Ligas Mecânicas** . São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

CHIODI FILHO, C. . Consumo Interno, Perfil e Utilização e Estrutura de Comercialização das Rochas do Brasil . **Pedras do Brasil**, Espírito Santo, v. 25, p. 36-40, 2004.

CIPELLI, Antonio Marco (org.) . **High-Speed Machining – How the concepts os HSM/HSC com revolutionize the metal-mechanics industry** . São Paulo: Editora Erika Ltda, 2004.

COIMBRA FILHO, Clébio Goulart . **Relação entre Processo de Corte e Qualidade de Superfícies Serradas de Granitos Ornamentais** . São Carlos: 2006. 168 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) Escola de Engenharia, USP, 2006.

CPRM . **Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais / Serviço Geológico do Brasil**. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br>> Acesso em: 08 de setembro de 2010.

CRAIG, James R., VAUGHAN, David J. . **Ore Microscopy & Ore Petrography** . New York: John Wiley, 2nd edition, 1994.

DAVIES, M. A.; BURNS, T. J.; SCHMITZ, T. L. . **High-Speed Machining Processes: Dynamics on Multiple Scales** . Gaithersburg: National Institute os Standards and Technology, USA, p. 7-19, 1997.

DIETER, George E. . **Metalurgia Mecânica** . Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 2ªed, 1981.

DRUCKER, Peter F.. **A administração na próxima sociedade**. São Paulo: Nobel, 2002.

FALLER, R.; SILVA, F.; KINDLEIN, W. . **A utilização da usinagem em altíssimas velocidades com quatro eixos no design de produto** . 2006. Trabalho apresentado no VII P&D Design, Curitiba, 2006.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blucher, 1986.

FILGUEIRA, Marcello; PINATTI, Daltro Garcia . Desenvolvimento de Uma Nova Rota de Processamento de Ferramentas Diamantadas: Metalurgia do Pó e Forjamento Rotativo . **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 3, p. 181 – 188, 3º trimestre 2006, 2006.

FRASCÁ, M. H. B. O. & QUITETE, E. B. . Rochas Ornamentais do Estado de São Paulo – Características Tecnológicas . **Rochas de Qualidade**, São Paulo, n. 154, p. 154-171, 2000.

FREITAS, Gustavo. **Metodologia e Aplicabilidade da Digitalização 3D a LASER no Desenvolvimento de Moldes para Calçados e Componentes**. Porto Alegre: UFRGS, 2006. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

GEIST, J. . **Influence of HSC-Appropriate Machining Parameters on NC Programing** . 1999. Trabalho apresentado no Seminário Internacional de Alta Tecnologia, Inovações Tecnológicas na Manufatura para Aço 2000 . Universidade Metodista de Piracicaba (UNIMEP), 1999.

GOLDSTEIN, J. I., NEWBURY, Dale; JOY, David; LYMAN, Charles; ECHLIN, Patrick; LIFSHIN, Eric; SAWYER, Linda; MICHAEL, Joseph . **Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis – A Textbook for biologist, Materials Scientists and Geologists** . New York: Plenum Press, 1992.

HIERARQUIA SÓCIO-ECONÔMICA DA REGIÃO DO BASALTO. Nova Prata: Câmara de Indústria E Comércio – CIC, 2010.

KASCHNER, D. . **Tecnologias de Beneficiamento** . 1996. Trabalho apresentado no II Encontro do Centro-Oeste sobre Granitos, Mármore e Pedras Ornamentais, Goiânia, 1996.

KINDLEIN JÚNIOR, Wilson . **Estudo da Síntese e Caracterização de Pó de Diamante Obtido por Altas Pressões** . Porto Alegre: UFRGS, 1999. 160 f. Tese (Doutorado em Engenharia) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

KLEIN, C. **Mineral Science** . New York: John Wiley & Sons, 2002.

LE MAITRE. R.W. . **Igneous rocks: a classification and glossary of terms**. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematic of Igneous Rocks, 2nd ed., Cambridge, Cambridge University Press, 2002.

MACEDO, Sérgio Eduardo Moreno; SCHROETER, Rolf Bertrand; WEINGAERTNER, Walter Lindolfo . **Análise de Forças de Fresamento de Topo Convencional e com Altas Velocidades de Corte** . Florianópolis: UFSC, 2001. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

MANUAL DE OSLO – Proposta de Diretrizes para Coleta e Interpretação de Dados sobre Inovação Tecnológica . Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento – OECD , Departamento Estatístico da Comunidade Européia – OCDE e Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP .

MAPA Geológico do Estado do Rio Grande do Sul . Porto Alegre: CPRM, 2006. Escala 1: 750.000.

MOREIRAS, Sérgio Trajano Franco . **Estudo sobre o Revestimento de Fachadas de Edifícios Altos com Placas de Granitos Ornamentais** . São Carlos: USP, 2005. 92 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

MOTOKI, Akihisa . **Descrição Petrográfica de Rochas Ígneas** . DMPI - Departamento de Mineralogia e Petrologia Ígnea/UERJ, Rio de Janeiro, 2004

MOTOKI, Akihisa; ZUCCO, Lóris; VARGAS, Thaís; NEVES, José Luiz . **Basalto da Serra Gaúcha e sua Relação com o Desenvolvimento Regional** . 2004. Trabalho apresentado no 2º Congresso Brasileiro de Extensão Universitária, Belo Horizonte, 2004.

PHILPOTTS, Anthony . **Petrography of Igneous and Metamorphic Rocks** . Illinois: Waveland Press Co., 2003.

PRESS, Frank *et.al.* **Para entender a terra**. Porto Alegre: Bookman, 2008.

PRZYKLENK, K., . Diamond Impregnated Tools – Uses and Production . **IDR – Toolmaking**, v. 4, p. 192-195, 1993.

QUITETE, Eduardo B.; KAHN, Henrique . **Dureza Knoop em Rochas para Revestimento: Correlação com Desgaste Abrasivo** . 2002. Trabalho apresentado no XIX ENTEMME – Recife, Pernambuco, 2002.

QUITETE, Eduardo Brandau . **Dureza Knoop em Rochas para Revestimento: Metodologia e Correlação com Desgaste Abrasivo** . São Paulo: USP, 2002. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

QUITETE, Eduardo Brandau. **Dureza knoop aplicada a rochas ornamentais** . 1998. Trabalho apresentado no Congresso Brasileiro de Geologia – IPT, Belo Horizonte, 1998.

REED, S. J. B. . **Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology** . New York: Cambridge University Press, 2005.

REVISTA DO BASALTO . Nova Prata: Sindicato da Indústria da Extração de Pedreiras de Nova Prata e Região, 2000.

RIBEIRO, R. P.; PARAGUASSÚ, A. B.; RODRIGUES, J. E.; SILVEIRA, L. . Aplicação de Bases Conceituais de Tribologia no Beneficiamento de Granitos Ornamentais . **Revista Minerva**, n. 1, v.1; p. 45-50, 2005.

RIBEIRO, R. P.; PARAGUASSU, A. B.; SILVEIRA, L. L. . **Granite Sawing in Multiblade Gangsaws: a Tribological Approach** . 2004. Trabalho apresentado no 32ª International Geological Congress, Florence, 2004.

RIBEIRO, Rogério Pinto . **Influência das Características Petrográficas de Granitos no Processo Industrial de Desdobramento de Blocos** . São Carlos: USP, 2005. 132 f. Tese (Doutorado em Engenharia), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SANDVIK . **Usinagem com Altas Velocidades de Corte e Usinagem Convencional de Moldes e Matrizes** Sandvik Coromant, 2010. disponível em: < <http://www.sandvik.com>> Acesso em: 07 junho de 2010.

SCHULZ, H. . **High Speed Machine** . 1997. Trabalho apresentado no Seminário de Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte: Fresamento, Torneamento, Furação. Piracicaba, 1997.

SELLEY, Richard C.; COCKS, L. Robin; PLIMER, Ian R (Org.) . **Encyclopedia of Geology** . London: Elsevier Academic Press, 2005. 5v.

SGARBI, Geraldo Norberto Chaves; FERNANDES, Maria Lourdes Souza; SGARBI, Patrícia Barbosa de Albuquerque; DUSSIN, Tânia Mara . **Petrografia macroscópica das rochas ígneas, sedimentares e metamórficas**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

SIMANTOB, Moysés Alberto; BARBIERI, José Carlos. **Organizações inovadoras sustentáveis: uma reflexão sobre o futuro das organizações**. São Paulo: Atlas, 2007.

SOARES, Beatriz M. C.; SARON, Elizabete S. . Microanálise Elementar de Materiais: Aplicações do Sistema MEV-EDX . **Boletim de Tecnologia de Desenvolvimento de Embalagens**, Instituto Brasileiro de Tecnologia de Alimentos – ITAL, São Paulo, v 22, n 1, janeiro/fevereiro/março 2010.

SOSSAI, Fabiano Jerônimo Moreira . **Caracterização Tecnológica de Rochas Ornamentais** . Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2006. 101 f. Dissertação (Magister Scientiae) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 2006.

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de Corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos, abrasivos**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2008.

SYMES, R. F. **Rochas e minerais**. São Paulo: Globo, 1990.

TEIXEIRA, Wilson - org. . **Decifrando a Terra** . São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

TRENT, Edward M. **Metal cutting**. Boston: Butterworth-Heinemann, 2000.

TRILLO, G. L. Características y propiedades de las rocas ornamentales. Caracterización y normalización. In: LOPEZ, Jimeno (Ed.) . **Manual de rocas ornamentales: prospección, explotación, elaboración y colocación** . Madrid: Entorno Grafico, 1996. P. 175-197.

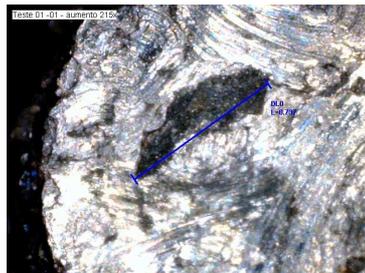
TURNER, Francis J.; VERHOOGEN, John . **Petrologia Ígnea y Metamórfica**. Barcelona, Espanha: Ediciones Omega SA. 1975.

VARGAS, Thais; MOTOKI, Akihisa; NEVES, José Luiz Peixoto . Rochas Ornamentais do Brasil, seu Modo de Ocorrência Geológica, Variedade Tipológica, Exploração Comercial e Utilidades como Materiais Nobres de Construção . **Revista de Geociências**, Niteroi, v. 2, n. 2, p. 119-132, 2001.

**APÊNDICE A**

**TESTES PRELIMINARES**

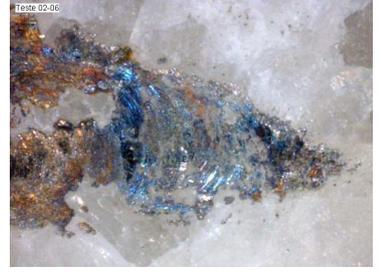
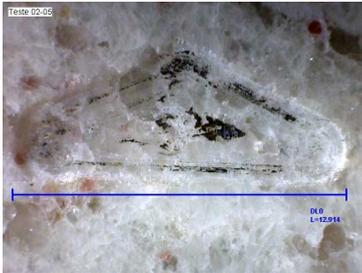
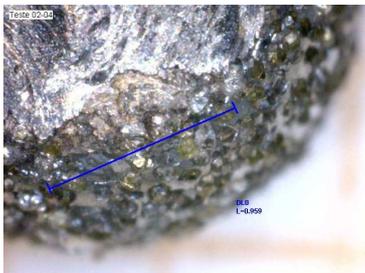
<b>Teste 01</b>		
Material	Granito Branco	
Fresa	Vortex modelo 3018 - 2,831mm dia.	
Profundidade Total	1	mm
Profundidade Passe	0,15	mm
Avanço	5	mm/seg
Vel. Mergulho	1	mm/seg
Segurança em Z	5	mm
Tempo Usinagem	16:04	min



### **Considerações**

- visível excesso de temperatura na fresa apesar da refrigeração;
- para evitar desgaste da extremidade da ferramenta é sugerida redução da velocidade de mergulho devido ao superaquecimento durante a penetração da ferramenta na rocha; produção de ruído;
- na transição mergulho avanço lateral havia faiscamento sugerindo superaquecimento da ferramenta em função do desgaste da extremidade (perceptível visualmente) da ferramenta;
- visível defeito na ferramenta, vazio, visualizado na fotografia 2
- deposição de metal aglomerante, na superfície da rocha;
- visível excesso de esforço axial na ferramenta;
- possíveis soluções: redução da profundidade do passe para evitar esforço lateral; redução da velocidade de mergulho para evitar desgaste excessivo na extremidade da ferramenta.

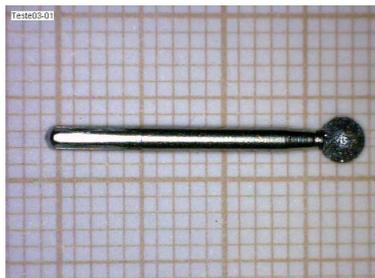
<b>Teste 02</b>		
Material	Granito Branco	
Fresa	Vortex modelo 3018 - 2,831mm dia.	
Profundidade Total	1	mm
Profundidade Passe	0,1	mm
Avanço	5	mm/seg
Vel. Mergulho	0,5	mm/seg
Segurança em Z	5	mm
Tempo Usinagem	15:33	min



### **Considerações**

- redução da profundidade do passe e velocidade de mergulho não evitaram desgaste prematuro da ferramenta e deposição de metal sobre a rocha;
- não houve deformações no eixo da ferramenta;
- para evitar desgaste da extremidade da ferramenta é sugerida nova redução da velocidade de mergulho devido ao superaquecimento durante a penetração da ferramenta na rocha; produção de ruído;
- na transição mergulho avanço lateral havia faiscamento sugerindo superaquecimento da ferramenta em função do desgaste da extremidade (perceptível visualmente) da ferramenta;
- houve constatação que a profundidade do passe não foi fator determinante para o desgaste da ferramenta. Sugere-se retornar a 0,15mm;

<b>Teste 03</b>		
Material	Granito Branco	
Fresa	Vortex modelo 3018 - 2,831mm dia.	
Profundidade Total	1	mm
Profundidade Passe	0,15	mm
Avanço	5	mm/seg
Vel. Mergulho	0,1	mm/seg
Segurança em Z	2	mm
Tempo Usinagem	54:15	min
Desgaste Ferramenta	0,142	mm



### **Considerações**

- teste realizado com sucesso. Não há desgaste significativo na ferramenta;
- tempo de usinagem ainda muito elevado. Para redução do tempo sugere-se alteração da profundidade do passe de 0,15 para 0,2 mm (redução de passes para profundidade de 1mm), velocidade de avanço de 5 para 6 mm/seg, manutenção da velocidade de mergulho e redução do valor z de segurança de 2 para 1 mm

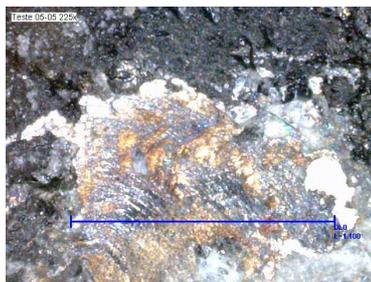
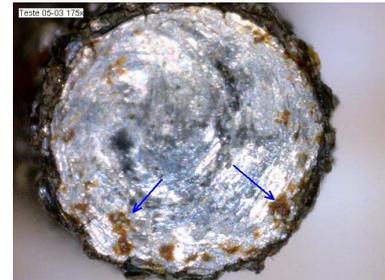
<b>Teste 04</b>		
Material	Granito Preto	
Fresa	Fava modelo 4137 – 1,868 mm dia.	
Profundidade Total	1	mm
Profundidade Passe	0,2	mm
Avanço	6	mm/seg
Vel. Mergulho	0,1	mm/seg
Segurança em Z	1	mm
Tempo Usinagem	30,36	min
Desgaste Ferramenta	-----	mm



### Considerações

- redução significativa, - 43,93%, do tempo de usinagem;
- nesse teste foi utilizada ferramenta diamantada de outra marca e geometria já que não foi encontrada no mercado ferramenta igual às utilizadas anteriormente. Considera-se que a substituição de ferramentas é algo natural na indústria. Testes prosseguirão com a nova ferramenta.
- mais macio que granito branco, segundo Prof. Henrique, por se pobre em sílica? Verificar qual a dureza real da rocha.
- tentativa de redução do tempo de usinagem. Sugere-se aumento da velocidade de avanço de 6 para 8 mm/seg e manutenção dos demais parâmetros de usinagem;

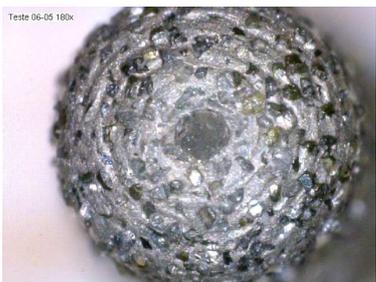
<b>Teste 05</b>		
Material	Granito Preto	
Fresa	Fava modelo 4137 – 1,868 mm dia.	
Profundidade Total	1	mm
Profundidade Passe	0,2	mm
Avanço	8	mm/seg
Vel. Mergulho	0,1	mm/seg
Segurança em Z	1	mm
Tempo Usinagem	3:21	min
Desgaste Ferramenta	0,419	mm



### **Considerações**

- desgaste prematuro da ferramenta; superaquecimento;
- para evitar desgaste lateral da ferramenta (visível flexão lateral) é sugerida redução da velocidade de avanço devido ao superaquecimento durante o deslocamento da ferramenta na rocha; produção de ruído;
- durante o mergulho e avanço lateral havia faiscamento sugerindo superaquecimento da ferramenta em função do desgaste da extremidade (perceptível visualmente) da ferramenta;
- deposição de metal na superfície da rocha;
- visualização de pontos de oxidação na foto 3; pontos de oxidação podem ser defeito da ferramenta ou terem surgido após o processo (fusão do núcleo/haste ferroso + refrigeração com água)
- retomar velocidade de avanço, 6mm/seg; alterar profundidade do passe como forma de redução do tempo de usinagem (redução do número de passes até 1mm);

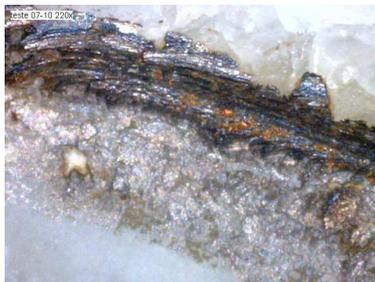
<b>Teste 06</b>		
Material	Granito Preto	
Fresa	Fava modelo 4137 – 1,868 mm dia.	
Profundidade Total	1	mm
Profundidade Passe	0,25	mm
Avanço	6	mm/seg
Vel. Mergulho	0,1	mm/seg
Segurança em Z	1	mm
Tempo Usinagem	23:47	min
Desgaste Ferramenta	-----	mm



### **Considerações**

- desgaste visível na ferramenta. Visualização do núcleo metálico (haste);
- redução do tempo de usinagem em 22,69% em relação ao teste 4;
- nova tentativa de redução do tempo de usinagem. Alteração dos parâmetros de profundidade do passe de 0,25 para 0,34 mm (valor escolhido em função da profundidade final de 1mm); manutenção da velocidade de avanço, redução da velocidade de mergulho de 0,1mm/seg para 0,05 mm/seg devido ao desgaste da extremidade da ferramenta.

<b>Teste 07</b>		
Material	Granito Branco	
Fresa	Fava modelo 4137 – 1,868 mm dia.	
Profundidade Total	1	mm
Profundidade Passe	0,34	mm
Avanço	6	mm/seg
Vel. Mergulho	0,05	mm/seg
Segurança em Z	1	mm
Tempo Usinagem	-----	min
Desgaste Ferramenta	0,586	mm

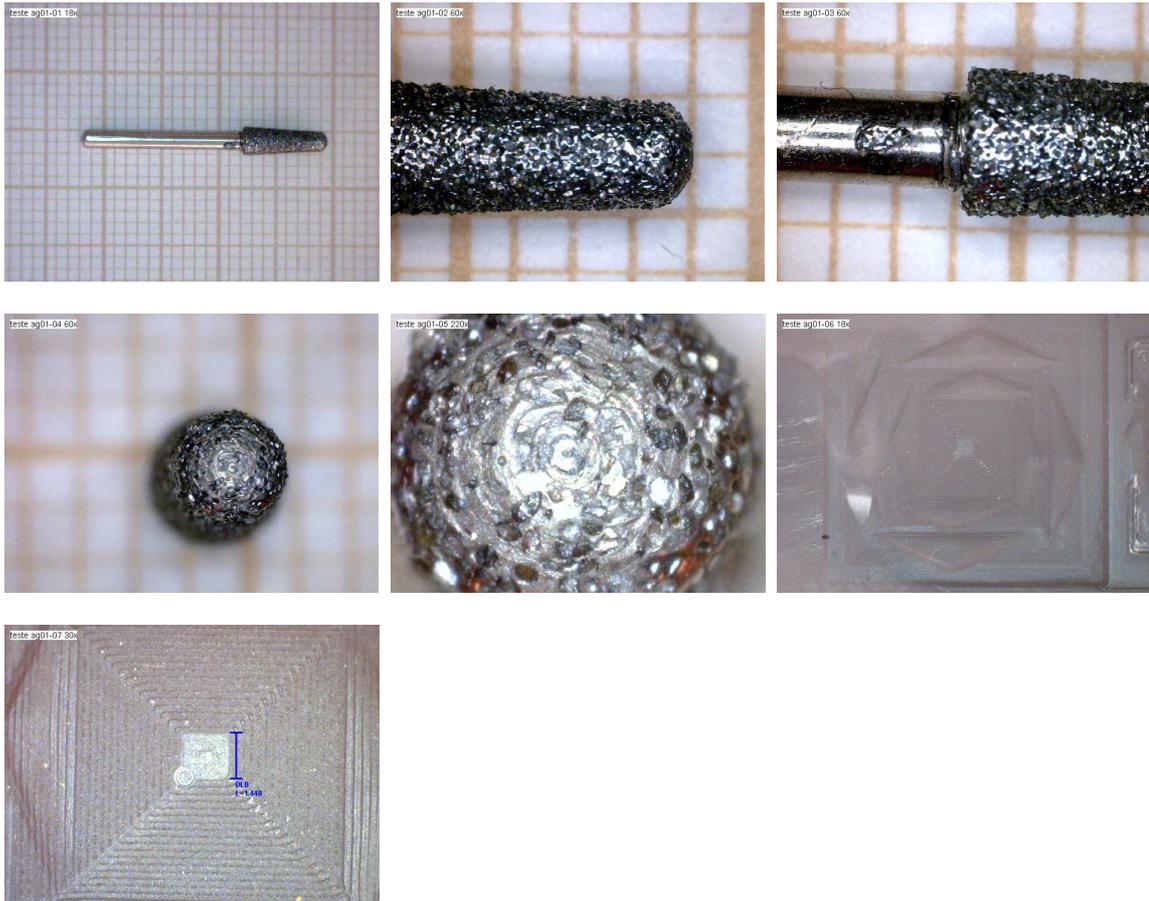


### Considerações

- desgaste prematuro da ferramenta;
- superaquecimento; fusão do metal da haste;
- deposição de metal fundido na superfície da rocha;
- nova alteração dos parâmetros: manutenção da profundidade de passe, redução da velocidade de avanço de 6 para 5,5 mm/seg em função de ruído e fiação no mergulho e deslocamento lateral; sugerida redução da velocidade de mergulho de 0,05 para 0,025mm/seg.

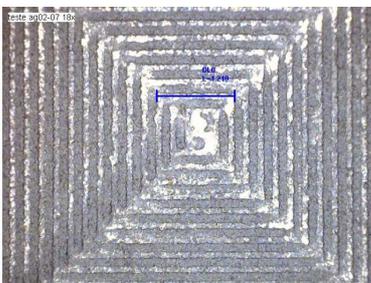
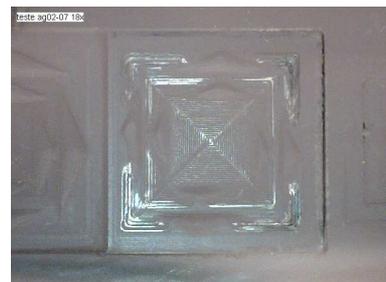
<b>Teste 08</b>		
Material	Granito Branco	
Fresa	Fava modelo 4137 – 1,868 mm dia.	
Profundidade Total	1	mm
Profundidade Passe	0,34	mm
Avanço	5,5	mm/seg
Vel. Mergulho	0,025	mm/seg
Segurança em Z	1	mm
Tempo Usinagem	23:54	min
Desgaste Ferramenta	-----	mm
		
<b>Considerações</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- baixo desgaste aparente da ferramenta;</li> <li>- tempo de usinagem 7 seg. superior ao teste 06.</li> <li>- repetir estes parâmetros em novos testes em granito. Sugerido aumento da área usinada e/ou material retirado; verificar tempo de duração da ferramenta;</li> <li>- sugerida utilização dos parâmetros do teste 08 em outro tipo de rocha, preferencialmente ágata;</li> </ul>		

<b>Teste Ag01</b>		
Material	Ágata	
Fresa	Fava modelo 4137 – 1,868 mm dia.	
Profundidade Total	0,65	mm
Profundidade Passe	0,34	mm
Avanço	5,5	mm/seg
Vel. Mergulho	0,025	mm/seg
Segurança em Z	1	mm
Tempo Usinagem	20:15	min
Desgaste Ferramenta	-----	mm



- nova geometria para o teste (amostra não comporta a geometria anterior em função do tamanho e homogeneidade do material);
- profundidade total neste teste 0,65mm.
- Não houve faiscamento no mergulho ou deslocamento lateral.
- sugerida alteração dos parâmetros de velocidade de mergulho de 0,025 para 0,02 mm/seg (- 20%) e profundidade final para 1mm (+ 53,84%); (alterações motivadas pelo sucesso e aparente facilidade do experimento Ag01) – (redução da velocidade de mergulho para compensação do aumento da profundidade final);
- desgaste da ferramenta visivelmente próximo ao desgaste visualizado no teste 08;

<b>Teste Ag02</b>		
Material	Ágata	
Fresa	Fava modelo 4137 – 1,868 mm dia.	
Profundidade Total	1	mm
Profundidade Passe	0,34	mm
Avanço	5,5	mm/seg
Vel. Mergulho	0,02	mm/seg
Segurança em Z	1	mm
Tempo Usinagem	26:08	min
Desgaste Ferramenta	0,737	mm

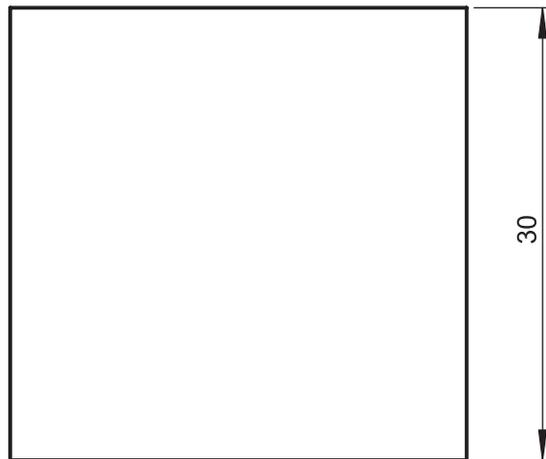
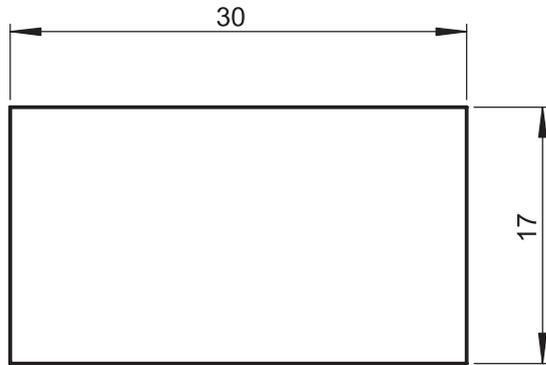


### **Considerações**

- visível danificação da ferramenta. Superaquecimento e fusão do metal da haste;
- deposição excessiva de metal da superfície da rocha;
- na nossa percepção a alteração foi pouco significativa para o resultado apresentado. Considerou-se diferença de dureza da ágata.
- Segundo Prof. Henrique a região escolhida para o teste possui mesmas características que a utilizada no teste Ag 01. Prof. Henrique sugere repetição do teste. Problema possivelmente esteja na ferramenta.

## **APÊNDICE B**

### **DESENHOS TÉCNICOS**

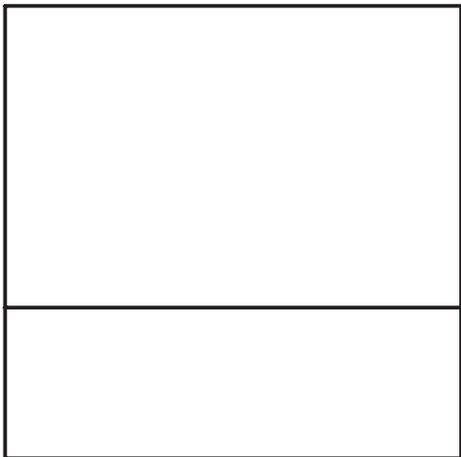
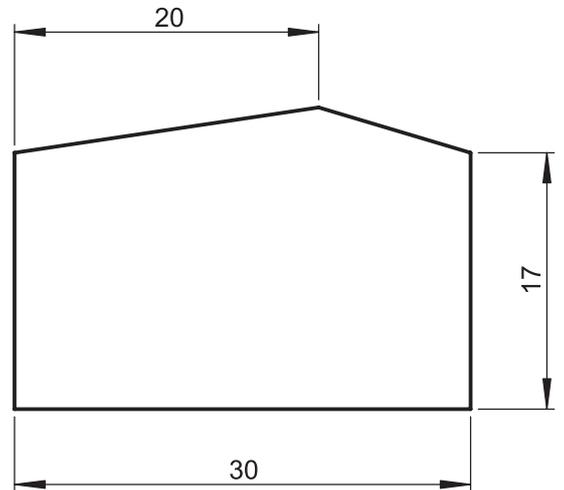
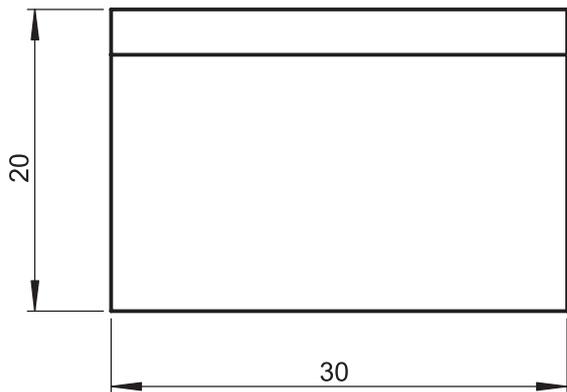


	Data	Assin.	Escala 2:1	em substituição de		Material: gesso pedra aço SAE 1020 riodacito
Des.	22/05/2011		Unidade: mm	substituído por		
Visto	22/05/2011		Folha 1/1	A4	Peso:	



Padrão 1 - plana

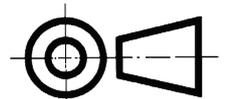


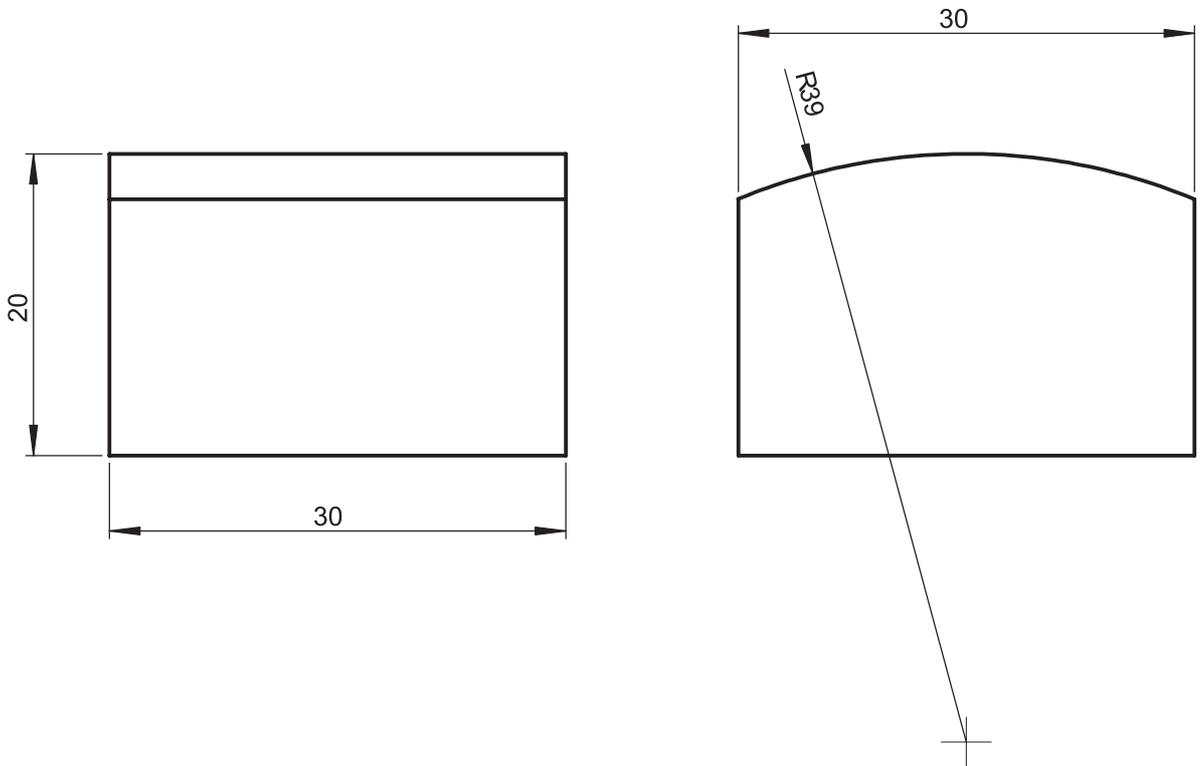


	Data	Assin.	Escala 2:1	em substituição de		Material: gesso pedra aço SAE 1020 riodacito
Des.	22/05/2011		Unidade: mm	substituído por		
Visto	22/05/2011		Folha 1/1	A4	Peso:	



Padrão 2 - inclinado

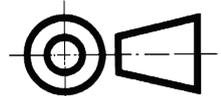


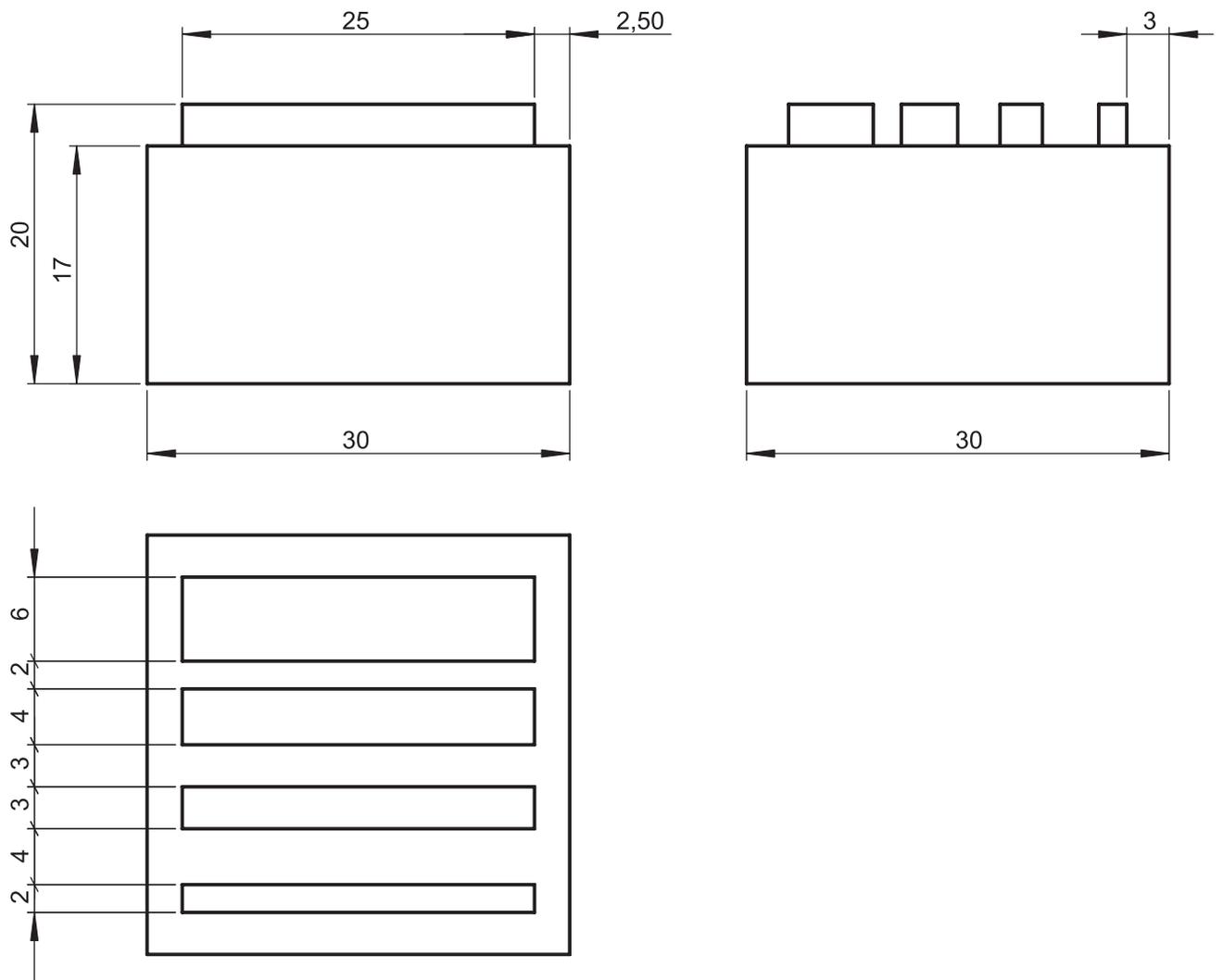


	Data	Assin.	Escala 2:1	em substituição de		Material: gesso pedra aço SAE 1020 riodacito
Des.	22/05/2011		Unidade: mm	substituído por		
Visto	22/05/2011		Folha 1/1	A4	Peso:	



Padrão 3 - côncavo

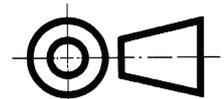


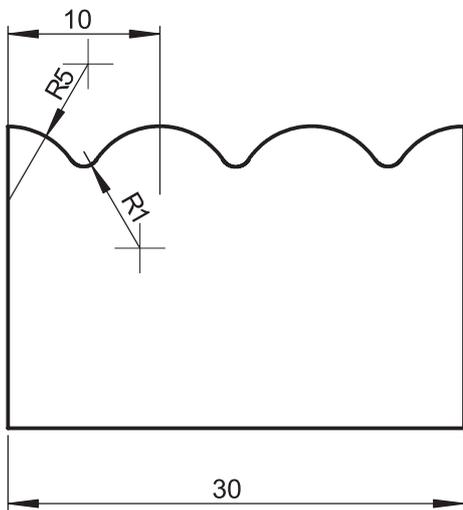


	Data	Assin.	Escala 2:1	em substituição de		Material: gesso pedra aço SAE 1020 riodacito
Des.	22/05/2011		Unidade: mm	substituído por		
Visto	22/05/2011		Folha 1/1	A4	Peso:	



Padrão 4 - quadrático

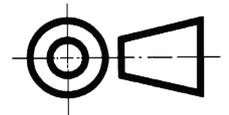


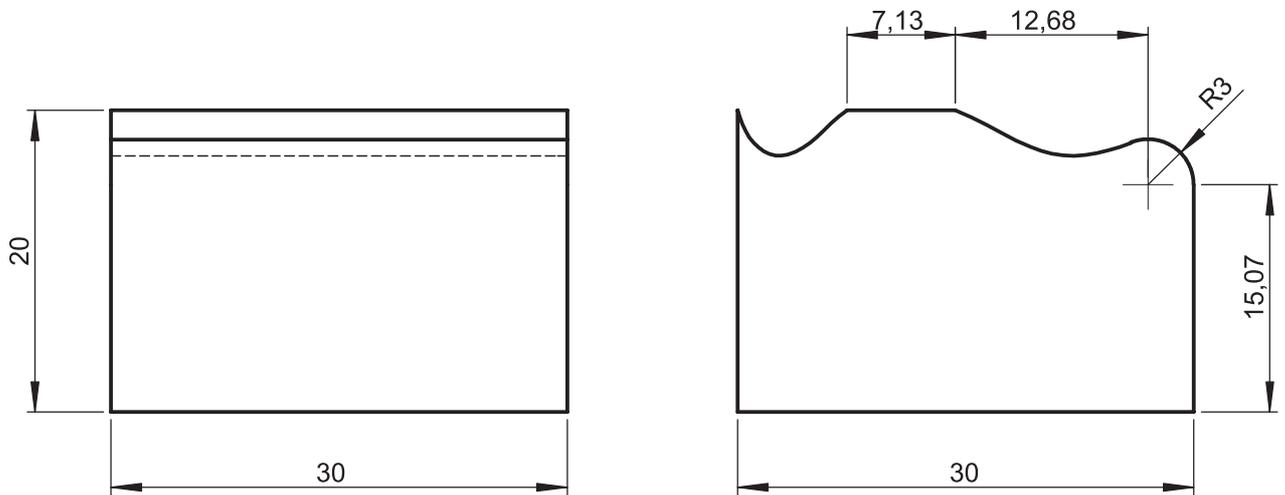


	Data	Assin.	Escala 2:1	em substituição de		Material: gesso pedra aço SAE 1020 riodacito
Des.	22/05/2011		Unidade: mm	substituído por		
Visto	22/05/2011		Folha 1/1	A4	Peso:	



Padrão 5 - ondulado

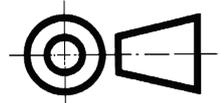


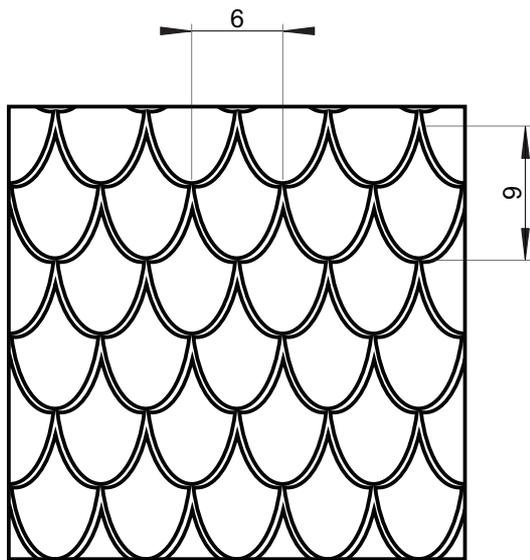
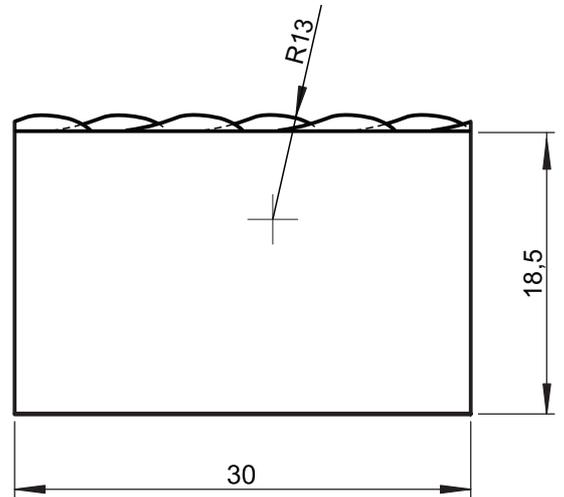
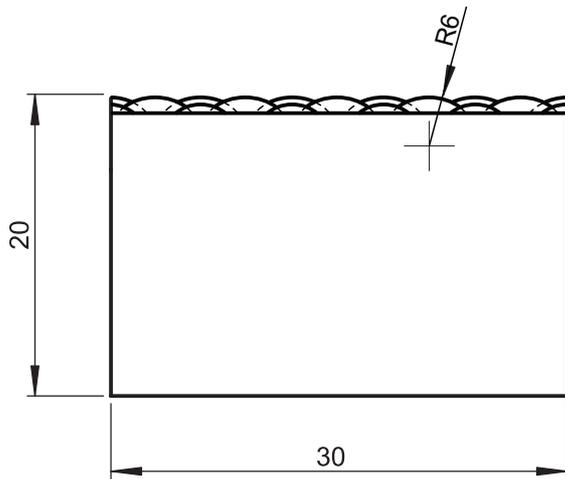


	Data	Assin.	Escala 2:1	em substituição de		Material: gesso pedra aço SAE 1020 riodacito
Des.	22/05/2011		Unidade: mm	substituído por		
Visto	22/05/2011		Folha 1/1	A4	Peso:	



Padrão 6 - livre

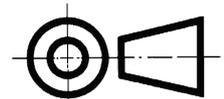


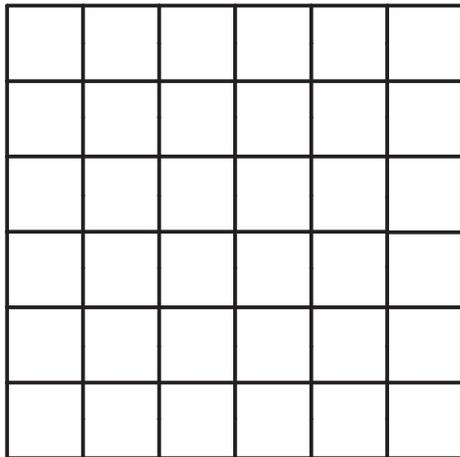
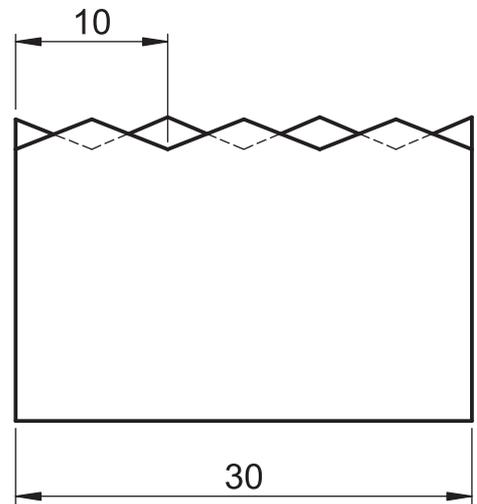
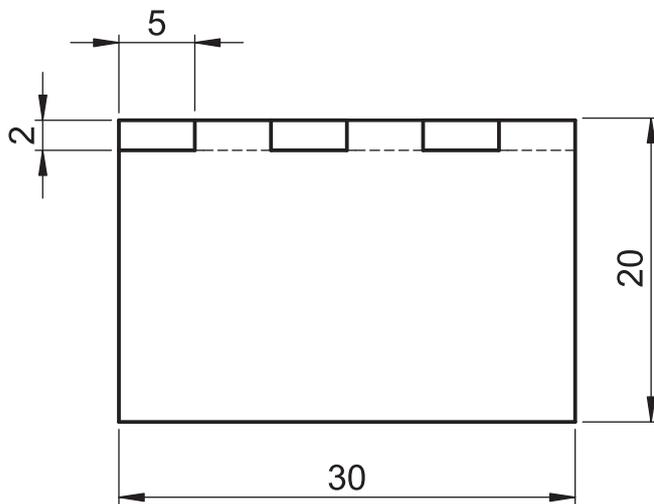


	Data	Assin.	Escala 2:1	em substituição de		Material: riodacito  Textura orgânica; cotas de referência
Des.	21/09/2013		Unidade: mm	substituído por		
Visto	21/09/2013		Folha 1/1	A4	Peso:	



Textura Escama





	Data	Assin.	Escala 2:1	em substituição de		Material: riodacito
Des.	21/09/2013		Unidade: mm	substituído por		
Visto	21/09/2013		Folha 1/1	A4	Peso:	



Textura Zigue-Zague

