

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Efeito da resistência e da dimensão máxima característica do
agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto de
alto desempenho**

Abrahão Bernardo Rohden

Porto Alegre
2011

ABRAHÃO BERNARDO ROHDEN

Efeito da resistência e da dimensão máxima característica do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientação: Prof.^a Dra. Denise Carpena Coitinho Dal Molin.

Co-orientação: Prof.^a Dra. Ana Paula Kirchheim.

Porto Alegre
2011

XXXXx Rohden, Abrahão Bernardo

Efeito da resistência e da dimensão máxima característica do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho / Abrahão Bernardo Rohden. – 2011.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia Civil. Porto Alegre, RS-BR, 2011.

Orientação: Prof^a. Dr^a. Denise Carpena Coitinho Dal Molin e Prof^a. Dr^a. Ana Paula Kirchheim.

1. Concreto de alto-desempenho. 2 Agregado graúdo – Ensaios. I Dal Molin, Denise Carpena Coitinho, orient. II. Kirchheim, Ana Paula, co-orient. III. Título.

CDU-691.XX(0XX)

ABRAHÃO BERNARDO ROHDEN

Efeito da resistência e da dimensão máxima característica do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho

Prof. Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Doutora pela USP
orientadora

Prof. Ana Paula Kirchheim
Doutora pela UFRGS
co-orientadora

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Jose Marques Filho (UFPR)
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Prof. . Jairo José de Oliveira Andrade (PUCRS)
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Profª. Angela Borges Masuero (UFRGS)
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Dedico este trabalho a minha família à minha
mãe, minhas irmãs e ao meu pai.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela bolsa de estudos que possibilitou a minha total dedicação aos meus estudos.

Agradeço à Professora Denise Carpena Coitinho Dal Molin, orientadora deste trabalho.

Agradeço à Professora Ana Paula Kirchheim, co-orientadora deste trabalho.

Agradeço aos meus colegas de turma do Núcleo Orientado para Inovação da Edificação, Renata Tubelo, Christiane Cunha Krum, Aretusa Oliveira Rodrigues, Carina Mariane Stolz, Josiane Gasperin, Cristina Vitorino Da Silva, Patrícia Carone Poyastro, Platão Tavares Alves da Fonseca, e principalmente à aqueles que pelo convívio diário me aprendi chamar de amigos, muito obrigado Santiago Muñoz Navarrete, Daniela Dietz Viana e Bruno Pontes Mota.

Agradeço aos colegas do Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais, Luciane Fonseca Caetano, Vânia Peres e ao Josué Chies.

Agradeço ao Professor João Ricardo Masuero e à todos os professores do Núcleo Orientado para Inovação da Edificação.

Agradeço ao Professor Heinrich Theodor Frank à todas as informações geológicas que ajudaram na seleção dos pontos de coletas de rochas e por todas as informações prestadas.

Agradeço ao Professor Luiz Carlos da Silva Pinto Filho.

E finalmente agradeço a Deus.

RESUMO

ROHDEN, A. B. Efeito da resistência e da dimensão máxima característica do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

O emprego de concreto com resistência à compressão ultrapassando 100 MPa e o aumento do número de aplicações do concreto de alto desempenho em diferentes regiões do país mostra que há espaço para a consolidação desta tecnologia no meio técnico nacional. Contudo na medida em que se eleva a resistência à compressão dos concretos, os agregados passam a exercer um papel cada vez mais importante no comportamento global do material. A busca constante pelo entendimento preciso da influência das características do agregado nas propriedades do concreto tem despertado o interesse de diversos trabalhos em todo o mundo. O objetivo deste trabalho foi estudar a influência da resistência à compressão da rocha e a influência da dimensão máxima característica do agregado graúdo, nas propriedades mecânicas de concretos no estado endurecido produzidos com diferentes consumos de água (200, 160, 145, 130 e 115 litros de água). Para a produção do concreto utilizou-se como referência os princípios estabelecidos no método de dosagem proposto por Mehta e Aïtcin (1990). A metodologia baseou-se em ensaios laboratoriais e no uso de ferramentas estatísticas para validação dos resultados. Com base nesses resultados obtidos foram propostos modelos de previsão de comportamento. Em termos de resistência à compressão observou-se que a influência da dimensão máxima característica é maior para concretos produzidos com consumo de água menor. Quanto à resistência do agregado, os resultados obtidos neste trabalho negam a teoria da resistência potencial do agregado. A resistência à tração mostrou-se somente influenciada pelo consumo de água. O módulo de elasticidade do concreto, no entanto foi diretamente influenciado pela resistência da rocha.

Palavras-chave: agregado graúdo; concreto de alto desempenho; dosagem.

ABSTRACT

ROHDEN, A. B. Effect of compressive strength and the maximum size of coarse aggregate characteristics on mechanical properties of high performance concrete. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The use of concrete with compressive strength of 100 MPa and the number of applications of high performance concrete in different regions of Brazil shows that this technology seeks to consolidate the national technical means. But to the extent that amounts to the compressive strength of concrete, aggregates start to exert an increasingly important role in the global behavior of the material. The objective was to study the influence of the compressive strength of rock and the influence of maximum size of coarse aggregate characteristic, the mechanical properties of concrete in hardened produced with different water consumption (200, 160, 145, 130 and 115 liters of water). To produce the dosage of concrete was used as a reference the principles of the determination method proposed by Mehta and Aïtcin (1990). The methodology is based on laboratory tests and the use of statistical tools to validate the results. Based on these results were proposed prediction models of behavior. In terms of compressive strength was observed that the influence of the characteristic maximum dimension is greater for concretes with lower water consumption. As the aggregate's resistance, the results obtained in this work deny the theory of the potential resistance. The tensile strength was found to be only influenced consumption of water. The modulus of elasticity of the concrete, however it was influenced by the strength of the aggregates.

Key-words: coarse aggregate, high performance concrete; dosage.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Importância e Justificativa do Tema.....	18
1.2. Contextualização das Pesquisas na Área.....	19
1.3. Objetivos.....	21
1.4. Estrutura do Trabalho.....	22
2. FATORES QUE INFLUENCIAM AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO	23
2.1. Relação água/aglomerante.....	23
2.2. Volume de vazios do esqueleto granular.....	27
2.3. Forma dos grãos do agregado graúdo	29
2.4. Resistência do agregado.....	32
2.5. Dimensão máxima característica do agregado graúdo	36
2.6. Distribuição granulométrica dos agregados.....	38
2.7. Textura superficial do agregado graúdo.....	43
2.8. Mineralogia do agregado graúdo.....	44
2.9. Teor de Agregado Graúdo.....	46
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	49
3.1. Estudo exploratório para seleção das rochas utilizadas no trabalho	49
3.1.1. Ensaio de resistência à compressão.....	50
3.1.2. Análise granulométrica.....	53
3.1.3. Índice de forma	56
3.1.4. Conclusão do estudo exploratório	57
3.2. Seleção e caracterização dos materiais.....	58
3.3. Escopo da pesquisa.....	63
3.4. Variáveis	63
3.4.1. Variáveis independentes.....	63
3.4.2. Variáveis de resposta.....	65
3.4.3. Fatores não variáveis do estudo	66
3.5. Matriz experimental.....	69
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	71
4.1. Resistência à compressão.....	71
4.1.1. Efeito do fator consumo de água na resistência à compressão.....	74
4.1.2. Efeito do fator resistência à compressão da rocha na resistência à compressão do concreto	76

4.1.3. Efeito do fator dimensão máxima característica na resistência à compressão do concreto	79
4.1.4. Interações	81
4.1.5. Modelo matemático para estimativa da resistência à compressão do concreto.....	83
4.2. Resistência à tração.....	96
4.2.1. Efeito do fator consumo de água na resistência à tração por compressão diametral do concreto	99
4.2.2. Efeito do fator resistência à compressão da rocha na resistência à tração por compressão diametral do concreto.....	100
4.2.3. Efeito do fator dimensão máxima característica do agregado na resistência à tração por compressão diametral do concreto	101
4.2.4. Modelo matemático para estimativa da resistência à tração por compressão diametral do concreto	102
4.2.5. Modelo matemático para correlação entre a resistência à compressão média e a resistência à tração por compressão diametral média do concreto.....	103
4.3. Módulo de elasticidade.....	105
4.3.1. Efeito do fator consumo de água no módulo de elasticidade do concreto.....	108
4.3.2. Efeito do fator resistência à compressão da rocha no módulo de elasticidade do concreto	109
4.3.3. Efeito do fator dimensão máxima característica do agregado no módulo de elasticidade do concreto.....	110
4.3.4. Modelo matemático para estimativa do módulo de elasticidade do concreto.....	111
4.3.5. Modelo matemático para correlação entre a resistência à compressão média e a resistência da rocha com o módulo de elasticidade do concreto.....	113
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	119
5.1. Conclusões	119
5.1.1. Em relação à resistência à compressão	119
5.1.2. Em relação à resistência à tração	121
5.1.3. Em relação ao módulo de elasticidade	122
5.2. Sugestões para pesquisas futuras.....	123
REFERÊNCIAS	124
APÊNDICE 1 - PROJETO EXPERIMENTAL FRACIONADO.....	130
APÊNDICE 2 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPA).....	131
APÊNDICE 3 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPA)	132
APÊNDICE 4 – RESULTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPA)	133
ANEXO 1 - RESULTADOS DE PACELLI DE ANDRADE, 1997	134

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 - dependência entre a resistência e a relação água/aglomerante (adaptado de neville, 1997).....	24
Figura 2 - empacotamento de partículas (fonte: formagini, 2005).....	27
Figura 3 - graus de esfericidade e arredondamento (fonte abnt nbr 7389, 2009).....	30
Figura 4 - agregado com índice de forma 4,0 (a) e 1,8 (b) (arndt; souza; bianchini, 2007)31	
Figura 5 - teor de agregado graúdo (aïtcin, 2000).....	47
Figura 6 – locais de coleta de amostras localizados próximos a região metropolitana de porto alegre.....	50
Figura 7 - bancada de extração de rocha (a) basáltica em montenegro (b) e granítica em eldorado do sul.....	51
Figura 8 - análise granulométrica da brita zero coletada nos britadores.....	54
Figura 9 - análise granulométrica da brita 1 coletada nos britadores.....	55
Figura 10 - partículas sendo analisadas quanto ao seu índice de forma.....	56
Figura 11 - índice de forma dos agregados brita 1 e brita 0 das diferentes empresas de britagem.....	57
Figura 15 – curva granulométrica do cimento portland de alta resistência inicial utilizado.....	59
Figura 16 – curva granulométrica da sílica ativa utilizada.....	60
Figura 17 – curva granulométrica do agregado miúdo utilizado.....	61
Figura 12 - relação agregado miúdo: agregado graúdo em função do consumo de água por metro cúbico de concreto.....	67
Figura 13 – curvas granulométricas correspondentes às dimensões máximas características de 25 – 19 - 12,5 – 9,5 – 6,3 mm.....	68
Figura 14 - matriz experimental utilizada no presente trabalho.....	69
Figura 18 - efeito do consumo de água na resistência à compressão média do concreto74	
Figura 19 – resistência à compressão média e consumo de cimento por 10 mpa de resistência para cada consumo de água.....	75
Figura 20 - efeito da resistência à compressão da rocha na resistência à compressão média do concreto.....	76
Figura 21 - efeito da dimensão máxima característica do agregado graúdo na resistência à compressão média do concreto.....	79
Figura 22 – efeito da interação entre o consumo de água e a resistência à compressão da rocha.....	81
Figura 23 - efeito da interação do consumo de água e da dimensão máxima característica.....	82
Figura 24 - efeito da interação da dimensão máxima característica e da resistência à compressão da rocha.....	82

Figura 25 – valores de resistência à compressão observados (exp.) E valores estimados (est.) Pelo modelo polinomial, para os concretos produzidos com agregado de resistência à compressão de 220 mpa	84
Figura 26 – valores de resistência à compressão observados (exp.) E valores estimados (est.) Pelo modelo polinomial, para os concretos feitos com agregado de resistência à compressão de 150 mpa	85
Figura 27 – valores de resistência à compressão observados (exp.) E valores estimados (est.) Pelo modelo polinomial, para os concretos feitos com agregado com resistência à compressão de 130 mpa	86
Figura 28 – valores de resistência à compressão observados (exp.) E valores estimados (est.) Pelo modelo de feret modificado, para o concreto feito com agregado com resistência à compressão de 220 mpa	89
Figura 29 – valores de resistência à compressão observados (exp.) E valores estimados (est.) Pelo modelo de feret modificado, para o concreto feito com agregado com resistência à compressão de 150 mpa	90
Figura 30 – valores de resistência à compressão observados (exp.) E valores estimados (est.) Pelo modelo de feret, para o concreto feito com agregado com resistência à compressão de 130 mpa	91
Figura 31 – valores de resistência à compressão observados e valores estimados pelo modelo abrams, para o concreto feito com agregado com resistência à compressão de 220 mpa	93
Figura 32 – valores de resistência à compressão observados verso valores estimados pelo modelo de abrams, para o concreto feito com agregado com resistência à compressão de 150 mpa	94
Figura 33 – valores de resistência à compressão observados verso valores estimados pelo modelo de abrams, para o concreto feito com agregado com resistência à compressão de 130 mpa	95
Figura 34 - efeito do consumo de água na resistência à tração por compressão diametral média do concreto	99
Figura 35 - efeito da resistência à compressão da rocha na resistência à tração por compressão diametral média do concreto	100
Figura 36 - efeito da dimensão máxima característica do agregado na resistência à tração por compressão diametral média do concreto	101
Figura 37 - efeito do consumo de água na resistência à tração por compressão diametral média do concreto, aos 28 dias	103
Figura 38 – correlação entre a resistência à compressão e a resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias	104
Figura 39 - efeito do consumo de água no módulo de elasticidade médio do concreto aos 28 dias	108
Figura 40 - efeito da resistência à compressão da rocha no módulo de elasticidade médio do concreto	109
Figura 41 - efeito da dimensão máxima característica da rocha no módulo de elasticidade médio do concreto	110

Figura 42 - efeito da resistência à compressão da rocha e do consumo de água no módulo de elasticidade médio do concreto, aos 28 dias	112
Figura 43 – correlação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade médio do concreto valores experimentais (exp.) E valores estimados pelo modelo (est.).....	114
Figura 44 – correlação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade médio do concreto	117

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - resistências encontradas para diferentes rochas (neville, 1997).....	35
Tabela 2 - classificação da textura superficial dos agregados (bs 812: parte 1 (1975) apud neville (1997))	43
Tabela 3 – propriedades do concreto afetadas pelas propriedades do agregado (sidney e francis (1981) apud pompeu (2004)).....	45
Tabela 4 - identificação das rochas pesquisadas neste estudo exploratório e suas principais características	52
Tabela 5 - resistência à compressão das rochas – estudo exploratório.....	53
Tabela 6 – composição granulométrica das amostras de brita 0 coletadas	54
Tabela 7 – composição granulométrica das amostras de brita 1 coletadas	55
Tabela 9 – características químicas do cimento portland cp v ari empregado	58
Tabela 10 – características físicas e mecânicas do cimento portland cp v ari.....	58
Tabela 11 – composição granulométrica resumida do cpv ari	59
Tabela 12 – composição granulométrica resumida da sílica ativa	60
Tabela 13 – caracterização física do agregado miúdo.....	61
Tabela 14 – caracterização física do agregado graúdo.....	62
Tabela 8 – fração total de material aglomerante e relação agregado miúdo: agregado graúdo em função do teor de água por metro cúbico	67
Tabela 15 - resistência à compressão aos 28 dias de idade (mpa).....	72
Tabela 16 – análise de variância (anova) para resistência à compressão	73
Tabela 17 – estudo experimental (zhou, lydon e barr, 1995)	78
Tabela 18 - resistência à tração por compressão diametral, aos 28 dias (mpa).....	97
Tabela 19 – análise de variância (anova) para resistência à tração por compressão diametral.....	98
Tabela 20 – módulo de elasticidade, aos 28 dias (gpa)	106
Tabela 21 – análise de variância (anova) para módulo de elasticidade.....	107

1. INTRODUÇÃO

Concretos de alto desempenho (CAD) são concretos compostos de agregados graúdo e miúdo, aglomerantes, aditivos e água. O que o diferencia do concreto convencional é a baixa relação água/aglomerante. Um valor de cerca de 0,40 é sugerido como fronteira entre concretos convencionais e de alto desempenho (AİTCIN, 2000; MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Neville (1997) afirma que os concretos de alto desempenho não são materiais revolucionários, mas sim uma evolução dos concretos convencionais. Mehta e Aİtcin (1990), sugerem que a alta fluidez, a alta resistência e a alta durabilidade seriam as propriedades que caracterizariam o CAD.

Kim, Yoon e Lim (2003) sugerem que a maior diferença entre os concretos convencionais e os concretos de alto desempenho é o uso de produtos químicos como redutores de água e de adições minerais.

Os concretos de alto desempenho diferenciam-se, ainda, dos concretos de altíssimo desempenho e dos concretos pós reativos, que são materiais produzidos com consumos de aglomerante acima de 1.000 quilogramas por metro cúbico e agregados com dimensão menor que 2 mm (VANDERLEI, 2004; FORMAGINI, 2005).

Yves Malier, no prólogo do livro “Concreto de Alto Desempenho”, escrito por Aİtcin (2000), afirma que desde os tempos pré-históricos, a vida dos homens tem sido completamente condicionada pela sua capacidade de dominar o uso dos materiais.

O emprego do concreto ocorreu após o depósito da patente do cimento Portland por Joseph Aspdin, em 1824, na Inglaterra. Naquela época, os primeiros concretos eram produzidos utilizando cimento Portland, areia, brita e água, que tinha como função hidratar o cimento e tornar a mistura fluida. Mas a resistência à compressão dificilmente ultrapassava o valor de 10 MPa (FORMAGINI, 2005).

O concreto convencional, tipicamente, contém 12% de cimento, 8% de água de amassamento e 80% de agregado, em massa. Isso significa que além dos 1,5 bilhão de toneladas anuais de cimento consumidos hoje pela indústria do concreto, consome-se anualmente 9 bilhões de toneladas de areia e rocha e 1 bilhão de água de amassamento. Essa indústria de 11,5 bilhões de toneladas ao ano é a maior consumidora de recursos naturais do mundo. A expectativa é que a demanda por concreto cresça para cerca de 16 a 18 bilhões de toneladas por ano em 2050. A mineração, o processamento e o transporte de uma imensa quantidade de agregado, acrescentada aos bilhões de toneladas de matéria-prima necessária para a fabricação do cimento, consumirão grande quantidade de energia e afetarão negativamente a ecologia da Terra (MEHTA e MONTEIRO, 2008)

A preocupação mundial com o desenvolvimento sustentável tem imposto restrições ao uso de matérias-primas não renováveis. Esse fato tem reflexo importante nas estruturas de concreto, visto que o cimento é composto de materiais não renováveis e que sua produção consome níveis elevados de energia. Além disso, os agregados empregados no concreto também são materiais não renováveis, o que tem levado à produção mais racional do concreto, passando pela incorporação de materiais alternativos na fabricação do cimento, bem como pelo aumento da durabilidade (vida útil) das estruturas de concreto (ALHADAS, 2008).

No estudo do concreto, os agregados graúdos desempenham um importante papel na mistura com as argamassas, seja do ponto de vista econômico, como técnico, pois ocupam cerca de 60 a 80% do volume, influenciando sobremaneira na resistência, estabilidade dimensional e durabilidade. Além destas propriedades importantes do concreto endurecido, os agregados também têm um papel fundamental na determinação do custo e da trabalhabilidade. A qualidade do concreto tradicionalmente é caracterizada pela resistência à compressão, sendo a propriedade mais valorizada e que governa os projetos, a fabricação e o controle dos lotes de concretos (NEVILLE, 1997; POMPEU, 2004).

As estruturas de concreto armado no Brasil são bastante difundidas e fazem parte do padrão da construção no país. O estudo de novas técnicas e métodos de análises dos materiais à base de cimento se torna de grande relevância para inovações relacionadas à eficiência e desempenho (VANDERLEI, 2004).

A opção pelo uso do concreto de alto desempenho pode levar à redução das dimensões ou do número de elementos estruturais, do custo e do tempo de execução de estruturas de concreto e também ao aumento potencial da durabilidade. O emprego do concreto de alto desempenho é mais vantajoso no caso de elementos estruturais submetidos à compressão, sendo a relação tensão de compressão-deformação uma característica importante do concreto para análise do comportamento desses elementos (PAULA, 2007).

Dal Molin e Wolf (1990) realizaram um trabalho sobre o custo da estrutura de um edifício de 15 pavimentos, quando a mesma era executada com um concreto de f_{ck} 60 MPa (CAD) comparativamente com um de f_{ck} 21 MPa. Neste estudo, realizado no Rio Grande do Sul, foi avaliado o custo da mão de obra e do material, verificando-se que o edifício com f_{ck} de 60 MPa apresentou um custo global 12% inferior ao obtido com o edifício executado com concreto de f_{ck} de 21 MPa, mesmo sendo o custo de produção deste concreto superior ao custo do concreto de 21 MPa.

Inicialmente, para se obter concreto de alto desempenho, é necessário verificar o panorama dos agregados disponíveis, uma vez que a resistência à compressão do concreto não é mais, necessariamente, governada pela resistência da pasta da matriz, como ocorre com os concretos convencionais. No CAD o que define a resistência à compressão é a resistência do agregado ou sua interface com a pasta. Desta maneira, o agregado graúdo deixa de ser considerado apenas um material de enchimento e se torna o fator limitante da resistência do CAD, que passa a ser controlada pelas características físicas, mecânicas e mineralógicas da rocha utilizada. Entretanto, por motivos de economia, os agregados graúdos empregados no concreto usualmente são os disponíveis nas jazidas próximas à obra. Sendo assim, é fundamental que se conheça o desempenho dos agregados produzidos na região (MENDES, 2002).

Assim o presente trabalho busca avaliar a influência de duas características do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho. A primeira é a resistência à compressão do agregado e a segunda é a dimensão máxima característica.

1.1. IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO TEMA

No início da década de 70, concretos com resistência à compressão entre 40 e 50 MPa começaram a ser empregados na construção de pilares em edifícios altos, principalmente nos países mais desenvolvidos. Com o passar dos anos, estes concretos, que apresentavam alta resistência à compressão, ficaram conhecidos como CAD (Concreto de Alto Desempenho) porque, além da resistência à compressão elevada, percebeu-se que eles apresentavam durabilidade superior à do concreto convencional, devido à sua baixa porosidade. Assim, a denominação de concreto de alto desempenho inclui, além da resistência, outros parâmetros, como trabalhabilidade, bombeabilidade e deformabilidade (FORMAGINI, 2005; PAULA, 2007).

Nos Estados Unidos, em geral, são considerados concretos de alto desempenho os com resistência à compressão maior que 40 MPa, enquanto na Europa considera-se resistência maior que 50 MPa. Nos últimos 25 anos houve um aumento substancial do número de pesquisas e aplicações do CAD. Em vários países, há casos de sua aplicação em estruturas em ambientes agressivos, pilares de edifícios altos, pontes e viadutos, estruturas *offshore*, elementos pré-moldados, pisos industriais e silos (PAULA, 2007).

Almeida (2005) relata que no ano de 1996 foi realizado um levantamento, no Brasil, que revelou a existência de diversos centros onde eram desenvolvidas pesquisas sobre CAD, sendo estes situados, na maioria das vezes, em universidades públicas, em estudos do comportamento estrutural ou da tecnologia do concreto. Até o ano 2005, o Brasil apresentou elevado crescimento no número de grupos dedicados ao tema, sendo mais fácil identificar os estados onde não há pesquisas nesta área do que aqueles onde há. Existe ainda uma grande diversidade de aplicações práticas do material em edifícios comerciais e residenciais, prédios públicos, recuperações estruturais, elementos de barragens, pré-moldados, bases de máquinas pesadas, pisos industriais, pavimentos de aeroporto, reservatórios de água e pontes. Naquela época algumas centrais dosadoras de concreto já dispunham comercialmente de concretos com resistência característica à compressão de até 80 MPa (ALMEIDA, 2005).

Atualmente algumas cidades brasileiras se destacam pelo uso de concreto com elevada resistência. O edifício “Evolution Towers”, por exemplo, em Curitiba, empregou em diversos pilares e em blocos de fundação (aproximadamente 1.060 m³) concreto com

resistência característica de 60 MPa (MENDES, 2002). Em São Paulo foi construído o edifício E-Tower, empregando concreto de resistência à compressão de 125 MPa em 5 pilares (NETO, 2005). Na cidade de Ponta Grossa, interior do Paraná, aplicou-se um CAD de 90 MPa nos principais pilares de um centro empresarial, consumindo um total de 141 m³ deste concreto (CHRISTÓFOLLI, INOUE e FREITAS, 2007).

O emprego de concreto com resistência à compressão ultrapassando 100 MPa e o aumento do número de aplicações do concreto de alto desempenho em diferentes regiões do país mostra que há espaço para a consolidação desta tecnologia no meio técnico nacional. Para tanto, torna-se importante desenvolver estudos que auxiliem na tomada de decisão quanto à seleção dos agregados a serem utilizados na produção de concreto de alto desempenho. Tendo em vista esta demanda prática, este trabalho pretende criar um modelo através do qual seja possível quantificar a influência da resistência da rocha utilizada na produção do agregado bem como a influência da sua dimensão máxima nas suas propriedades mecânicas.

1.2. CONTEXTUALIZAÇÃO DAS PESQUISAS NA ÁREA

A busca constante pelo entendimento preciso da influência das características do agregado nas propriedades do concreto tem despertado o interesse de diversos trabalhos em todo o mundo (OZTURAN e CENEN, 1997; CHI et al 2001; KE-RU-WU et al; 2001; AJDUKIEWICZ e KLISZCZEWICZ, 2002; POMPEU, 2004 entre outros). Na medida em que se eleva a resistência à compressão dos concretos, os agregados passam a exercer um papel cada vez mais importante no comportamento global do material. Há quem considere que, com exceção dos concretos leves, é no CAD que pela primeira vez os agregados participam ativamente das propriedades mecânicas dos concretos (ALMEIDA, 2005).

Chi et al. (2001) investigaram o efeito do agregado graúdo nas propriedades mecânicas de concretos feitos a partir de agregados leves. No seu estudo os autores produziram traço de concreto com três relações água/cimento (0,3; 0,4 e 0,5) com três agregados com diferentes densidades (1,65; 1,69 e 1,76). Os autores concluíram que as propriedades do agregado e a relação água/aglomerante são dois fatores importantes tanto para resistência à compressão quanto para o módulo de elasticidade dos concretos pesquisados.

Ozturan e Cenen (1997), ao estudarem o efeito do tipo de agregado graúdo na resistência à compressão de concretos de diferentes resistências, relatam que concretos produzidos com agregados graúdos de origem basáltica alcançam resistências à compressão entre 10 e 20% superiores, quando comparados aos concretos produzidos com agregado calcário. O estudo contemplou três níveis de resistência projetada: 30, 60 e 90 MPa. Os autores verificaram que para os concretos de 30 MPa as diferenças entre as resistências à compressão foram pequenas para os diferentes tipos de agregados utilizados. Este estudo no entanto não identificou a resistência das rochas utilizadas.

Da mesma forma, KE-RU-WU et al. 2001 mostraram que as propriedades mecânicas do concreto são influenciadas pelas características dos agregados. Os autores pesquisaram o efeito do tipo de agregado graúdo britado (quartzito, mármore e calcário) sobre os níveis de resistência à compressão, a energia de ruptura e o módulo de elasticidade em concretos com resistência à compressão de 30, 60 e 90 MPa. No estudo se verificou que em concretos com relação água/aglomerante de 0,55, a resistência das rochas não apresenta influência sobre a resistência do concreto. Contudo, em concretos com relação água/aglomerante de 0,26, a resistência à compressão do concreto produzido com rocha de 95 MPa foi de 80 MPa. Já concretos produzidos com rocha de 150 MPa foi de 100 MPa para a mesma relação água/aglomerante.

Pompeu (2004) investigou o efeito do tipo, tamanho e teor de agregado graúdo na resistência e energia de fratura do concreto. O estudo concluiu que a influência do tipo de agregado graúdo na resistência do concreto é mais significativa em concretos com maior resistência. Concretos feitos com basalto obtiveram resistências 40% maiores, quando comparados com os concretos feitos com granito. Neste estudo não foram relacionadas, no entanto, as propriedades mecânicas do concreto às propriedades mecânicas das rochas utilizadas. Utilizaram-se dois tipos de rochas, basalto e granito, e duas dimensões máximas características, 9,5 e 19 mm, contemplando concretos com resistências à compressão da ordem de 50 a 100 MPa.

Ma e Orgass (2004) compararam as propriedades de dois concretos, um com agregado graúdo basáltico e outro com pó reativo com a mesma resistência à compressão. Os autores concluíram que o concreto contendo agregado graúdo foi fluidificado e homogeneizado mais facilmente e, no estado endurecido, apresentou módulo de

elasticidade mais elevado que o concreto com pó reativo. Segundo os autores, isso se deve à presença de basalto como agregado graúdo.

Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002) afirmam que o significativo desenvolvimento da aplicação de concreto de alto desempenho na última década em vários países, exige um cuidado maior na adoção de parâmetros do projeto estrutural. Na análise dos estados limites de utilização e também em alguns casos no estado limite último, assim estimativa das propriedades mecânicas dos concretos de alto desempenho tem de ser muito criteriosa. Isto por que os materiais podem ter propriedades muito diferentes de país para país e muitas vezes de região para região.

O consenso da literatura aqui retratado, a respeito da influência das características dos agregados graúdos, torna atrativa e instigante a possibilidade de modelar este fenômeno através de pesquisas laboratoriais que verifiquem quais propriedades do agregado graúdo são as mais importantes para alcançar as melhores propriedades mecânicas do concreto.

1.3. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal verificar a relação existente entre a resistência à compressão da rocha utilizada como agregado graúdo, bem como a sua dimensão máxima característica, na resistência à compressão, na resistência à tração e no módulo de elasticidade do concreto de alto desempenho com diferentes relações água/aglomerante.

Como objetivos específicos propõem-se criar modelos:

- que considerem a influência da resistência da rocha, da dimensão máxima característica do agregado e do consumo de água na resistência à compressão do concreto de alto desempenho;
- que considerem a influência da resistência da rocha, da dimensão máxima característica do agregado e do consumo de água na resistência à tração do concreto de alto desempenho;

- que considerem a resistência da rocha, a dimensão máxima característica do agregado e o consumo de água no módulo de elasticidade do concreto de alto desempenho;
- que relacionem a resistência à compressão do concreto com a resistência a tração;
- que relacionem a resistência à compressão do concreto e a resistência da rocha com o módulo de elasticidade do concreto.

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho de pesquisa apresenta-se organizado nos seguintes capítulos:

O capítulo 1, que apresenta a introdução da pesquisa, a importância e justificativa do tema e a contextualização das pesquisas na área.

O capítulo 2 inclui considerações sobre os principais fatores que influenciam as propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho. A relação água/aglomerante, o volume de vazios do esqueleto granular, a forma dos grãos do agregado granular, a resistência do agregado, a dimensão máxima característica do agregado graúdo, a distribuição granular dos agregados, a textura superficial do agregado graúdo, a mineralogia do agregado graúdo e o teor de agregado graúdo.

O capítulo 3 apresenta o programa experimental adotado para a realização da pesquisa, o estudo exploratório realizado para seleção das rochas utilizadas no trabalho, o escopo da pesquisa, as variáveis independentes, a apresentação da matriz experimental, a seleção e caracterização dos materiais, os elementos não variáveis do estudo e as variáveis de resposta.

O capítulo 4 apresenta os resultados do trabalho experimental e a análise dos resultados de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade. Também são apresentados os modelos de regressão criados a partir dos dados experimentais.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões e considerações finais sobre os resultados obtidos nesta pesquisa, bem como algumas sugestões para pesquisas futuras.

2. FATORES QUE INFLUENCIAM AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

A resistência do concreto convencional é regida, basicamente, pela microestrutura da zona de transição entre a pasta de cimento hidratada e o agregado, fase que limita a transferência de tensões entre a pasta de cimento e agregado, particularmente o gráudo. Assim, as propriedades mecânicas do agregado gráudo não influenciam muitas das propriedades mecânicas dos concretos convencionais (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A microestrutura da pasta no concreto de alto desempenho é muito mais densa e apresenta uma zona de transição mais delgada ou mesmo inexistente. Diferentemente dos concretos convencionais, as propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho são influenciadas pelas propriedades mecânicas do agregado gráudo. Isto implica que a lei consagrada da relação água/aglomerante não é mais verdadeira quando o agregado utilizado no concreto de alto desempenho torna-se o elo mais fraco (AÏTCIN, 2000).

Este capítulo apresenta os principais fatores que afetam as propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho.

2.1. RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTE

A resistência dos concretos convencionais produzidos a partir dos mesmos materiais a uma certa idade, curados em água, a uma temperatura estabelecida, depende de apenas dois fatores: da relação água/cimento e do grau de adensamento (NEVILLE, 1997). Essa afirmação pode parecer um ponto de vista simplista, contudo, a formulação e a validação de métodos de dosagem, como EPUSP/IPT e ACI 211.1, a confirmam (HELENE, TERZIAN, 1992; ACI Committee 211.1, 1991).

No ano de 1896, René Féret formula uma regra geral (Equação 1) que relaciona a resistência do concreto com os volumes de cimento, água e ar (NEVILLE, 1997).

$$f_c = k \left(\frac{c}{c + a + v} \right)^2 \quad \text{Equação 1}$$

Onde: c – proporção volumétrica de cimento;

a – proporção volumétrica de água;

v – proporção volumétrica de ar;

k – constante empírica.

Estando plenamente adensado, o concreto tem uma proporção volumétrica de ar incorporado de cerca de 1% e sua resistência à compressão pode, então, ser dada como uma relação inversamente proporcional à relação água/aglomerante. Essa regra foi estabelecida por Duff Abrams em 1919, Equação 2 (NEVILLE, 1997).

$$f_c = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde: a/c – relação água/cimento da mistura tomada em volume;

k_1 e k_2 – constantes empíricas.

Neville (1997) constatou que a validade da regra da relação água/cimento é limitada a um intervalo onde o adensamento pleno é possível. O limite inferior deste intervalo depende do meio de adensamento disponível (Figura 1).

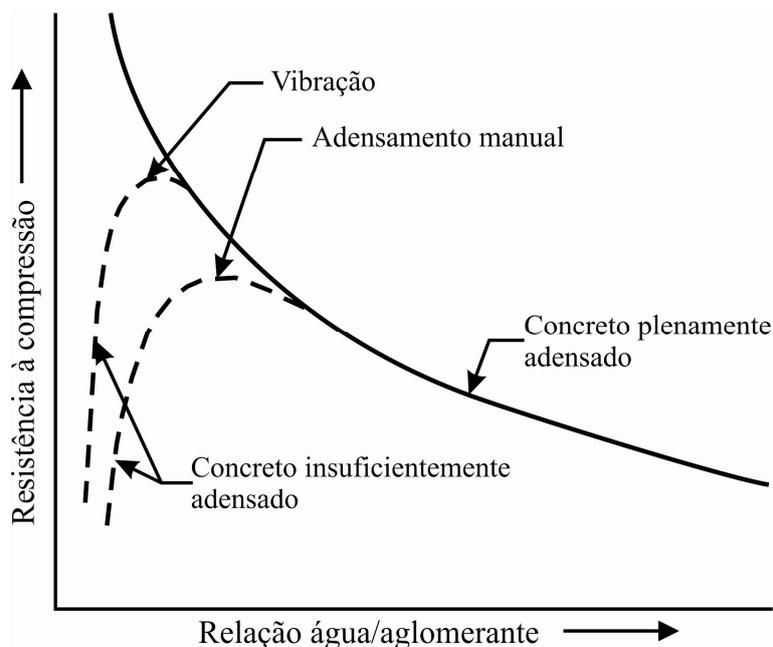


Figura 1 - dependência entre a resistência e a relação água/aglomerante (adaptado de Neville, 1997)

O concreto é considerado um material bifásico quando visto a olho nu, sendo composto por partículas de agregados dispersas, em uma matriz de pasta de aglomerante hidratada. A relação água/aglomerante da matriz não é constante, o que faz com que, tanto a zona de transição na interface matriz/agregado, quanto a pasta de aglomerante geralmente contenham uma distribuição heterogênea de diferentes tipos e quantidades de fases sólidas, poros e microfissuras. Nos sólidos, a heterogeneidade microestrutural acarreta efeitos negativos na resistência. As partículas anidras de cimento tendem a se atrair e formar flocos que aprisionam grandes quantidades de água da mistura. Em um sistema de pasta com aglomerante altamente floculado não apenas o tamanho e a forma dos poros, mas também os produtos cristalinos da hidratação deverão ser diferentes quando comparados a um sistema bem disperso (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A água pode ser encontrada na pasta de aglomerante hidratada de muitas formas. A água capilar é encontrada em vazios maiores que 50\AA e livre da influência das forças de atração exercidas pela superfície sólida. A água adsorvida é encontrada próxima à superfície do sólido e é retida por pontes de hidrogênio, sua perda é responsável pela retração da pasta de aglomerante hidratada. A água intralamelar está associada à estrutura dos cristais de C-S-H e é composta de uma camada monomolecular retida por pontes de hidrogênio. Por último, a água quimicamente combinada integra parte da microestrutura de vários produtos de hidratação do aglomerante, especialmente do cimento. O volume de vazios capilares na pasta de cimento hidratada depende da quantidade de água de mistura adicionada e do grau de hidratação do cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Powers (1968)¹ apud Mehta e Monteiro (2008) estudou a hidratação de pastas compostas de cimento e água e demonstrou que os produtos de hidratação dobram o volume de sólidos original quando estes possuem espaço para se desenvolver. O estudo mostrou também que as pastas produzidas a partir de um mesmo volume de cimento, com diferentes quantidades de água, têm um volume maior quanto maior for a quantidade de água. Entretanto, após a hidratação completa, todas as pastas conterão a mesma quantidade de produtos de hidratação sólidos. Portanto, a pasta com a maior quantidade de água possuirá maior volume de vazios capilares. Segundo os autores, para

¹ Powers, T. C., Ver. Mater. Construct. (Paris), n. 545, PP. 79-85, 1961.

uma pasta com relação água/cimento de 0,32 não haveria porosidade capilar quando o cimento estivesse completamente hidratado.

Quando os compostos de silicatos anidros entram em contato com a água, a fase líquida torna-se saturada com vários íons que se combinam para formar diferentes produtos de hidratação, os quais começam a preencher o espaço originalmente ocupado pela água. Em um ponto qualquer do processo de hidratação, os espaços não preenchidos entre as partículas do cimento consistirão de vazios e de poros capilares. Com a hidratação crescendo e a porosidade decrescendo, o movimento da umidade no sistema torna-se lento através das reações no estado sólido (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Os produtos iniciais da hidratação, formados quando existe muita água e espaços vazios no sistema cimento-aglomerante, consistem de flocos de grandes cristais que geram um considerável volume de vazios. Estes produtos iniciais da hidratação cristalizam-se no espaço preenchido pela água, envolvendo as partículas de cimento, sendo chamados de produtos externos. Já os produtos da hidratação das reações de estado sólido, formados dentro dos limites originais das partículas de cimento em hidratação, são mais compactos, menos cristalinos, apresentam maior resistência e, frequentemente, são chamados de produtos internos (AÏTCIN, 2000).

Ao se reduzir a relação água/aglomerante da pasta, as partículas de cimento ficam mais próximas umas das outras. Como existe menos água disponível, a água torna-se saturada rapidamente com os íons responsáveis pelo desenvolvimento dos produtos externos da hidratação. A proximidade das partículas de cimento explica porque pastas de cimento com baixa relação água/aglomerante desenvolvem resistência mais rapidamente (AÏTCIN, 2000).

Apesar da importância da relação água/aglomerante, para Aïtcin (2000) os valores mais importantes para caracterizar o concreto de alto desempenho são a quantidade de água de mistura, a quantidade de cimento e a quantidade de partículas finas utilizadas para se obter um abatimento maior do que 200 mm.

2.2. VOLUME DE VAZIOS DO ESQUELETO GRANULAR

Segundo De Larrard (1999)² apud Silva (2004), a dosagem de um concreto é principalmente um problema relacionado ao empacotamento dos materiais. Para Silva (2004), os métodos de dosagem existentes comprovam esta declaração, seja pela medida dos parâmetros de empacotamento de alguns componentes ou pela aproximação de uma curva granulométrica ideal, que é assumida por levar ao empacotamento máximo com os materiais reais. É notável, no entanto, que todos os autores proponham curvas diferentes, levantando dúvidas quanto à solidez de seus métodos (SILVA, 2004).

O empacotamento é, na verdade, um conceito comumente empregado em áreas do conhecimento como a Ciência dos Materiais. As estruturas dos sólidos cristalinos são construídas a partir da repetição no espaço de uma estrutura elementar, denominada célula unitária. Assim o empacotamento representa a fração do volume de uma célula unitária que corresponde a esferas sólidas. Na engenharia civil o termo empacotamento tem sido usado como forma de representar a relação existente entre volume de partículas e volume unitário.

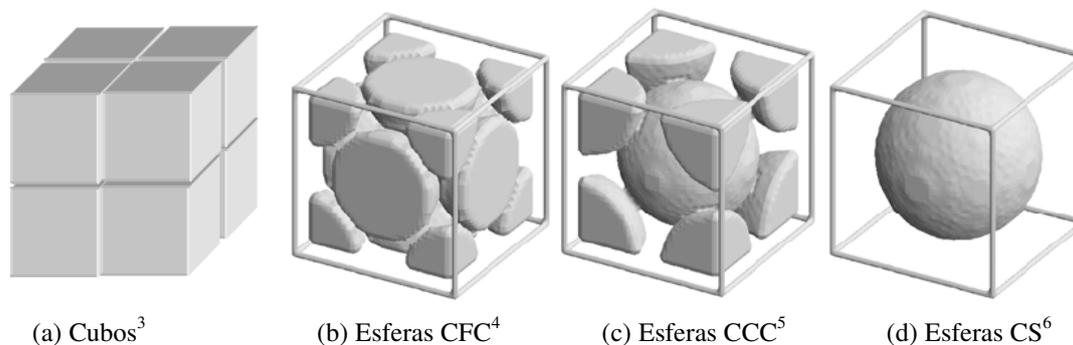


Figura 2 - empacotamento de partículas (Fonte: FORMAGINI, 2005)

Um pacote de grãos pode ser estável em muitas configurações diferentes, que podem apresentar densidades locais diferentes do valor global, dependendo de quão compacto está o material em cada região (RESENDE, 2008). Quando todas as partículas apresentam o mesmo tamanho, o volume intersticial mínimo, isto é, o volume de vazios,

² DE LARRARD, F. Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach. Modern Concrete Technology Series, vol. 9, E&FN SPON, London, 1999, 421 pp.

³ Estrutura Cubo

⁴ Estrutura Cubo de Face Centrada – CFC

⁵ Estrutura Cubo de Corpo Centrada – CCC

⁶ Estrutura Cubo Simples - CS

é 26% do volume total e independe do tamanho das partículas. Contudo, as partículas reais não se apresentam espontaneamente assim, mas antes nas mais variadas formas e segundo uma distribuição tendencialmente infinita de tamanhos de partículas sem qualquer imposição de regularidade. Sendo assim, partículas de menor tamanho podem ocupar os interstícios deixados livres pelo empacotamento de partículas de tamanho superior, o que eleva a densidade do sistema (SILVA; SEGADÃES; DEVEZAS, 2004).

Assim, a melhora do empacotamento do sistema de partículas consiste na diminuição do seu volume de vazios. O volume de vazios pode ser determinado a partir de dois parâmetros. O primeiro deles é a massa específica aparente das partículas, isto é, quando o volume de sólidos é considerado incluindo os poros permeáveis, mas não os capilares. A massa específica aparente é a relação entre a massa do agregado seco e o volume ocupado por este agregado, incluindo os poros permeáveis (NEVILLE, 1997).

O segundo parâmetro é a massa unitária do agregado, que é definida como a relação entre a massa de um agregado e o volume de sólidos, incluindo os vazios entre as partículas. A forma das partículas influencia a capacidade de arranjo que pode ser obtida. Assim, a massa unitária do agregado depende também das características da compactação conseguida, por isso, o grau de adensamento deve ser especificado. Para a determinação da massa unitária do material solto, o agregado é cuidadosamente lançado a uma altura controlada, já para a determinação da massa unitária no estado compactado o recipiente é preenchido em três camadas adensadas através de golpes de soquete⁷. (NEVILLE, 1997).

O Modelo de Empacotamento Compressivo (MEC), criado por De Larrard (1988)⁸, apud SILVA (2004), adota protocolos bem estabelecidos na determinação da compactidade. Isto é feito para que exista reprodutibilidade dos valores determinados. Nestes protocolos adota-se, para partículas com diâmetro maior de 100 μm , vibração somada à compressão de 10 kPa.

A massa unitária de um agregado (d) pode ser calculada pela Equação 3, conhecendo-se a sua massa específica aparente “ s ”, e o índice de vazios, “ v ,” (NEVILLE, 1997).

⁷ A relação entre as massas unitária solta e compactada geralmente se situa em torno de 0,87 e 0,96

⁸ DE LARRARD, F. Formulation et Propriétés des Bétons à Très Hautes Performances. Thèse de Doctorat de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Rapport de Recherche LPC N° 149, March 1988, Paris

$$v = 1 - \frac{d}{s} \quad \text{Equação 3}$$

Experimentalmente podem ser testadas diferentes combinações de grãos com características distintas buscando encontrar o menor volume de vazios.

2.3. FORMA DOS GRÃOS DO AGREGADO GRAÚDO

A forma dos agregados diz respeito às características geométricas das partículas, podendo ser classificadas como arredondada, angulosa, alongada ou achatada (MEHTA; MONTEIRO, 2008). A forma dos agregados, juntamente com a textura superficial, influenciam as propriedades do concreto no estado fresco e no estado endurecido. Quanto mais ásperas e angulosas as partículas, mais pasta será exigida para produzir misturas de mesma trabalhabilidade, aumentando, assim, o custo do concreto. Este maior volume de pasta é necessário tanto para envolver a maior área específica dos grãos, quanto para compensar dificuldades no rolamento dessas partículas (WEIDMANN, 2008).

AİTCIN, em 2000, já relatava a falta de pesquisa sobre a influência da granulometria dos agregados na trabalhabilidade do concreto de alto desempenho. Hoje, apesar de vários trabalhos terem sido publicados (TRISTÃO, 2005, MEHTA; MONTEIRO, 2008; WEIDMANN, 2008, entre outros), ainda existem muitas lacunas de conhecimento.

Partículas alongadas, lamelares ou discóides⁹ produzem concretos ásperos e por isso devem ser evitadas ou limitadas a no máximo 15% da massa total de agregados. Os agregados graúdos com formas lamelares normalmente se acomodam em uma direção preferencial, alinhando-se e podendo criar planos de fraqueza (NEVILLE, 1997; AİTCIN, 2000; MEHTA; MONTEIRO, 2008; WEIDMANN, 2008). Por sua vez, os agregados cúbicos ou esféricos resultam em uma melhor trabalhabilidade.

O arredondamento e a esfericidade representam a forma do grão. O método de ensaio proposto na ABNT NBR 7389 (2009) é utilizado para quantificar esses parâmetros dos agregados. O ensaio avalia visualmente a forma do grão com padrões gráficos, que indicam o grau de esfericidade e de arredondamento, conforme a Figura 3. O grau de esfericidade serve para mostrar quanto o grão se aproxima da forma esférica, enquanto

⁹ Que tem forma de um disco

que o arredondamento se relaciona com a perda de vértices e arestas, ou seja, o grau de curvatura dos cantos (TRISTÃO, 2005).

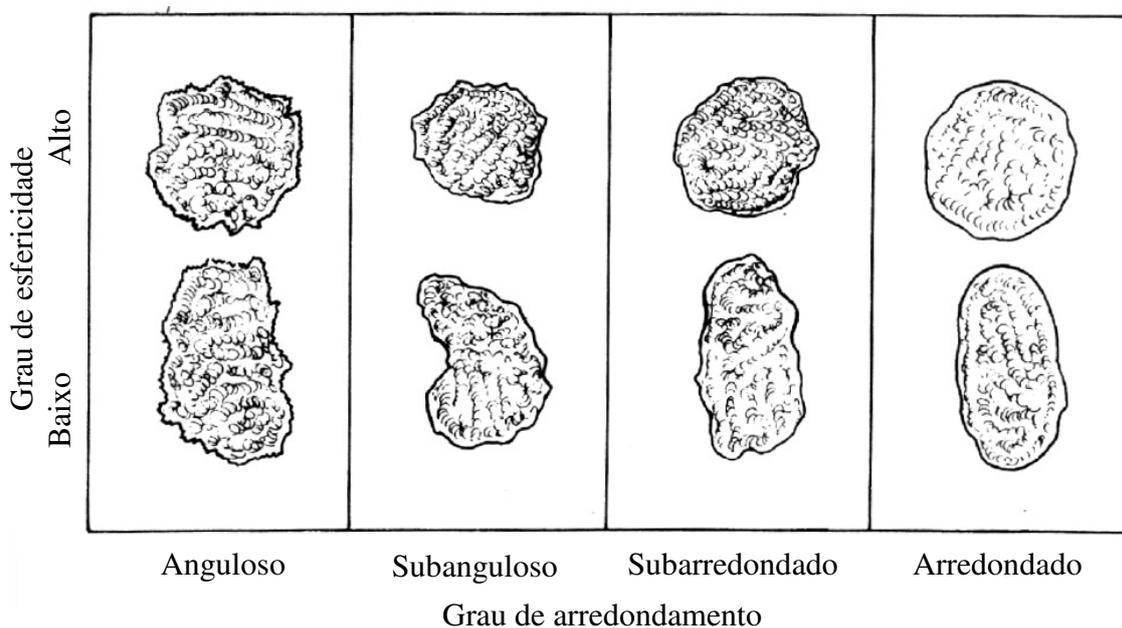


Figura 3 - graus de esfericidade e arredondamento (Fonte ABNT NBR 7389, 2009)

Por outro lado, a norma ABNT NBR 7211 (2009), que trata da especificação de agregados para concreto e que descreve os requisitos para recepção e produção dos agregados miúdos e graúdos destinados à produção de concretos de cimento Portland, adota outro parâmetro como critério de aceitação: o índice de forma. Segundo esta norma, este parâmetro não deve ser superior a três, quando determinado de acordo com a ABNT NBR 7809 (2008). Este índice consiste na razão entre o comprimento e a espessura de 200 partículas do agregado. Certamente o caráter quantitativo do índice de forma e a sua representatividade amostral fazem deste um critério simples, porém eficiente de caracterização da forma dos grãos.

Arndt, Souza e Bianchini (2007) avaliaram a influência do índice de forma do agregado graúdo na resistência à compressão do concreto. No estudo utilizaram dois tipos de agregados graúdos, ambos da mesma central de britagem, sendo diferentes apenas pelo processo de britagem. Dois processos de britagem foram utilizados, um britador de mandíbula, que produziu grãos mais lamelares, e um beneficiado impactador de eixo vertical que confere ao grão maior esfericidade. Foi testado em laboratório um proporcionamento 1:5,5 em massa, com teor de argamassa de 54%, consumo de cimento de 350 kg/m³ e abatimento de 120 ± 20 mm. No estudo a relação a/c não foi

priorizada, sendo a adição de água feita até que se atingisse o abatimento desejado. Os resultados mostraram que o agregado lamelar apresentava índice de forma 4,0 e o produzido pelo impactador de eixo vertical 1,8 (Figura 4, a e b). Como era esperado, o concreto produzido com as partículas lamelares demandou mais água para atingir o abatimento fixado; a relação água/aglomerante foi de 0,57 e 0,52, para os concretos produzidos a partir das partículas lamelares e cúbicas, respectivamente. Esta diferença no consumo de água representou uma diminuição de aproximadamente 10% na resistência à compressão dos concretos produzidos com partículas lamelares.



(a)

(b)

Figura 4 - agregado com índice de forma 4,0 (a) e 1,8 (b) (ARNDT; SOUZA; BIANCHINI, 2007)

Garlet e Reginato (2007) pesquisaram a influência da forma do agregado graúdo na resistência à compressão de concretos na região de Caxias do Sul. Na pesquisa foram utilizados seis agregados oriundos de britadores com características distintas. Dois dos agregados utilizados apresentaram índice de forma superior a 3,0 e, portanto, fora do limite estabelecido pela ABNT NBR 7211 (2009). O estudo compreendeu a dosagem de seis traços de concreto com teor de argamassa de 53% e relação água/cimento de 0,4. Apesar terem sido destacadas as diferenças de resultados para resistência à compressão, a análise dos resultados mostrados pelos autores não permite identificar como significativa a influência da forma do agregado graúdo sobre a resistência à compressão.

2.4. RESISTÊNCIA DO AGREGADO

Em geral, a rocha empregada como agregado apresenta resistências maiores à compressão e à tração do que o concreto, onde a zona de transição entre a pasta e o agregado é a parte mais fraca do sistema. Com exceção do concreto de alto desempenho, são raros os casos em que o agregado possui resistência mecânica menor do que a da pasta ou argamassa que o envolve. Os ensaios de determinação da resistência à compressão ou à tração de amostras de rocha não são especificados para sua qualificação para uso no concreto. Ainda que possam influenciar algumas de suas propriedades (PACELLI DE ANDRADE, 1997).

Concretos convencionais não demandam agregados com resistência elevada, sendo, em geral apenas necessário verificar se as exigências de desempenho das normas para agregados são atendidas. Contudo, no concreto de alto desempenho, a pasta hidratada de cimento e a zona de transição podem ser tão resistentes que, se os agregados, particularmente os grãos, não forem suficientemente resistentes, eles podem tornar-se o elo mais fraco dentro do concreto. Comparando com o concreto usual, para o CAD é necessário um controle mais rigoroso da qualidade do agregado em relação à granulometria e ao tamanho máximo, uma vez que para este tipo de concreto uma consideração primária é manter a demanda de água a mais baixa quanto possível (AİTCIN, 2000).

Desta forma, parece evidente que a resistência à compressão do concreto não pode ser significativamente maior do que a da maior parte do agregado (AİTCIN, 2000; NEVILLE, 1997; De LARRARD e SEDRAN, 1994). Por isso, a seleção do agregado grão torna-se mais importante à medida que a resistência à compressão esperada aumenta. Rochas duras e densas britadas, tais como o calcário, a dolomita e as rochas ígneas do tipo plutônico (granito, sienito, diorito, gabro e diabásio¹⁰), têm sido usadas como agregado grão nas aplicações de concreto de alto desempenho (AİTCIN, 2000).

O processo de britagem do agregado leva à produção de partículas individuais contendo a concentração mínima possível de elementos fracos. Como a explosão do maciço rochoso e a britagem não são tratamentos brandos, devem ser selecionadas rochas resistentes, com minerais pequenos, que possam ser quebradas em pedaços contendo

¹⁰ Sienito, diorito, gabro e diabásio são conhecidos de maneira coloquial como basaltos

uma quantidade mínima de microfissuras. Essas rochas podem ser um material de fase única, tal como o calcário, o calcário dolomítico e o sienito, ou um material polifásico como o granito. Rochas contendo planos de clivagem fracos ou partículas que sofram severamente a ação das intempéries devem ser evitadas (AÏTCIN e METHA 1990¹¹ Apud AÏTCIN, 2000).

Pelo fato de não ser fácil estabelecer qual é a resistência das partículas isoladamente, muitas vezes observa-se o desempenho do agregado no concreto. Isto pode ser feito através de uma experiência prévia com um dado agregado ou o uso experimental em um concreto que se sabe ter certa resistência (NEVILLE, 1997).

Mendes (2002), França *et al.*, (2007) e Barreto *et al.*, (2008) realizaram estudos semelhantes onde buscavam avaliar a disponibilidade de utilização de rochas locais para a produção de CAD. Nestes trabalhos, no entanto, não se relacionou a resistência da rocha à resistência à compressão do concreto produzido, mas foram observadas resistências diferentes para cada tipo de rocha. De maneira geral, não se buscou padronizar nos estudos a distribuição granulométrica dos agregados, por isso, não foi somente a natureza dos agregados a variável, permanecendo assim, diversas lacunas a serem respondidas.

Maslehuddin, Almusallam e Beshr (2003) avaliaram o efeito de quatro tipos de agregados graúdos um calcário, um calcário dolomito, um calcário quartzítico e um agregado oriundo de escória de aciaria, que apresentavam diferentes massas específicas (2,39 kg/dm³, 2,54 kg/dm³, 2,70 kg/dm³ e 3,51 kg/dm³, respectivamente), e absorção (4,95%, 2,20%, 1,60% e 0,85%, respectivamente). Foram avaliadas a resistência à compressão, a resistência à tração e o módulo de elasticidade do concreto de alto desempenho. Para isso foi dosado um concreto com relação água/cimento de 0,35 e consumo de cimento de 450 kg/m³, utilizando uma relação entre agregado graúdo/agregado miúdo de 1,63. Segundo os dados fornecidos pelos autores, observa-se um aumento tanto da resistência à tração, do módulo de elasticidade e da resistência à compressão com o aumento da densidade do agregado. Baseado nesta observação os autores concluíram que tipo de agregado tem um efeito significativo sobre as propriedades mecânicas. Contudo, no referido texto não há detalhes sobre quais critérios

¹¹ AÏTCIN, P. C.; MEHTA, P. K. Effect of coarse-aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete. ACI Materials Journal, 87 (2), March-April, 1999. p. 103-7.

foram utilizados para comparar os agregados. Não são informados quais os pressupostos utilizados na dosagem. Sendo assim as conclusões dos referidos autores são dúbias pois foram comparados concretos produzidos com rochas de diferentes densidades o que pode implicar na prática em volumes de mistura diferentes. Assim uma unidade de volume de uma mistura produzida com agregado mais denso apresenta mais pasta do que o mesmo volume produzido com agregado menos denso, ou seja, o concreto produzido com agregado menos denso torna-se assim mais pobre em aglomerante do que o concreto com agregado mais denso. A comparação da influência da rocha realizada desta maneira não é válida.

Pompeu (2004) realizou um trabalho onde utilizou duas rochas: em concretos de resistência moderada (aproximadamente 50 MPa) e alta (aproximadamente 100 MPa), um granito e um basalto. O autor concluiu que a influência do tipo de agregado graúdo é mais significativa no concreto de maior resistência. A resistência à compressão do concreto com basalto foi 40% maior do que a do concreto com granito. No concreto de resistência moderada essa variação de resistência foi de 25%. O estudo não contemplou ensaios que permitissem avaliar a resistência à compressão da rocha.

Uma forma empírica de se verificar se o agregado apresenta resistência adequada à pasta de cimento é observar a superfície de ruptura do concreto. Se muitas partículas do agregado aparecerem rompidas, depois da ruptura do corpo-de-prova, pode-se concluir que a resistência do agregado é menor do que a resistência à compressão nominal do concreto (NEVILLE, 1997). No entanto este tipo de estudo pode ser especialmente difícil sob o ponto de vista objetivo principalmente quando se dispõem de uma gama grande de rochas.

Segundo Neville (1997), um valor médio de resistência à compressão do agregado é de 200 MPa, mas muitos agregados excelentes têm resistências de até 80 MPa. O autor apresenta a Tabela 1 com valores de resistência de diversas rochas. Nesta tabela nota-se que a resistência dos agregados comumente utilizados são consideravelmente maiores do que os valores normais de resistência do concreto. Isso ocorre porque as tensões na interface das partículas podem ser muito maiores do que a tensão nominal aplicada.

Tabela 1 - Resistências encontradas para diferentes rochas (NEVILLE, 1997)

Resistência à compressão (MPa)			
Tipo de rocha	Valor médio	Valor máximo	Valor mínimo
Granito	181	257	114
Felsito	324	526	120
Basalto	283	377	201
Calcário	159	241	93
Arenito	131	240	44
Mármore	117	244	51
Quartzito	252	423	124
Gnaisse	147	235	94
Xisto	170	297	91

Não existe uma relação geral de dependência entre a resistência e o módulo de elasticidade de diferentes agregados. Foram encontrados alguns granitos, por exemplo, com módulo de elasticidade de 45 GPa, gabros e diabases com módulos de 85,5 GPa, tendo a resistência de todas essas rochas valores entre 145 MPa e 170 MPa (NEVILLE, 1997).

Costuma-se especificar um ensaio para determinação da resistência à compressão de rochas com extração de corpos-de-prova cilíndricos. No entanto, o resultado desse ensaio é influenciado pela presença de planos de clivagem na rocha que podem não ser significativos se a rocha for fragmentada nos tamanhos que serão usados no concreto. Em essência, o ensaio de compressão mede a qualidade da rocha-mãe, mas não propriamente a qualidade dos agregados para concreto. Por essa razão, esse ensaio raramente é utilizado (NEVILLE, 1997).

De maneira geral observa-se que as características mineralógicas do agregado graúdo têm influência sobre a resistência do concreto, mas não se dispõem de uma orientação simples geral para seleção do agregado (AÏTCIN e MEHTA, 1990¹² apud NEVILLE, 1997).

¹² AÏTCIN, P. C.; MEHTA, P. K. Effect of coarse-aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete. ACI Materials Journal, 87 (2), March-April, 1999. p. 103-7.

2.5. DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA DO AGREGADO GRAÚDO

Para os concretos convencionais é de conhecimento notório que quanto maior a partícula de agregado, menor a área superficial por unidade de massa a ser molhada. Aumentando-se a dimensão máxima do agregado, diminui-se a demanda de água de modo que, para uma dada trabalhabilidade e teor de cimento, a relação água/aglomerante pode ser reduzida com um conseqüente aumento da resistência. No entanto, mantendo-se os demais fatores constantes, quanto maior o tamanho do agregado, mais alta será a relação água/aglomerante localizado na zona de transição da interface e em decorrência disto, menos resistente e mais permeável será o concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 1997).

O efeito benéfico na resistência devido à menor demanda de água pode ser superado pelos efeitos prejudiciais de uma menor área de aderência e descontinuidades introduzidas por partículas muito grandes, particularmente em misturas ricas. O efeito adverso do aumento do tamanho máximo do agregado é notado para qualquer granulometrias com uma dimensão máxima característica, mas para partículas menores que 40 mm predomina o efeito sobre a demanda de água. Para partículas maiores, o balanço dos dois efeitos depende do teor de cimento da mistura, e existe um tamanho máximo ótimo de agregado para cada valor de resistência de concreto (NEVILLE, 1997). O autor cita, por exemplo, que em um concreto com 165 quilogramas de cimento por metro cúbico de concreto é vantajoso o uso de agregados com 150 mm de dimensão máxima característica (DMC). No entanto, em concretos estruturais, com proporções usuais, do ponto de vista da resistência, não há vantagens em se usar agregados com dimensão máxima maior do que 25 mm.

No concreto de alto desempenho o possível ganho de resistência associado ao aumento da dimensão máxima característica é contrabalanceado pela perda de resistência, devido à dois fatores: primeiro porque com o aumento da dimensão, a zona de transição torna-se maior e mais heterogênea; segundo, com muitos tipos de rochas, as partículas menores do agregado graúdo são, geralmente, mais resistentes do que as partículas grandes. Isto se deve ao processo de redução que freqüentemente elimina os defeitos internos do agregado, tais como poros grandes, microfissuras e inclusões de minerais moles (NEVILLE, 1997).

Segundo Aïtcin (2000), a experiência mostra que é difícil produzir concretos de alto desempenho com resistência superiores a 100 MPa usando agregados maiores 25 mm. Afirma ainda que neste nível de resistência é mais seguro trabalhar com dimensão máxima característica entre 10 e 12 mm. Para Neville (1997), no concreto de alto desempenho deve se evitar partículas de agregado grandes por que elas introduzem heterogeneidades no sistema, podendo haver incompatibilidade entre partículas de agregado e pasta de cimento quanto ao módulo de elasticidade, ao coeficiente de Poisson, à retração, à fluência e às propriedades térmicas. Essas incompatibilidades podem levar à microfissuração mais intensa do que quando o agregado tem tamanho máximo menor do que 12 mm.

Ao aplicar forças de compressão nos agregados aparecem tensões de tração e cisalhamento na interface pasta/agregado, gerando fissuras na pasta. O tamanho das fissuras está relacionado com a extensão da zona de trações ou cisalhamento. No caso de agregado esférico, o tamanho da fissura é diretamente proporcional ao diâmetro do agregado. Em concretos de pós reativos o tamanho dos agregados é limitado em 2 mm (RICHARD e CHEYREZY, 1995; LONG, WANG e XIE, 2002).

A maior área total do agregado com menor dimensão máxima característica também significa que a tensão de aderência é menor de modo que nos ensaios de compressão, a ruptura ocorre através das partículas de agregado graúdo, bem como através da pasta de cimento, e não tangenciando as partículas, como ocorre no concreto convencional (NEVILLE, 1997).

De Larrard e Sedran (1994), ao estudar pastas de argamassas produzidas com cimento, sílica ativa e agregados miúdos com diferentes dimensões, criaram um parâmetro denominado máxima espessura de pasta (MPT). Este parâmetro físico representa a distância média entre dois agregados, supondo que cada agregado é cercado por uma camada de pasta, cuja espessura é proporcional ao seu diâmetro. A Equação 4 define a máxima espessura de pasta (MPT).

$$MPT = \phi_{MAX} \left(\sqrt[3]{\frac{g^*}{g}} - 1 \right) \quad \text{Equação 4}$$

Onde: MPT – máxima espessura de pasta;

ϕ_{MAX} – valor da máxima dimensão do agregado (dimensão correspondente a 90% do agregado passante);

g – volume de agregado (com dimensão maior que 80 μm) por metro cúbico de concreto;

g^* - equivale à compactidade real dos agregados (com dimensão maior que 80 μm) empacotados com vibração de compressão de 10 kPa.

No referido estudo o autor verificou resistências à compressão decrescentes quando a MPT aumentou de 0,1 para 0,5 mm. Sendo assim, pode-se dizer que a dimensão do agregado é proporcional ao parâmetro MPT, que será tanto maior quanto maior for o diâmetro. Por analogia, verifica-se que a resistência à compressão é inversamente proporcional ao diâmetro do agregado.

2.6. DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS

Como já foi descrito no item 2.1, a resistência à compressão de um concreto convencional plenamente adensado é função da relação água/aglomerante. A relação água/aglomerante do concreto é parcialmente dependente da granulometria do agregado, pois, há uma relação direta entre granulometria e trabalhabilidade. Como é necessário o adensamento pleno do concreto, para se obter a resistência correspondente a certa relação água/aglomerante, e isso somente é possível com uma mistura com trabalhabilidade adequada, a distribuição granulométrica tem influência sobre a resistência (NEVILLE, 1997). Segundo o autor, as partículas de agregado de certo tamanho se acomodam e formam vazios que podem ser preenchidos somente se o tamanho inferior seguinte for suficientemente pequeno. Isso significa que deve haver uma diferença mínima entre os tamanhos de duas frações contínuas de partículas. Esta constatação justifica o uso de agregados com granulometria descontínua. Já para Mehta e Monteiro (2008), agregados de granulometria contínua (que não apresentam grande

deficiência ou excesso de qualquer dimensão de partículas) produzem as misturas de concreto mais trabalháveis e econômicas.

A premissa de que o agregado graúdo ocupe o maior volume possível por metro cúbico de concreto tem um caráter econômico, porque o seu custo é muito menor do que o do aglomerante. Também sob do ponto da retração não é desejável uma mistura muito rica. Há, ainda, que se levar em conta o processo de adensamento do concreto, pois um concreto auto adensável (CAA), cujo peso próprio é responsável pelo seu adensamento, ou mesmo concreto com um abatimento muito alto (200 mm), as granulometrias contínuas são mais utilizadas. Quando, no entanto, se dispõem de alta energia de vibração e baixos valores de abatimento podem ser adotadas curvas granulométricas descontínuas.

Para concretos de alto desempenho uma recomendação consensual é a utilização de módulo de finura elevado para a areia, sendo indicados valores próximos a 3,0 (ACI 211.4R,1993; NEVILLE, 1997; AİTCIN, 2000).

Com a busca de teores adequadamente combinados de agregados graúdos e miúdos contribuindo para minimizar o volume de espaços vazios tem-se como benefícios a maior resistência. Quanto maior for a densidade granular do material, menor será o volume de vazios da mistura e assim menos pasta será necessário. Para uma mesma relação água/cimento menos cimento é necessário quando a matriz de agregado é mais densa, o que implica que uma menor quantidade de água é necessária. Isto por sua vez pode reduzir a ocorrência de interface fraca entre o agregado e a pasta de cimento, aumentando a resistência final do concreto. Em teoria o aumento de densidade granular do agregado deveria aumentar a trabalhabilidade do concreto, porém a maior concentração de agregado aumenta o atrito entre os grãos, reduzindo assim a trabalhabilidade (CHANG, 2004).

Já a maximização da massa unitária, através de uma composição granulométrica ótima, segue duas linhas distintas. A primeira, e mais antiga, visa buscar uma solução teórica através da proposição de curvas granulométricas. A outra busca aperfeiçoar a compacidade do sistema de partículas através de ensaios de laboratório.

Um dos modelos mais simples de empacotamento de partículas foi proposto por Furnas (SILVA; SEGADÃES; DEVEZAS, 2004) e define que o empacotamento máximo de

uma distribuição de partículas em três classes de tamanhos (grossos (L), médios (m) e finos (S)) depende da eficiência de empacotamento de cada classe e é descrita pela Equação 5.

$$PE_{max} = PE_L + (1 - PE_L) \times PE_m + (1 + PE_L) \times (1 - PE_M) \times PE_S \quad \text{Equação 5}$$

Onde: PE_{max} – Eficiência máxima de empacotamento das partículas;

PE_L – Eficiência de empacotamento das partículas grossas;

PE_M – Eficiência de empacotamento das partículas médias;

PE_S – Eficiência de empacotamento das partículas finas;

Considerando-se que a eficiência de empacotamento das partículas em cada classe é igual, então a eficiência de empacotamento máxima da distribuição ternária é dada pela Equação 6.

$$PE_{max} = PE + (1 - PE) \times PE + (1 + PE)^2 \times PE \quad \text{Equação 6}$$

A Equação 7 descreve a extrapolação desta relação para a mistura de uma infinidade de classes de tamanhos, traduzindo a eficiência de empacotamento de uma distribuição contínua (SILVA; SEGADÃES; DEVEZAS, 2004).

$$P = \frac{R^{\log D} - R^{\log D_s}}{R^{\log D} - R^{\log D_s}} \times 100 \quad \text{Equação 7}$$

Onde: P – percentagem acumulada de partículas de passante na malha de dimensão D;

D – diâmetro da partícula;

D_L – tamanho da maior partícula na distribuição;

D_S – tamanho da menor partícula na distribuição;

R – razão entre os volumes de partículas em classes de tamanhos adjacentes.

A distribuição descontínua de mono-tamanho não é natural e economicamente inviável. Andreassen e Andersen (1930)¹³ apud Silva, Segadães e Devezas (2004), entendia que a condição de semelhança subjacente ao empacotamento perfeito deveria ser traduzida por uma lei de potência e, em alternativa ao modelo anterior, propôs a Equação 8.

$$P = \left(\frac{D}{D_L}\right)^q \times 100 \quad \text{Equação 8}$$

Onde: P – percentagem acumulada de partículas passante na D;

D – diâmetro de cada classe de partícula;

D_L – diâmetro da maior partícula;

q – módulo de distribuição.

Para se obter um empacotamento máximo, o módulo da distribuição deve estar compreendido entre um terço e um meio (SILVA, SEGADÃES e DEVEZAS, 2004). A Equação 9 é adotada pelo Comitê 207 do ACI, para composição granulométrica de referência. Contudo, Pacelli de Andrade (1997) recomenda como módulo de distribuição 0,4 para agregados artificiais e 0,5 para agregados naturais.

Nas distribuições de tamanhos de partículas reais sempre existe um tamanho mínimo, assim, as curvas de Talbot-Richart (apud Pacelli de Andrade, 1997), Equação 9 consideram, além do tamanho da maior partícula, a dimensão da menor fração.

$$P = \left(\frac{d^q - 4,8^q}{D^q - 4,8^q}\right) \times 100 \quad \text{Equação 9}$$

Onde: P – percentagem acumulada de partículas passante na d;

d – diâmetro de cada classe de partícula;

D – diâmetro da maior partícula;

q – módulo de distribuição.

¹³ ANDREASSEN, A. H. M.; ANDERSEN, J. Koloid Z. Ind. Eng. Chem. v. 50, 1930. p. 217-228

A curva mais conhecida para distribuição granulométrica é a de Fuller (NEVILLE, 1997), que foi desenvolvida para concretos asfálticos e é constituída de uma parábola para representar as curvas ideais, a partir da Equação 10 (HUMMEL, 1966¹⁴ apud TRISTÃO, 1995).

$$A = 100 \sqrt{\frac{d}{D}} \quad \text{Equação 10}$$

Onde: A – porcentagem que passa pela peneira de abertura de malha d;

D – maior dimensão do agregado.

Contraopondo as curvas teóricas de distribuição granulométrica existem métodos experimentais que, através de ensaios de laboratório, buscam a otimização da distribuição granulométrica. A mais simples destas técnicas consiste em misturas de diferentes proporções de duas amostras distintas de agregado, por exemplo, brita 1 e brita 0. Utiliza-se como critério de escolha a proporção de mistura que minimize o volume de vazios. Para determinar este volume é calculada a diferença entre a massa específica e a massa unitária das partículas. Este procedimento é adotado por diversos autores, tais como Helene e Terzian (1992), O'Reilly (1992) e Tutikian (2007).

Uma abordagem mais formal é adotada por De Larrard (1999)¹⁵ apud SILVA (2004). A determinação da compacidade máxima também é feita a partir da medida experimental da compacidade. Este ensaio utiliza vibração associada à compressão, ambas constantes e controladas. A importância da adoção de um protocolo de controle na realização deste ensaio é discutida por Silva (2004) e Formagini (2005).

A orientação de Neville (1997) é que a trabalhabilidade é melhorada quando há mais pasta do que o necessário para preenchimento dos vazios da areia, bem como mais argamassa do que o necessário para preenchimento dos vazios do agregado graúdo.

¹⁴ HUMMEL, Alfred. Prontuário del Hormigon – Hormigones normales, Hormigones ligeros. 2º Edicion Española. Barcelona, Editores Técnicos Asociados, 1966. p. 51 -89.

¹⁵ AÏTCIN, P. C.; MEHTA, P. K. Effect of coarse-aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete. ACI Materials Journal, 87 (2), March-April, 1999. p. 103-7.

2.7. TEXTURA SUPERFICIAL DO AGREGADO GRAÚDO

A textura superficial do agregado influencia a aderência da pasta de cimento e também a demanda de água da mistura. Depende, basicamente, da dureza, da granulação e das características dos poros da rocha que a originou. A textura superficial pode ser classificada em vítrea, lisa, granulosa, áspera, cristalina e alveolar, conforme mostra a Tabela 2 (NEVILLE, 1997; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Tabela 2 - Classificação da textura superficial dos agregados (BS 812: Parte 1 (1975) apud NEVILLE (1997))

Textura	Característica	Exemplos
Vítrea	Fratura conchoidal	Calcedônia, escória vitrificada
Lisa	Fratura mostrando grãos uniformes mais ou menos arredondados	Seixo, ardósia, mármore, alguns riolitos
Granulosa	Fratura mostrando grãos uniformes mais ou menos arredondados	Arenito, oolito
Áspera	Fratura áspera de rochas fina ou grosseiramente granuladas com cristais não facilmente visíveis	Basalto, felsito, calcário
Cristalina	Com constituintes cristalinos facilmente visíveis	Granito, gabro, gnaiss
Alveolar	Com poros e cavidades visíveis	Pedra pomes, clínquer, argila expandida

Segundo Mehta e Monteiro (2008), há evidências de que nas primeiras idades, a resistência à flexão do concreto é afetada pela textura do agregado; uma textura mais áspera parece propiciar a formação de uma aderência física mais forte entre a pasta de cimento e o agregado. Apesar disso, em idades mais avançadas esse efeito pode não ser tão importante, devido ao desenvolvimento da aderência química.

Agregados lisos, como é o caso dos seixos, proporcionam um maior abatimento no concreto para o mesmo teor de água/mistura seca quando comparados como os agregados de rochas britadas que tenham uma textura superficial rugosa. Comparativamente às partículas de seixo rolado, as partículas britadas tendem a produzir misturas que exigem água adicional ou superplastificante para atingir uma mesma trabalhabilidade (AÏTCIN, 2000).

2.8. MINERALOGIA DO AGREGADO GRAÚDO

A mineralogia estuda a química, a estrutura molecular e cristalina, as propriedades físicas, minerais, a gênese, e o metamorfismo das rochas. Os agregados são oriundos de rochas que sofreram diferentes processos de metamorfismo e mesmo tiveram gênese distintas. Assim, estas rochas de diferentes origens mineralógicas são objeto de estudo de pesquisas que buscam entender se estas diferenças se refletem no comportamento mecânico do concreto.

Segundo IL-SEOK-OH (2001), para a mesma quantidade de argamassa, diferentes tipos de agregados graúdos com diferentes formas, texturas, mineralogia e resistência podem resultar em concretos com resistências diferentes.

As características dos agregados derivam da composição mineralógica da rocha matriz, das condições de exposição às quais a rocha foi submetida antes de gerar o agregado, dos tipos de operação e equipamento usados na produção do agregado (POMPEU, 2004).

Os agregados, dependendo de sua microestrutura, podem apresentar diferentes valores para algumas características como a resistência mecânica, a absorção, a dureza e o módulo de elasticidade, os quais podem influenciar no comportamento do concreto de baixa e alta resistência (POMPEU, 2004).

Sidney e Francis (1981) apud Pompeu (2004) apresentam uma tabela que relaciona as propriedades do concreto afetadas pelas propriedades do agregado, como mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades do concreto afetadas pelas propriedades do agregado (SIDNEY e FRANCIS (1981) apud POMPEU (2004))

Propriedades do Concreto	Propriedades do Agregado
Durabilidade	Porosidade, estrutura de poros, permeabilidade, grau de saturação, resistência à tração, textura, estrutura e minerais
Resistência à umidade e secagem	Estrutura de poros, módulo de elasticidade
Resistência à abrasão	Dureza
Reação álcali-agregado	Presença de partículas constituintes silicosos
Resistência	Resistência, textura de superfície, limpeza, forma de partícula e dimensão máxima do grão
Retração e fluência	Módulo de elasticidade, forma das partículas, graduação, limpeza, e dimensão máxima
Módulo de elasticidade	Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson

PACELLI DE ANDRADE (1997) apresenta uma série de resultados de ensaios de resistência à compressão de testemunhos de rochas de vários litotipos e diferentes procedências. Os dados apresentados pelo autor são oriundos do laboratório de concreto de FURNAS (Anexo 1), e é possível perceber que existem diferentes resistências à compressão em todos os litotipos. Assim, pode-se afirmar que, sob o ponto de vista da resistência à compressão, nenhum litotipo poderia ser excluído do emprego como agregado em concretos de alto desempenho.

Por outro lado, no estudo de Andrade (1997) também se observa que existe uma grande variação de resistências dentro de um mesmo litotipo, bem como o desvio padrão encontrado para cada procedência é, em muitos casos, bastante elevado. Isto implica em não se poder afirmar, *a priori*, que um grupo é sempre adequado para emprego como agregado graúdo em concreto de alto desempenho.

Com respeito à mineralogia do agregado graúdo, os principais fatores que influenciam a resistência da rocha usada como agregado são: o grau de compressibilidade de cada uma das espécies minerais que forma a rocha, o grau de interação de cada uma das espécies minerais com o concreto com o qual estarão em contato, o coeficiente de atrito dos contatos intragranulares (contatos entre os grãos da rocha que compõem a brita), a tenacidade de cada uma das espécies minerais envolvidas, o tamanho dos grãos minerais individuais, a composição das mesóstase e a distribuição dos grãos minerais na mesóstase.

2.9. TEOR DE AGREGADO GRAÚDO

No concreto, de maneira geral, os agregados (areia e rocha) são os componentes majoritários em termos de volume, formando um esqueleto rígido de elementos granulares contínuos. O esqueleto granular bloqueia uma grande proporção da pasta retraída, o que resulta em aumento da porosidade (VANDERLEI, 2004). No caso do concreto de pó reativo (que não possui agregados graúdos), o volume de pasta é aproximadamente 20% maior que os vazios da areia compactada. Nestes concretos o agregado usado não forma um esqueleto rígido, mas um apanhado de inclusões numa matriz contínua de pasta. Assim, a retração da pasta é bloqueada localmente em torno de cada partícula de agregado, enquanto que a retração global não é bloqueada, pois não existe um esqueleto rígido.

O método de dosagem do ACI 211.1 (1991) pressupõe que existe um valor ótimo entre o volume solto do agregado graúdo e o volume total do concreto e esta relação depende somente do tamanho máximo do agregado graúdo e do módulo de finura do agregado miúdo. Neste método a forma do agregado graúdo não é considerada diretamente nesta relação. Segundo Neville (1997), um agregado graúdo britado tem um volume solto maior para uma mesma massa do que um agregado bem arredondado, portanto, o fator de forma é levado em conta na determinação da massa unitária.

O método proposto por Mehta e Aïtcin (1990) para dosagem de concreto de alto desempenho pressupõe um volume ótimo de 65% de agregado, diferentemente do método do ACI 211.1 (1991), em que o volume de agregado é real, ou seja, se refere à massa específica do agregado. Essa simplificação pode ser feita quando se trabalha com agregado que apresente características adequadas quanto à forma e, principalmente, porque o ajuste do abatimento é feito com aditivo superplastificante.

Aïtcin (2000) propõe um método baseado no ACI 211-1 (1991), onde o teor de agregado graúdo é definido através da forma das partículas. Este varia entre 950 e 1150 quilogramas, conforme mostra a Figura 5. Isso tem implicações práticas sobre o abatimento do concreto e seus custos, uma vez que um teor adequado de agregado graúdo implica na potencialização das propriedades reológicas do concreto no estado fresco, o que se reflete em um menor consumo de aditivo superplastificante para uma

mesma consistência. É importante destacar que o autor não define nenhum parâmetro objetivo para diferenciar a forma das partículas.

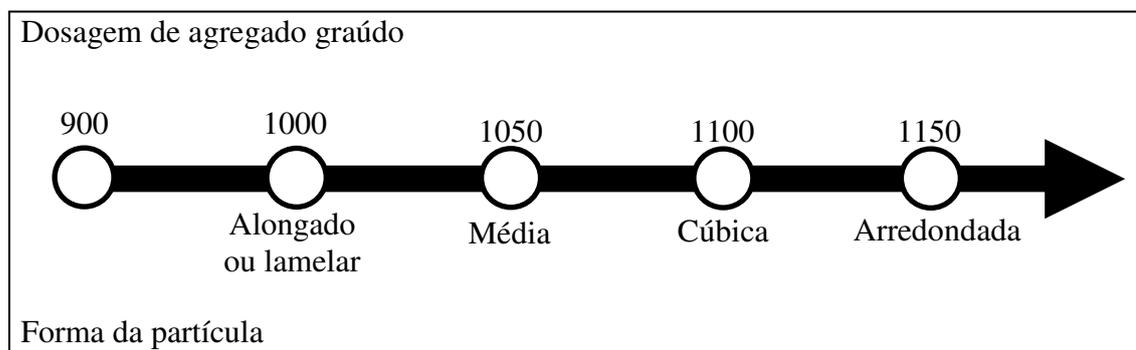


Figura 5 - teor de agregado graúdo (Aïtcin, 2000)

A relação agregado/aglomerante é apenas um fator secundário da resistência do concreto, contudo, mantendo-se uma mesma relação água/aglomerante, uma mistura com menos aglomerante resulta em resistência à compressão maior (NEVILLE, 1997). Esse comportamento pode ser observado no trabalho de Fernandes, Obata e Helene (2007), onde proporcionamentos com relação água/aglomerante constantes e relação cimento/agregado, de 1:3 e 1:5 foram testados. No mesmo estudo foi avaliada a mistura onde se manteve constante a consistência, neste caso a mistura 1:3. Conforme o esperado, esta apresentou maior resistência, pois pode ser moldada com uma relação água/aglomerante menor. No trabalho também se constatou que para uma mesma relação água/aglomerante o proporcionamento 1:5 apresentou módulo de elasticidade maior, como já era esperado, apesar disso, a resistência à tração por compressão diametral não foi alterada.

O aumento da resistência através do aumento do teor de agregado não é completamente compreendido segundo Neville (1997). As possíveis explicações para essas ocorrências são: misturas com teor mais elevado de agregado absorvem mais água da mistura, reduzindo a relação água/aglomerante efetiva da mistura; um teor maior de agregado resultaria menor retração, menos exudação, menores variações térmicas devidas ao calor de hidratação do cimento e, portanto, menor dano à aderência entre o agregado e a pasta de cimento. No entanto, a explicação mais provável, segundo o referido autor, está no fato de que o teor total de água por metro cúbico de concreto é menor em uma mistura mais pobre do que em outra mais rica. Assim, em uma mistura mais pobre os vazios

constituem uma fração menor do volume total do concreto e estes vazios têm um efeito adverso sobre a resistência.

Tendo em vista os principais fatores que influenciam as propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho julga-se importante a realização de pesquisas e estudos que possam contribuir para o aprimoramento do conhecimento acerca do concreto de alto desempenho. Identificou-se como uma possível contribuição ao conhecimento do concreto de alto desempenho a influência da resistência da rocha e da dimensão máxima característica do agregado graúdo. O próximo capítulo apresenta o programa experimental deste estudo.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este capítulo apresenta os procedimentos adotados no programa experimental deste trabalho. Inicialmente se realizou um estudo de campo, que teve por objetivo identificar rochas que são utilizadas na produção de concreto, sendo essa busca realizada em algumas cidades do Rio Grande do Sul. Posteriormente montou-se uma matriz experimental com objetivo de produzir concretos com diferentes níveis de resistência.

3.1. ESTUDO EXPLORATÓRIO PARA SELEÇÃO DAS ROCHAS UTILIZADAS NO TRABALHO

Inúmeros fatores influenciam as propriedades mecânicas das rochas e a predição de suas características não pode ser feita somente através da identificação de sua origem. Os resultados apresentados por Pacelli de Andrade (1997) (Anexo 1) mostram uma ampla gama de resistências diferentes para um mesmo grupo litológico. Outro aspecto importante é o elevado desvio-padrão encontrado para agregados provenientes de uma mesma origem.

Realizou-se então uma pesquisa de campo com diversas centrais de britagens fornecedoras de agregado para concreto com a intenção de identificar rochas que pudessem ser utilizadas nesta pesquisa. O objetivo principal foi selecionar rochas com diferentes resistências. Foi coletado material em 10 centrais produtoras de agregado para concreto. Por motivos de disponibilidade, estas visitas foram realizadas em empresas do estado do Rio Grande do Sul como mostra a Figura 6. As cidades contempladas foram: Viamão, Eldorado do Sul, Estância Velha, Portão, Montenegro, Santo Antônio da Patrulha, Caxias do Sul e Erechim.



Figura 6 – Locais de coleta de amostras localizados próximos a Região Metropolitana de Porto Alegre

Este estudo consistiu na coleta de material para realização de três ensaios: resistência à compressão da rocha, análise granulométrica do agregado e índice de forma. Para avaliar a resistência à compressão foram coletados blocos de rocha com volume aproximado de 10 dm^3 . Para os outros ensaios foram coletadas amostras de material já britado com a granulometria comumente utilizada na produção de concreto, comercialmente denominados brita 1 e brita 0.

A escolha dos três ensaios descritos acima foi feita tendo em vista as variáveis estudadas no trabalho, como a resistência à compressão da rocha, bem como os fatores que foram mantidos constantes, como a distribuição granulométrica. Já o índice de forma foi escolhido para utilizar-se no estudo grãos com forma semelhante.

3.1.1. Ensaio de resistência à compressão

Durante a coleta dos fragmentos em campo, foram identificadas as características morfológicas do maciço. A partir desta verificação visual, feita através da observação de padrões de cores e orientação dos planos de clivagem, realizou-se a coleta. O objetivo desta verificação visual foi tornar a amostra representativa. A Figura 7a e Figura 7b mostram dois exemplos de diferentes maciços visitados.



Figura 7 - Bancada de extração de rocha (a) basáltica em Montenegro (b) e granítica em Eldorado do Sul

A Tabela 4 apresenta as amostras coletadas, sua origem e suas características.

A partir das amostras de rocha coletadas nas centrais de britagem e conduzidas ao laboratório, realizou-se a preparação dos corpos-de-prova para utilizar no ensaio de resistência à compressão uniaxial. Os corpos-de-prova foram produzidos com formato cúbico, com dimensões de arestas entre 7 e 7,5 cm. Foi utilizado uma serra circular diamantada na preparação dos corpos-de-prova, seguindo o método proposto pela ABNT NBR 12767 (1992).

Tabela 4 - Identificação das rochas pesquisadas neste estudo exploratório e suas principais características

Identificação	Origem	Características ¹⁶
B-220	Montenegro/RS	Identificada como basalto; maciço homogêneo
B-160	Estância Velha/RS	Identificada como basalto; maciço bastante heterogêneo apresenta inúmeras intrusões e planos de clivagens distintos
B-150	Portão/RS	Identificada como basalto; maciço homogêneo
B-147	Santo Antônio da Patrulha/RS	Identificada como basalto; maciço heterogêneo apresentando dois padrões distintos de coloração
B-146	Estância Velha/RS	Identificada como basalto; maciço homogêneo
B-130	Caxias do Sul/RS	Identificado com basalto; maciço homogêneo
B-000	Montenegro/RS	Identificada como basalto; maciço homogêneo
G-190	Eldorado do Sul/RS	Identificada como granito; maciço homogêneo, com planos de clivagens com diferentes orientações
G-160	Viamão/RS	Identificada como granito; maciço homogêneo, com planos de clivagens com diferentes orientações
I-115	Erechim/RS	Identificada como gnaiss; rocha apresenta intrusões visíveis

Os corpos-de-prova foram ensaiados na condição seca e a taxa de aplicação de carga adotada no ensaio foi 0,6 MPa/s. Na Tabela 5 são apresentados os valores de resistência à compressão encontrados neste estudo exploratório, os valores correspondem à média de três amostras ensaiadas. O ensaio foi realizado com as amostras secas. Não foram identificadas nas amostras ensaiadas estruturas definidas ou falhas, clivagens.

¹⁶ As características do maciço rochoso foram levantadas junto aos profissionais responsáveis por sua exploração

Tabela 5 - Resistência à compressão das rochas – estudo exploratório

Identificação	Resistência f_c (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
B-220	218,6	4,9
B-150	149,3	7,7
B-160	168,0	23,7
I-115	114,5	6,2
B-147	146,6	12,0
B-146	145,9	20,2
G-190	186,0	9,6
G-160	159,8	10,0
B-130	132,8	3,0
B-000	---, --	---

Na Tabela 5 se observa que há uma gama bastante ampla de valores de resistência à compressão entre as rochas avaliadas. Para os basaltos a resistência varia de 132,8 MPa a 218,6 MPa, para os granitos essa variação se encontra entre 159,8 MPa a 186,0 MPa.

3.1.2. Análise granulométrica

A curva granulométrica dos agregados graúdos, conforme abordado no item 2.6 deste trabalho influencia significativamente as propriedades do concreto, principalmente na sua reologia.

Para avaliação da análise granulométrica foram feitos ensaios em 2 amostras recolhidas nas centrais de britagem, uma de brita 1 e uma de brita 0. Cada amostra consistia aproximadamente em 15 kg de material.

A realização da análise granulométrica seguiu os procedimentos indicados na norma ABNT NBR NM 248 (2003). Na Figura 8 e na Figura 9 podem ser visualizadas as curvas granulométricas das amostras de agregados coletados nos britadores, respectivamente da brita 0 e 1. As Tabela 6 e 7 apresentam os resultados obtidos na análise granulométrica de cada amostra.

Tabela 6 – Composição granulométrica das amostras de brita 0 coletadas

Peneiras (mm)	% retido acumulado								
	B-220	B-150	B-160	B-147	B-146	G-190	G-160	B-130	B-000
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	1
12,5	0	0	0	1	0	0	5	0	35
9,5	37	0	12	42	3	8	26	5	79
6,3	99	51	67	96	56	72	77	63	99
4,8	100	100	84	100	100	100	98	97	100
2,4	100	100	100	100	100	100	100	100	100

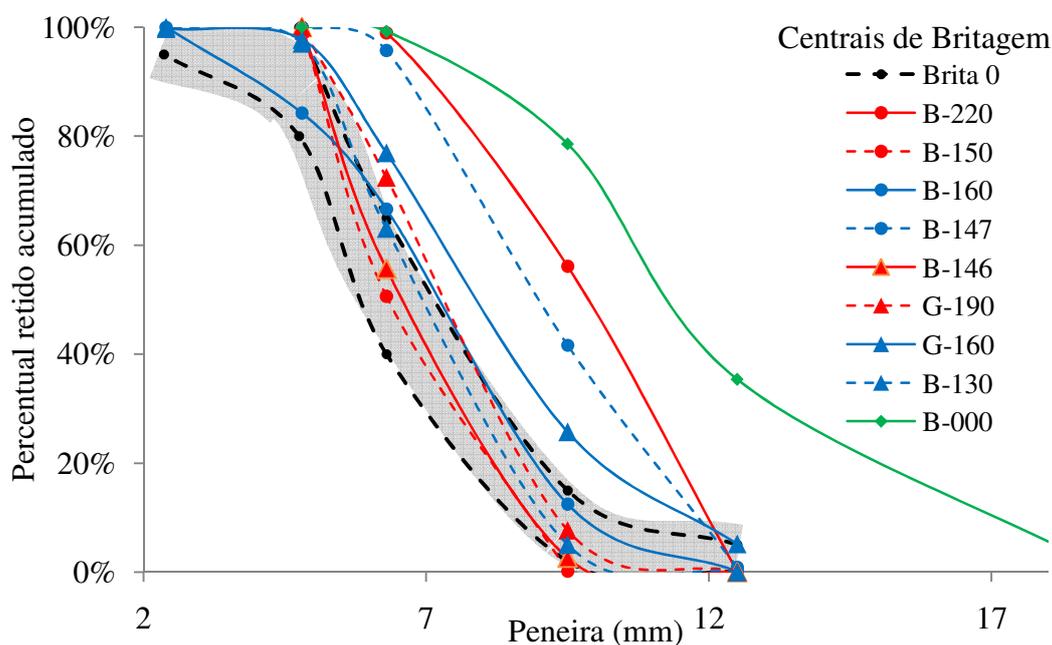


Figura 8 - Análise granulométrica da brita zero coletada nos britadores

A norma ABNT NBR 7211 (2009) estabelece limites para a distribuição granulométrica do agregado graúdo em função da dimensão da menor e da maior partícula. Assim, são estabelecidas zonas granulométricas, sendo estas identificadas pelo menor e o maior diâmetro. De acordo com a ABNT NBR 7211 (2009) são cinco zonas granulométricas: 4,75/12,5; 9,5/25; 19/31,5; 25/50; 37,5/75. A Figura 8 destaca na área com hachura a zona granulométrica compreendida entre 4,75/12,5 mm, comercialmente denominada brita 0. Através das curvas granulométricas é possível afirmar que os britadores B-150, B-146, B-160, e G-190 geram agregados que se enquadram dentro desta faixa granulométrica estabelecida pela ABNT NBR 7211 (2009), diferentemente dos agregados britados pelas demais centrais.

A Figura 9 apresenta destacada na área hachurada a zona granulométrica compreendida entre as peneiras 9,5/25 mm, comercialmente denominada brita 1. Através da análise das curvas granulométricas das amostras foi constatado que os britadores B-220, B-150 e G-190 geram agregados que se enquadram na faixa estabelecida pela ABNT NBR 7211 (2009), porém os agregados britados pelas demais centrais não se enquadram. A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos na análise granulométrica de cada amostra deste grupo.

Tabela 7 – Composição granulométrica das amostras de brita 1 coletadas

Peneiras (mm)	% retido acumulado								
	B-220	B-150	B-160	B-147	B-146	G-190	G-160	B-130	B-000
25	0	0	0	0	0	0	0	0	1
19	45	0	1	4	34	1	19	5	45
12,5	98	50	24	76	99	70	74	35	100
9,5	100	91	96	97	100	94	97	70	100
6,3	100	100	99	100	100	98	100	95	100
4,8	100	100	100	100	100	100	100	97	100

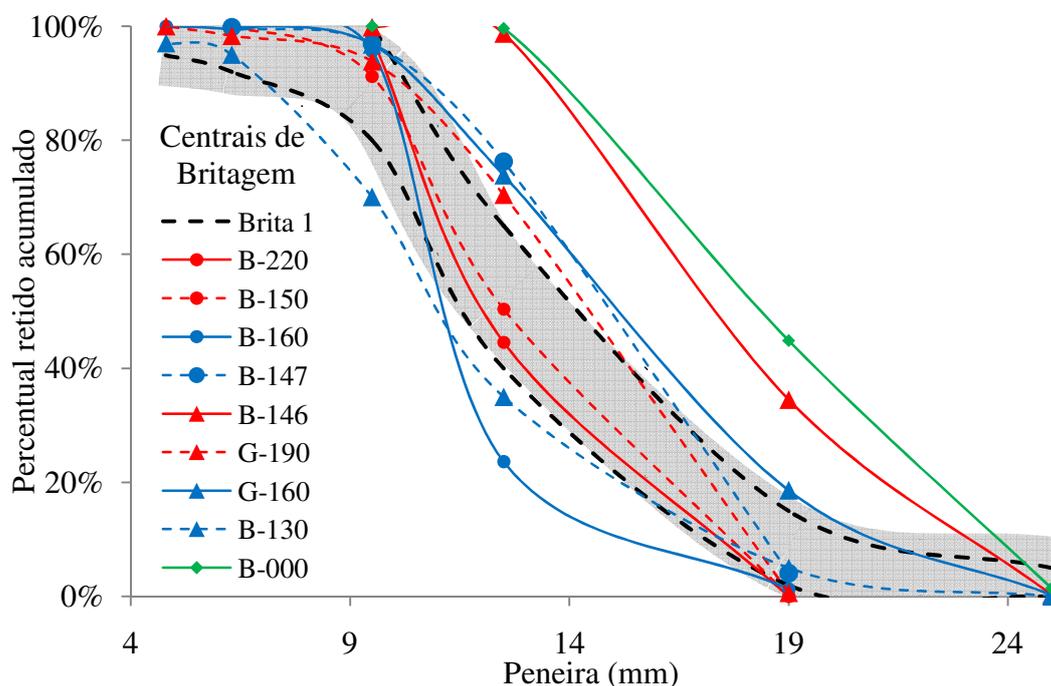


Figura 9 - Análise granulométrica da brita 1 coletada nos britadores

A análise granulométrica das amostras mostrou que há grande diferença entre as composições granulométricas dos agregados, mesmo que haja um padrão a ser seguido. Somente dois britadores, B-150 e G-190, ficaram dentro dos limites estabelecidos pela

ABNT NBR 7211 (2009) nas duas faixas pesquisadas. Todos os demais se mostraram fora dos limites recomendados para utilização em concreto para pelo menos uma das granulometrias analisadas.

3.1.3. Índice de forma

A norma ABNT NBR 7211 (2009) especifica que o índice de forma não deve ser superior a 3 para agregados em concreto, quando determinado de acordo com a ABNT NBR 7809 (2008). O índice de forma do agregado é a média da relação entre o comprimento e a espessura dos grãos de agregado, ponderada pela quantidade de grãos de cada fração granulométrica que o compõem. Tendo em vista a importância deste parâmetro nas propriedades reológicas do concreto, realizou-se este ensaio nas amostras coletadas para o estudo exploratório. A Figura 10 mostra as partículas separadas para avaliação do índice de forma, onde foram medidas 3.600 partículas.

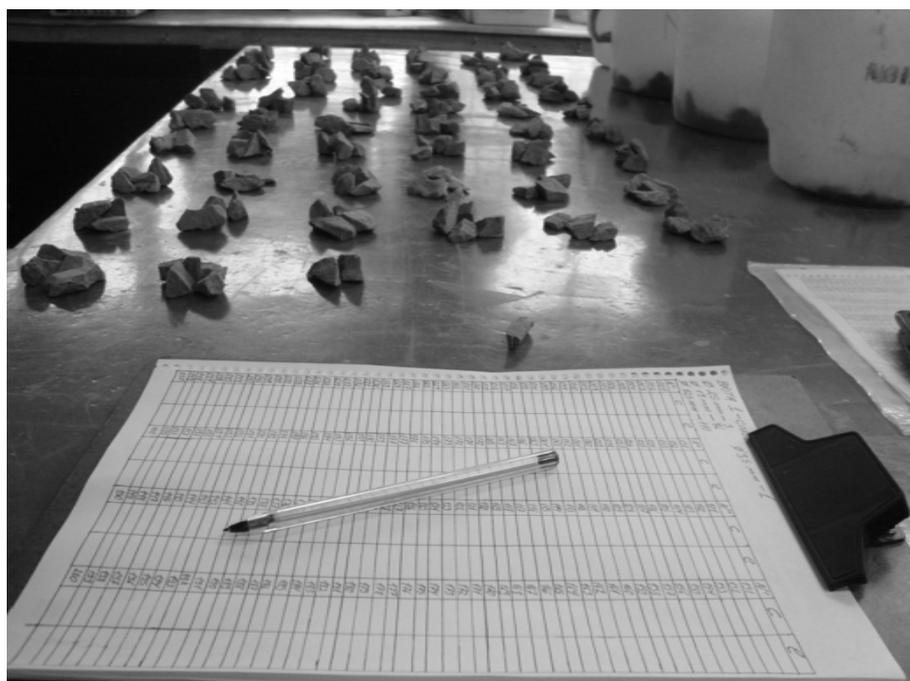


Figura 10 - partículas sendo analisadas quanto ao seu índice de forma

A Figura 11 apresenta os valores medidos para as britas 1 e 0 nas diferentes empresas britadoras analisadas.

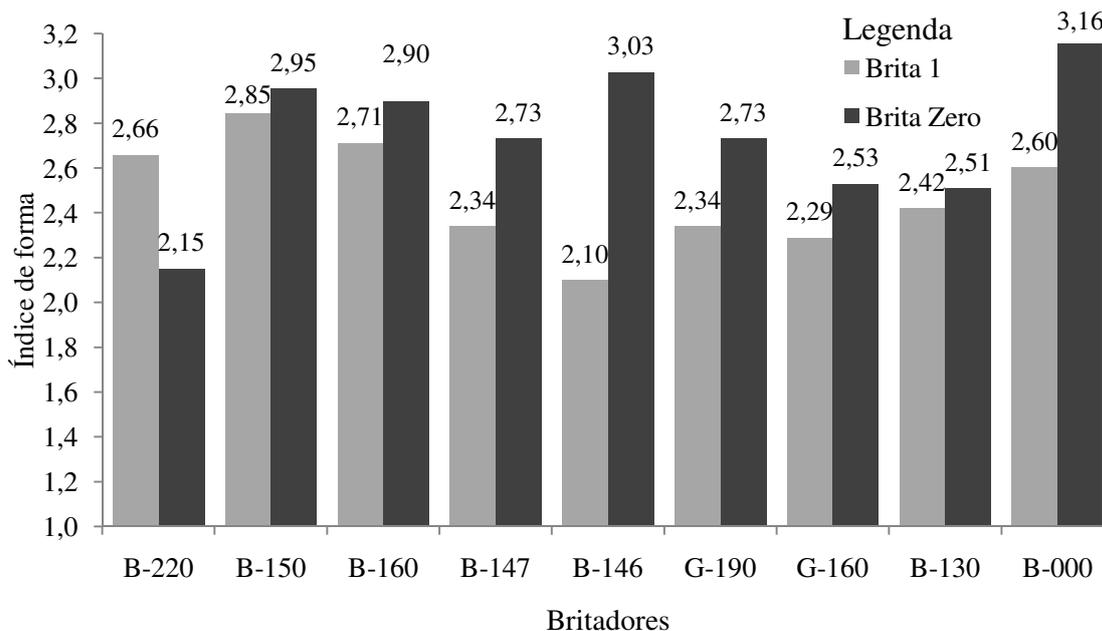


Figura 11 - índice de forma dos agregados brita 1 e brita 0 das diferentes empresas de britagem

Analisando a Figura 11 constata-se que, de maneira geral, o índice de forma das partículas é maior para as partículas de brita 0. Esta ocorrência é observada em todas as empresas de britagem, com exceção da empresa B-220.

Os valores extremos encontrados para brita 1 foram o mínimo de 2,1 e máximo de 2,85 e para brita 0 mínimo de 2,15 e máximo de 3,16. Observa-se que os índices das britas 0 nas empresas B-146 e B-000 encontram-se em desconformidade com a especificação da ABNT NBR 7211 (2009). Valores semelhantes foram relatados por Arndt, Souza e Bianchini (2007) em estudo realizado com agregados da região de Porto Alegre/ RS. No referido estudo, foram encontrados agregados com índice de forma de 1,8 a 4,0. Garlet e Reginato (2007) utilizaram agregados com índice de forma entre 2,03 e 3,49 oriundos da região de Caxias do Sul/RS. É importante salientar que o índice de forma tendendo à unidade corresponde à forma cúbica ou esférica.

3.1.4. Conclusão do estudo exploratório

O estudo exploratório propiciou a análise de um conjunto de agregados provenientes de rochas com resistências à compressão diferenciadas, de 114,5 MPa e 218,6 MPa. Quanto à composição granulométrica, constatou-se que também existe uma grande disparidade entre os agregados comercializados, sendo que muitos deles não atendem ao que especifica a ABNT NBR 7211 (2009). Quanto ao índice de forma pôde-se constatar

que os valores obtidos são compatíveis com os encontrados na literatura e, na sua maioria, apresentam mesma ordem de grandeza, podendo ser comparados entre si.

3.2. SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.2.1. Cimento

Para a produção dos concretos optou-se por utilizar o cimento com menos adições e mais puro e com maior resistência disponível no mercado. Esta escolha foi embasada no interesse de reduzir o número de variáveis envolvidas no estudo, bem como de obter maior resistência à compressão. Assim empregou-se o cimento Portland CP V ARI (cimento Portland de alta resistência inicial). Segundo a ABNT NBR 5733 (1991), o cimento utilizado respeita os limites com relação à proporção dos seus componentes químicos (Tabela 8), bem como em relação às suas exigências físicas e mecânicas (Tabela 9). O cimento CPV ARI compõe-se de 95% a 100% de clínquer e sulfatos de cálcio e entre zero e 5% de material carbonático.

Tabela 8 – Características químicas do cimento Portland CP V ARI empregado¹⁷

Propriedades Químicas	%	Limites: % (NBR 5733)
Resíduos insolúveis	1,0	1,0%
Perda ao fogo	3,30	< 4,5 %
Oxido de magnésio (MgO)	1,75	< 6,5 %
Trióxido de enxofre (SO ₃): - quando C ₃ A do clinquer < 8%	3,11	< 3,5 %

Tabela 9 – Características físicas e mecânicas do cimento Portland CP V ARI

Características e propriedades	Umidade	Fabricante	Limites	
		CP V ARI		
Finura (resíduo na peneira de 75 µm)	%	1,5	<6,0	
Tempo de início de pega	min.	160	>60	
Tempo de fim de pega	min	315	-	
Blaine	m ² /kg	446,7	>300	
Resistência à compressão	1 dia	MPa	24,2	> 14,0
	3 dias	MPa	35,5	> 24
	7 dias	MPa	41,0	>34
	28 dias	MPa	50,9	-

Massa específica determinada de acordo com ABNT NM 23 (2000) = 3,15 kg/dm³

¹⁷ Dados fornecidos pelo fabricante

A análise granulométrica a laser do cimento da Figura 12, feita no LACER – Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFRGS forneceu um resultado de 14,69 μm para o diâmetro médio das partículas de cimento. Essa análise apresenta os valores retidos individuais (barras) e o percentual retido acumulado (linha) em cada peneira. A Tabela 10, apresenta um resumo da análise granulométrica com o percentual passante em algumas peneiras.

Tabela 10 – Composição granulométrica resumida do CPV ARI

Diâmetro (μm)	% passante
1,99	10
11,92	50
31,04	90
14,69	médio

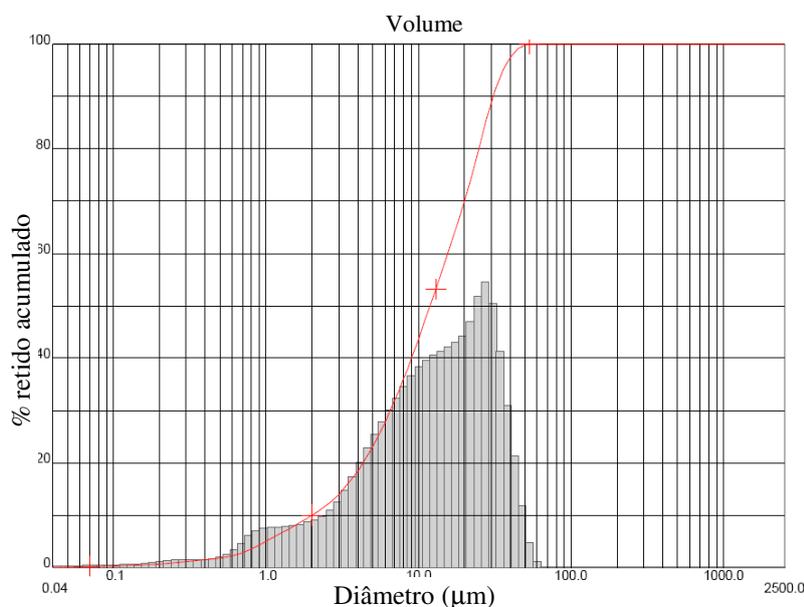


Figura 12 – Curva granulométrica do cimento Portland de alta resistência inicial utilizado

3.2.2. Sílica Ativa

O ensaio de granulometria a *laser* realizado no LACER – Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFRGS forneceu um resultado de 7,14 μm para o diâmetro médio das partículas de sílica ativa, cuja curva está ilustrada na Figura 13. A Tabela 11, apresenta um resumo da análise granulométrica com o percentual passante em algumas peneiras.

Tabela 11 – Composição granulométrica resumida da sílica ativa

Diâmetro (μm)	% passante
0,74	10
5,85	50
16,12	90
7,14	médio

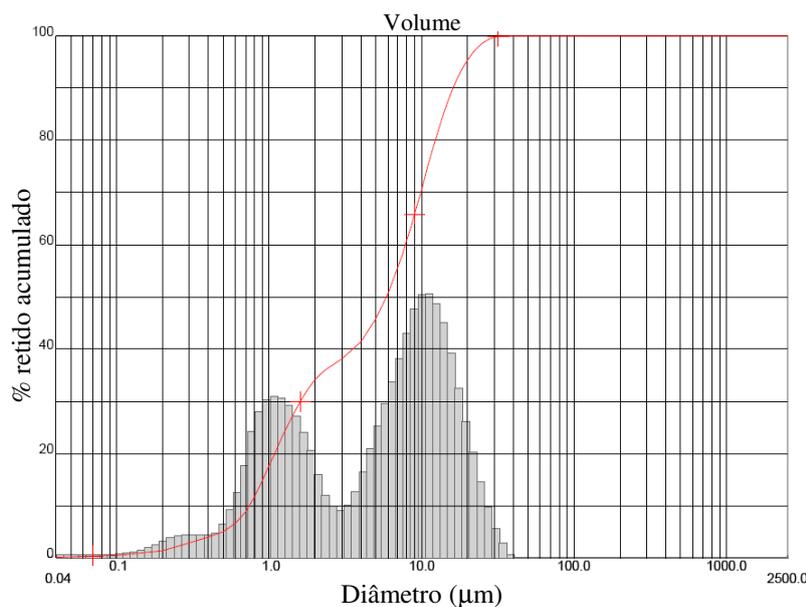


Figura 13 – Curva granulométrica da sílica ativa utilizada

Através do resultado do ensaio de granulometria da Figura 13 observa-se que as partículas de sílica ativa são menores do que as partículas de cimento, assim essas partículas contribuirão para um melhor preenchimento ou empacotamento granular do concreto, conferindo uma maior compactidade. Observa-se que a análise granulométrica a laser foi realizada sem dispersante, após a dispersão propiciada pela presença do aditivo superplastificante presente no concreto a sílica ativa apresenta-se ainda mais fina. A massa específica determinada de acordo com a ABNT NM 23 (2000) foi de 2,20 kg/dm^3 .

3.2.3. Agregado miúdo

A areia utilizada neste estudo foi uma areia natural quartzosa oriunda do rio Jacuí, região de Porto Alegre. O único processamento realizado no agregado miúdo foi o

peneiramento em peneira com abertura de 4,8 mm, aproveitando-se somente a parcela passante. Foi realizado o ensaio de determinação da composição granulométrica do agregado seguindo-se os procedimentos sugeridos na ABNT NM 248 (2003). Os resultados obtidos da caracterização física e a curva granulométrica do agregado miúdo podem ser observados, respectivamente, na Tabela 12 e na Figura 14.

Tabela 12 – Caracterização física do agregado miúdo

Determinações	Método de ensaio	Resultados obtidos		
		Peneiras (mm)	% retida	% retida acumulada
Composição granulométrica	ABNT NM 248 (2003)	4,80	0	0
		2,40	6	6
		1,20	11	17
		0,60	20	37
		0,30	36	73
		0,15	23	96
		Fundo	4	100
Dimensão máxima característica (mm)	ABNT NM 248 (2003)	4,80		
Módulo de finura	ABNT NM 248 (2003)	2,29		
Massa unitária (kg/dm ³)	ABNT NM 52 (2002)	1,55		
Massa específica (kg/dm ³)	ABNT NM 52 (2002)	2,61		

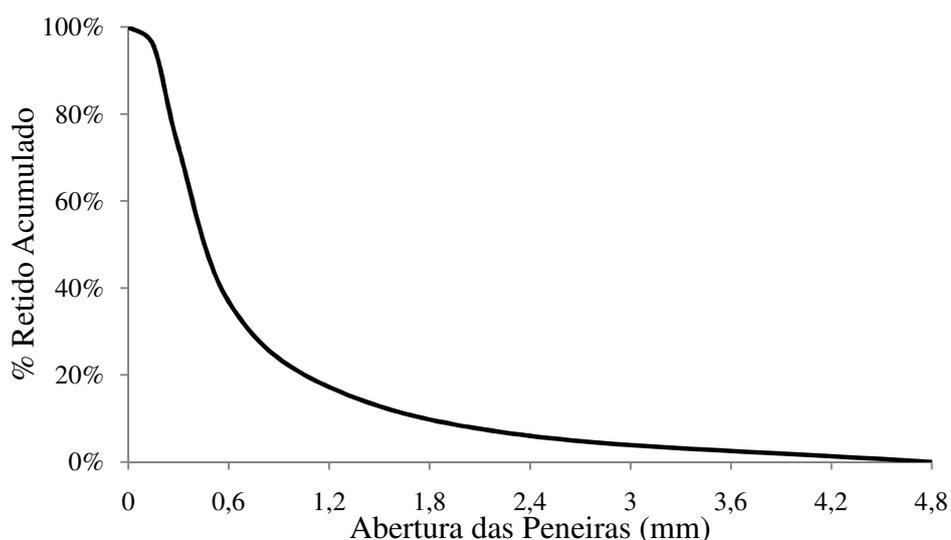


Figura 14 – Curva granulométrica do agregado miúdo utilizado

3.2.4. Agregado Graúdo

Neste trabalho foram utilizados três agregados distintos como já foi mencionado no item 3.1.4, oriundo de diferentes cidades do Rio Grande do Sul.

Foram realizados os ensaios de determinação de massa específica na condição saturada, superfície seca, massa específica seca em estufa e de absorção. Estes últimos ensaios foram feitos para cada fração granulométrica separadamente. É importante conhecer estas propriedades, pois o proporcionamento dos concretos foi definido em volume absoluto, uma vez que se está comparando agregados diferentes, estes dados estão resumidos na Tabela 13

Tabela 13 – Caracterização física do agregado graúdo

Ø retido (mm)	Rocha 220 MPa	Rocha 150 MPa	Rocha 130 MPa
Massa específica (kg/dm ³) na condição saturado superfície seca ABNT NM 53 (2002)			
4,8	2,92	2,79	2,60
6,3	2,92	2,78	2,61
9,5	2,93	2,81	2,61
12,5	2,93	2,81	2,61
19	2,93	2,81	2,60
Massa específica (kg/dm ³) na condição aparente seca ABNT NM 53 (2002)			
4,8	3,00	2,88	2,73
6,3	2,98	2,87	2,74
9,5	2,97	2,86	2,68
12,5	2,96	2,87	2,71
19	2,96	2,86	2,66
Absorção (%) ABNT NM 53 (2002)			
4,8	1,26	1,79	3,00
6,3	1,10	1,60	2,80
9,5	0,90	1,40	2,60
12,5	0,70	1,20	2,38
19	0,48	1,03	2,20
Massa específica (kg/dm ³)	2,93	2,80	2,61

3.2.5. Aditivo Superplastificante

O aditivo utilizado no presente trabalho foi um superplastificante de 3ª geração. O grande benefício do uso de aditivos superplastificantes é a redução do consumo de água. as principais características técnicas deste aditivo (segundo o fabricante) são as seguintes: base química – policarboxilatos; densidade – 1,067 à 1,107 g/cm³; pH – 5 à 7; teor de sólidos – 38 à 40%.

Os dados obtidos neste programa experimental são apresentados e analisados no capítulo seguinte.

3.3. ESCOPO DA PESQUISA

O programa experimental foi elaborado tendo como intuito de verificar se existe uma relação direta entre a resistência à compressão da rocha utilizada como agregado graúdo, sua dimensão máxima característica e as propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho.

3.4. VARIÁVEIS

3.4.1. Variáveis independentes

As variáveis independentes utilizadas neste programa experimental são descritas e justificadas nos itens 3.4.1.1 a 3.4.1.3.

3.4.1.1. Resistência à compressão das rochas utilizadas como agregado

Conforme descrito no capítulo 2 deste trabalho, a resistência à compressão da rocha utilizada na produção do agregado graúdo é um fator limitante da resistência à compressão do concreto de alto desempenho. A partir do estudo exploratório realizado nesta pesquisa, foram escolhidas 3 rochas com resistências diferentes: B-220 (218,6 MPa), B-150 (149,3 MPa), e B-130 (132,8 MPa). Delimitou-se assim o estudo a um grupo de rochas de origem basáltica.

O termo basalto na verdade inclui uma série de rochas diferentes formadas em condições distintas.

A rocha B-220 é um sill¹⁸. Sills são rochas que se cristalizaram em corpos subterrâneos ou em soleiras. São massas de magma que não conseguiram alcançar a superfície do terreno e formaram corpos, de formas altamente variáveis no subsolo. Os sills, diferentemente dos derrames superficiais de lava, têm maiores teores de cristais. Como a rocha teve mais tempo de esfriar, houve condições de formar cristais em maior número.

¹⁸ Informação obtida através de correspondência com o geólogo e professor Heinrich Theodor Frank

A rocha B-150 é oriunda de derrame de basalto¹⁹. Os derrames de basalto se constituem de corpos extrusivos onde a lava se resfriou muito rapidamente, formando um material preto de brilho vítreo. Os basaltos que possuem até 60% de (SiO₂). As formações rochosas deste tipo formam os chamados “lagos de lava”.

A rocha B-130 é oriunda de um derrame de riolito²⁰. Riolitos são corpos magmáticos tabulares, muito compridos e muito espessos, conhecidos popularmente como “basalto-carijó”. Diferentemente dos basaltos que possuem no máximo 60% de (SiO₂), os riolitos possuem mais de 64 % de (SiO₂), ou seja, um riolito possui muito mais quartzo e feldspato na sua composição do que os basaltos.

3.4.1.2. Dimensão máxima característica

A redução da dimensão máxima característica é recomendada para concretos de alto desempenho com resistência elevada. Sendo assim, com o intuito de mensurar a influência da variação da dimensão máxima característica na resistência à compressão do concreto moldado com rochas de diferentes resistências analisadas, definiu-se 5 níveis para dimensão máxima característica: 6,3; 9,5; 12,5; 19 e 25 mm.

3.4.1.3. Relação água/ aglomerante (consumo de água por m³)

Concretos de alto desempenho são caracterizados por apresentarem baixas relações água/aglomerante. Neste programa experimental buscou-se adotar diferentes relações água/aglomerante para analisar o comportamento das demais variáveis em concretos com diferentes resistências. Assim, foram definidos os valores de 0,50; 0,30; 0,25; 0,21; e 0,17, sendo a relação água/aglomerante 0,50 na dosagem de concretos convencionais. Já a relação água/aglomerante 0,17 foi definida tendo em vista os requisitos mínimos de trabalhabilidade adequados ao efetivo adensamento do concreto para as condições do laboratório onde os experimentos foram feitos.

Neste trabalho, no entanto a dosagem do concreto foi realizada considerando não a relação água/aglomerante, mas sim o consumo de água por metro cúbico de concreto conforme preconiza o método de dosagem proposto por Metha e Aïtcin (1990). Assim, neste estudo a relação água/aglomerante de 0,50 corresponde à um consumo de 200 litros de água por metro cúbico de concreto, a relação água/aglomerante de 0,30

¹⁹ Informação obtida através de correspondência com o geólogo e professor Heinrich Theodor Frank

²⁰ Informação obtida através de correspondência com o geólogo e professor Heinrich Theodor Frank

corresponde à um consumo de 160 litros de água por metro cúbico de concreto, a relação água/aglomerante de 0,25 corresponde à um consumo de 145 litros de água por metro cúbico de concreto, a relação água/aglomerante de 0,21 corresponde à um consumo de 130 litros de água por metro cúbico de concreto e a relação água/aglomerante de 0,17 corresponde à um consumo de 115 litros de água por metro cúbico de concreto.

3.4.2. Variáveis de resposta

Como variável de resposta adotou-se a resistência à compressão do concreto, sua resistência à tração e seu módulo de elasticidade. A determinação destas se deu através de corpos-de-prova moldados conforme a ABNT NBR 5738 (2008). Os corpos-de-prova permaneceram por 24 horas em ambiente de laboratório, protegidos por sacos úmidos para evitar a perda excessiva de água para o ambiente, a desmoldagem foi feita em seguida e os corpos-de-prova foram identificados e armazenados em câmara úmida até os 28 dias de idade, sendo, então, preparados para a realização dos ensaios mecânicos. Foram moldados 9 corpos-de-prova para cada traço de concreto, destes três foram ensaiados à compressão, três à tração por compressão diametral e três submetidos ao ensaio de módulo de elasticidade. Todos os ensaios foram realizados em corpos-de-prova de concreto cilíndricos de 10 por 20 centímetros. Os ensaios foram executados no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais da UFRGS, utilizando-se uma prensa hidráulica da marca Shimadzu de 2.000 kN.

3.4.2.1. Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão uniaxial dos concretos produzidos foi realizado, na idade de 28 dias, seguindo-se as prescrições da ABNT NBR 5739 (2007). A velocidade de carregamento foi de 0,45 MPa/s.

Preparação dos corpos-de-prova

No presente trabalho optou-se pela utilização do processo de retificação dos corpos-de-prova no processo de preparação dos corpos-de-prova. Este processo foi adotado em função dos resultados prévios obtidos por Ruduit e Cremonini (2009), os quais comprovaram este ser o tratamento superficial mais eficiente em concretos de maior resistência à compressão.

3.4.2.2. Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral dos concretos produzidos foi realizado na idade de 28 dias, seguindo-se as prescrições da ABNT NBR 7222 (2011). A velocidade de carregamento foi de 0,05 MPa/s até a ruptura do corpo-de-prova.

3.4.2.3. Módulo de elasticidade

O ensaio de determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação dos concretos produzidos foi realizado na idade de 28 dias, seguindo-se as prescrições da ABNT NBR 8522 (2008). O instrumento utilizado para medição das deformações foi um medidor mecânico com resolução de 1 ± 10^{-3} mm e erro relativo máximo inferior a 1%. A velocidade de carregamento foi de 0,45 MPa/s.

3.4.3. Fatores não variáveis do estudo

É de suma importância a definição dos elementos não variáveis no programa experimental. Pelo fato de serem dosados concretos com materiais com características diferentes, foram adotados os critérios do Método de Dosagem Mehta e Aïtcin (1990) como referência. No entanto, foram feitas extrapolações ao referido método, uma vez que o mesmo foi desenvolvido tendo em vista um horizonte mais restrito que o contemplado neste trabalho. As alterações feitas no método são explicadas nos itens 3.4.3.1, 3.4.3.2, e 3.4.3.3. O método de dosagem proposto por Mehta e Aïtcin (1990) já foi utilizado por diversos autores (ALVES, 2000; JUCÁ et al, 2001; CREMONINI et al, 2001).

3.4.3.1. Composição da fração aglomerante e água

Partindo-se das relações água/aglomerante definidas e da massa específica do cimento ($3,15 \text{ g/cm}^3$) e considerando que o teor de pasta é constante e igual a 35%, com 2% de teor de ar incorporado, pode-se calcular o volume de água das misturas. A Tabela 14 apresenta o consumo de água de acordo com o método proposto por Mehta e Aïtcin (1990) para as relações água/aglomerante: 0,17; 0,21; 0,25; 0,30; e 0,50.

Tabela 14 – Fração total de material aglomerante e relação agregado miúdo: agregado graúdo em função do teor de água por metro cúbico

Água	Ar	Material aglomerante	a/a	Fração miúda	Fração graúda
0,115	0,02	0,215	0,17	1,78	3,22
0,130	0,02	0,200	0,21	1,85	3,15
0,145	0,02	0,185	0,25	1,92	3,08
0,160	0,02	0,170	0,30	2	3
0,200	0,02	0,130	0,50	2,2	2,8

Observação: os valores em negrito são os valores extrapolados

3.4.3.2. Relação fração miúda/fração graúda

Segundo o método proposto por Mehta e Aïtcin (1990), a porção de agregado é fixada em 65% do volume total. Contudo, a relação entre a fração miúda e a fração graúda varia em função do consumo total de água. Isto justifica-se pelo fato de que com teor de pasta fixo, diminui-se a quantidade de água e aumenta-se a quantidade de finos (cimento e sílica ativa), reduzindo a necessidade de agregado miúdo para uma determinada consistência. A Figura 15 apresenta as relações agregado miúdo/agregado graúdo em função do consumo de água por metro cúbico de concreto, os valores propostos pelo método Mehta e Aïtcin (1990) e os valores propostos por este trabalho.

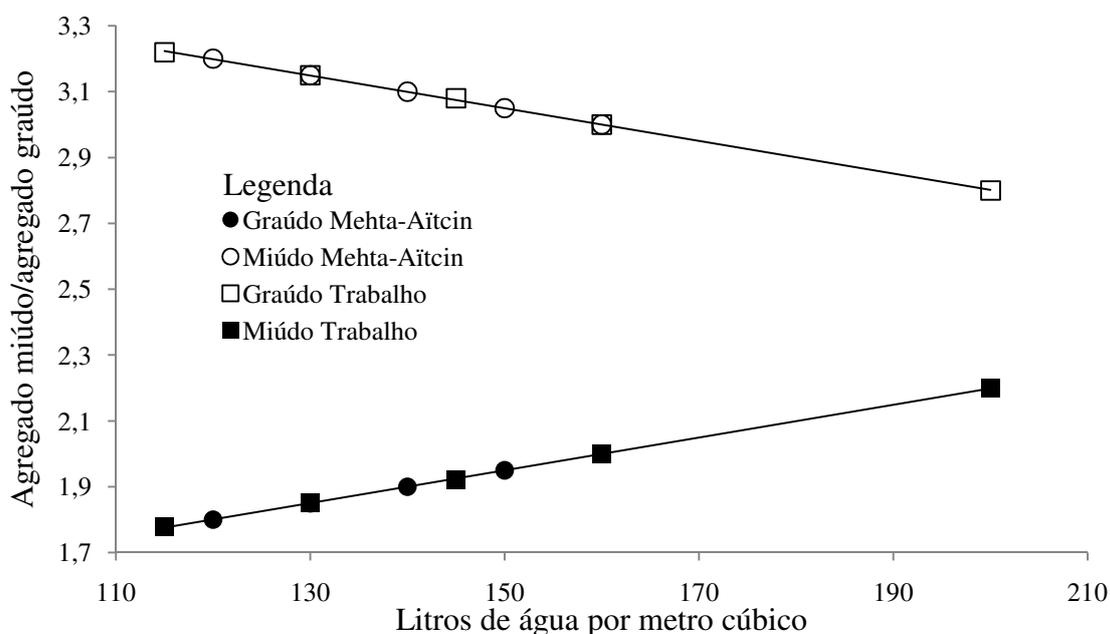


Figura 15 - Relação agregado miúdo: agregado graúdo em função do consumo de água por metro cúbico de concreto

3.4.3.3. Composição granulométrica do agregado graúdo

Devido à grande diversidade de composições granulométricas encontradas no estudo exploratório realizado, adotou-se uma distribuição granulométrica única.

Pelo fato de a dimensão máxima característica ser uma das variáveis deste programa experimental, a distribuição granulométrica escolhida foi a Curva Fuller. Através da Equação 10, para cada dimensão máxima característica calculou-se a distribuição granulométrica correspondente. A Figura 16 mostra as curvas granulométricas correspondentes às dimensões máximas características de 25, 19, 12,5, 9,5 e 6,3 mm. As zonas com hachura mostram as faixas granulométricas correspondentes à brita zero e um.

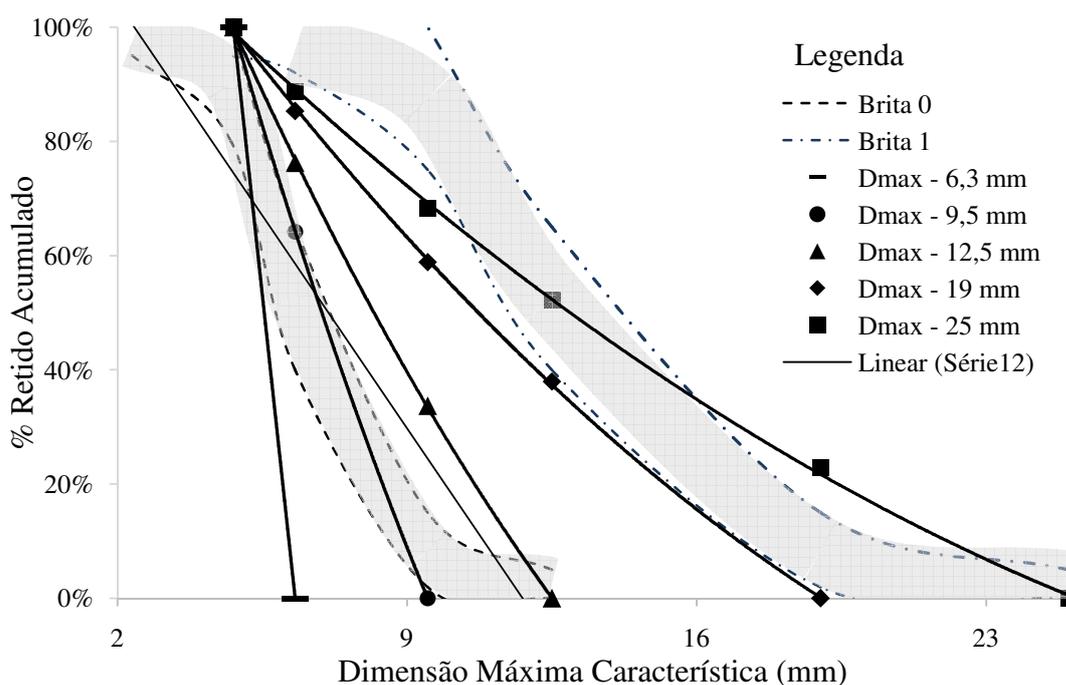


Figura 16 – Curvas granulométricas correspondentes às dimensões máximas características de 25 – 19 – 12,5 – 9,5 – 6,3 mm

3.5. MATRIZ EXPERIMENTAL

A partir das variáveis utilizadas no programa experimental deste estudo, elaborou-se uma matriz experimental que contempla as combinações das variáveis estudadas e suas interações. A Figura 17 apresenta uma representação gráfica da matriz experimental, composta por três dimensões: consumo de água por metro cúbico de concreto, dimensão máxima característica do agregado e resistência à compressão da rocha. Somente as combinações destacadas na cor branca foram efetivamente executadas.

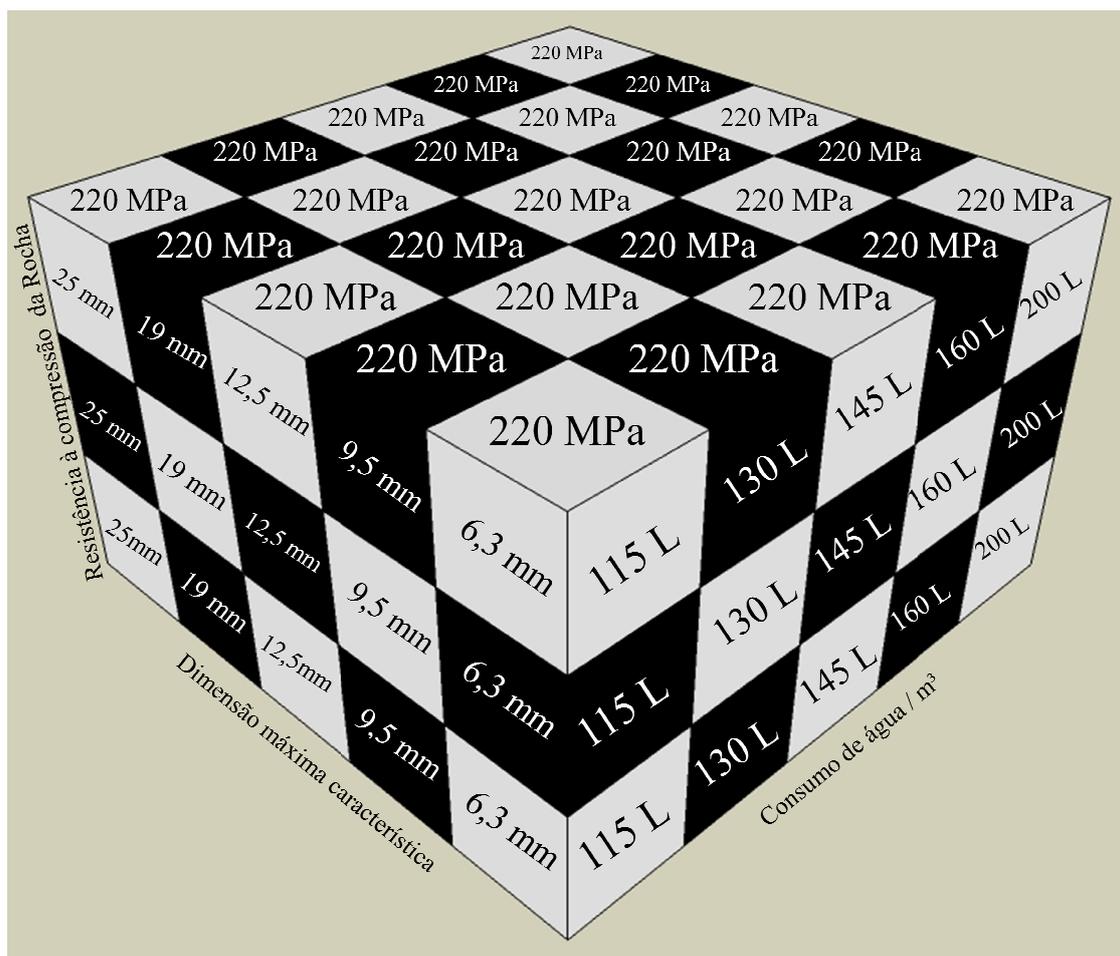


Figura 17 - Matriz experimental utilizada no presente trabalho

Sabendo que os três fatores controláveis estabelecidos possuem cinco, cinco e três níveis fixos, seriam necessárias 75 combinações das variáveis controláveis (traços de concreto). Neste sentido, a utilização de um projeto experimental do tipo fatorial fracionado permite que seja possível avaliar o comportamento das propriedades em

questão, considerando os parâmetros de controle executando somente uma parte dos ensaios (RIBEIRO, KULAKOWSKI e DAL MOLIN, 2005).

O apêndice 1 – projeto experimental fracionado – apresenta as combinações escolhidas para realização dos ensaios. Adotou-se o modelo de fracionamento cubo, centro e estrela para o fracionamento. Neste modelo os pontos dos vértices do cubo, ou pontos da parte fatorial, permitem determinar a estimativa de termos lineares e interações existentes. Já os pontos determinados a partir da estrela estimam os efeitos quadráticos puros, enquanto os pontos centrais testam os efeitos lineares e quadráticos. (RIBEIRO, KULAKOWSKI e DAL MOLIN, 2005).

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo é apresentada a interpretação, análise e discussão dos resultados obtidos no programa experimental (capítulo 3). As análises foram realizadas com o auxílio de *pacotes* estatísticos e estão descritas na seqüência, para cada experimento executado. Posteriormente foi modelado através de regressão numérica o comportamento estudado criando modelos matemáticos com objetivo de prever as propriedades estudadas do material.

4.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A Tabela 15 resume os resultados obtidos para resistência à compressão uniaxial (Anexo 2), onde cada valor apresentado representa a média de três observações experimentais.

Percebe-se claramente, pela observação dos valores da desta tabela, que os fatores consumo de água e dimensão máxima característica têm uma influência direta sobre a resistência à compressão. A influência da dimensão máxima característica é maior para concretos produzidos com consumo de água menor. Já a resistência à compressão da rocha, de maneira geral, não originou grande alteração na resistência à compressão do concreto.

Através da análise dos dados experimentais pode-se destacar que o desvio padrão da resistência à compressão das repetições de uma mesma combinação foi em média igual a 2,3 MPa. É interessante notar que o desvio padrão médio para o consumo de água de 200 litros foi de 1,1 MPa e aumentando com o incremento da resistência à compressão do concreto. Para o consumo de 115 litros de água o desvio padrão médio para as repetições de uma mesma combinação foi de 3,0 MPa.

Tabela 15 - Resistência à compressão aos 28 dias de idade (MPa)²¹

Consumo Água (l)	\varnothing_{Max} (mm)	Resistência da Rocha (MPa)								
		220			150			130		
		Média	DP ²²	CV% ₂₃	Média	DP	CV%	Média	DP	CV%
115	6,3	132,3	1,81	1,37				125,2	0,61	0,49
	9,5				119,7	6,60	5,51			
	12,5	125,0	5,12	4,10				124,0	2,30	1,85
	19				119,8	4,10	3,42			
	25	109,2	1,54	1,41				109,2	2,01	1,84
130	6,3				112,6	2,92	2,59			
	9,5	100,9	3,08	3,05				109,1	2,56	2,35
	12,5				107,2	2,45	2,29			
	19	101,0	4,28	4,23				102,8	1,97	1,91
	25				102,1	5,38	5,26			
145	6,3	87,0	2,77	3,18				98,4	2,13	2,17
	9,5				82,0	0,74	0,90			
	12,5	86,7	4,97	5,73				89,7	1,96	2,18
	19				78,3	1,44	1,84			
	25	76,1	2,73	3,59				83,7	1,76	2,11
160	6,3				69,0	0,87	1,26			
	9,5	64,0	1,12	1,75				70,3	3,52	5,01
	12,5				61,3	0,79	1,29			
	19	63,9	0,11	0,17				64,9	4,91	7,56
	25				57,9	1,06	1,83			
200	6,3	41,9	0,68	1,62				41,9	1,21	2,88
	9,5				42,0	1,18	2,82			
	12,5	37,8	1,06	2,81				41,8	1,23	2,95
	19				38,7	1,29	3,33			
	25	39,9	2,01	5,04				41,1	0,16	0,38

²¹ Cada valor representa a média de três observações experimentais²² DP – Desvio Padrão²³ CV% - Coeficiente de Variação (%)

Para comprovar estatisticamente a influência de cada fator estudado, bem com verificar se existe alguma interação significativa entre eles, foi realizada uma análise de variância, apresentada na Tabela 16. O uso da análise de variância na comparação de grupos está baseado na relação da variabilidade das médias entre os grupos e na distribuição de Fischer (F), com nível de significância α . Neste trabalho, todos os testes estatísticos foram feitos adotando um nível de significância de $\alpha=0,05$. O teste de significância F é feito contra a média quadrada do erro (MQR), por exemplo, para testar o efeito da A, utiliza-se $F_A=MQA/MQR$ e se $F_A > F\alpha(\nu_1, \nu_2)$, a hipótese de que não existe um efeito significativo do fator A é rejeitada. Neste exemplo ν_1 e ν_2 são, respectivamente, os graus de liberdade do fator A e do erro.

Tabela 16 – Análise de variância (ANOVA) para resistência à compressão

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Probab.	S/N
A: Água	94.571,46	4	23.642,87	1.593,43	0,00%	S
B: Fcg	170,85	2	85,42	5,76	0,64%	S
C: DMC	1.597,69	4	399,42	26,92	0,00%	S
AB	550,35	8	68,79	4,64	0,05%	S
AC	940,88	16	58,80	3,96	0,02%	S
BC	372,63	8	46,58	3,14	0,77%	S
ABC	853,50	32	26,67	1,80	4,08%	S
Erro	578,67	39	14,84			
Total	99.636,03	113				

A: consumo de água; B: resistência à compressão da rocha; C: dimensão máxima característica. GDL: graus de liberdade; SQ: soma quadrada; $MQ=SQ/GDL$: média quadrada; F: valor calculado de F: valor calculado da distribuição de Fischer; S/N: efeito significativo (S) e não significativo (NS).

Pela análise de variância, todos os fatores e suas interações foram significativos, sendo discutidas a seguir.

4.1.1. Efeito do fator consumo de água na resistência à compressão

É consenso, no meio técnico, que a resistência de um concreto depende, fundamentalmente, da sua relação água/aglomerante desde que o mesmo esteja plenamente adensado. A análise de variância dos dados comprova, mais uma vez, a importância da relação água/aglomerante na resposta do experimento. Sendo os teores de pasta constantes nos concretos estudados neste trabalho, a relação água/aglomerante é diretamente proporcional ao consumo de água por metro cúbico, ou seja, o menor teor de água apresenta o maior consumo de aglomerante. O valor da média quadrada (MQ) mostra que o consumo de água é o principal fator de resposta para resistência à compressão do concreto.

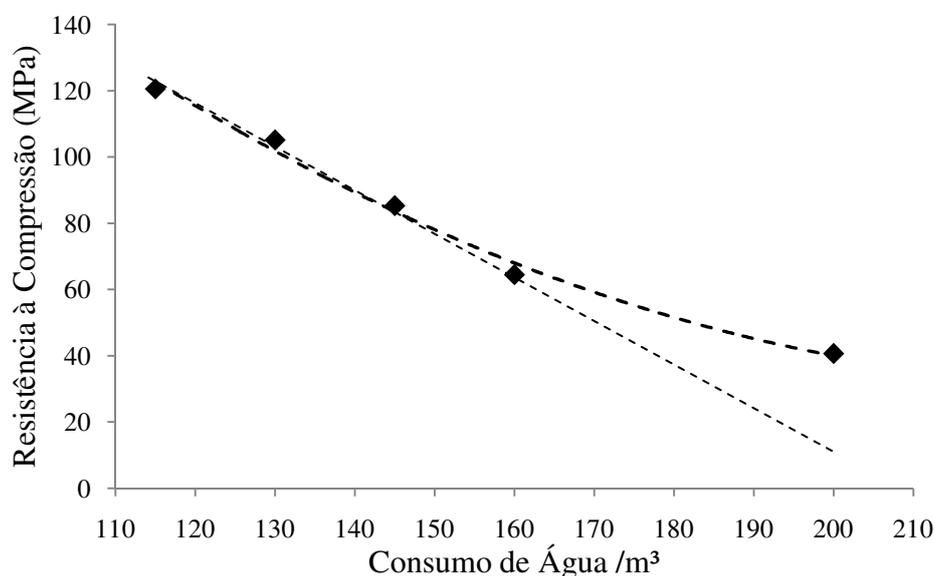


Figura 18 - Efeito do consumo de água na resistência à compressão média do concreto

Como já foi destacado no item 2.1, há diferentes modelos que fornecem uma estimativa bastante precisa da resistência a partir da relação água/cimento. Os modelos fundamentais mais conhecidos são os de Feret e de Abrams. A Figura 18 apresenta a influência na média da resistência à compressão para cada consumo de água. Destacam-se, através da observação da Figura 18 que o concreto produzido com consumo de 200 litros de água apresenta comportamento médio não linear quando comparado com os demais consumos. Observa-se que para concretos produzidos com consumos menores que 160 litros de água a resistência à compressão é linearmente proporcional ao consumo de água, fato já observado por Mehta e Aïtcin (1990). Para os concretos

convencionais, com maiores consumos de água ou relações água/aglomerante mais elevadas, observa-se uma tendência exponencial entre a relação água/aglomerante e a resistência à compressão. Este fato explica o não alinhamento do ponto de consumo de água 200 litros (concreto convencional), com os demais pontos (concreto de alto desempenho) mostrados Figura 18.

Outro aspecto interessante que pode ser observado na Figura 18 é o aumento relativo da resistência em função da redução do consumo de água, e decorrente diminuição da relação água/aglomerante. Tomando o metro cúbico do concreto produzido com 200 litros de água como referência, observa-se que o concreto produzido com 115 litros de água, isto é, 42,4% menos água, apresenta uma resistência média à compressão 300% superior. Como o volume de pasta é constante em todos os traços de concreto neste estudo, a diminuição do volume de água implica no aumento do consumo de aglomerante. No entanto este aumento em massa representou apenas 65% mais aglomerante no traço com consumo menor de água, quando comparado ao traço de maior consumo de água. A Figura 19 apresenta um comparativo entre a resistência à compressão média e o consumo de aglomerante para cada 10 MPa de resistência à compressão, para cada consumo de água. Nota-se que para concretos com consumo de 115 litros de água por metro cúbico são necessários 54,5 kg de aglomerante para se produzir 10 MPa de resistência enquanto para concretos com o consumo de 200 litros de água são necessários 97,8 kg de aglomerante para produzir os mesmos 10 MPa de resistência à compressão.

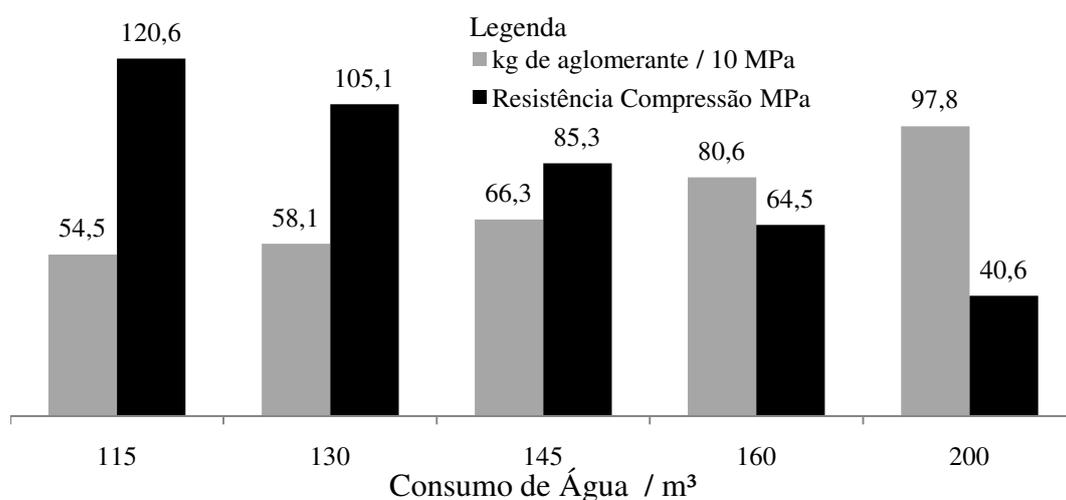


Figura 19 – Resistência à compressão média e consumo de cimento por 10 MPa de resistência para cada consumo de água

4.1.2. Efeito do fator resistência à compressão da rocha na resistência à compressão do concreto

A resistência à compressão da rocha é o fator, entre as variáveis analisadas, que menos impactou na resistência à compressão. Isso pode ser comprovado pela média quadrada (MQ), menor do que para os outros fatores e pela pequena alteração na média geral das resistências que pode ser observada na Figura 20.

Analisando a Tabela 15, de maneira geral se observa que, a partir da rocha com a menor resistência à compressão (130 MPa) foram produzidos concretos com resistência média à compressão maiores do que as demais. Esse aumento, no entanto, não é homogêneo. Para o menor consumo de água e o menor tamanho de agregado, o concreto mais resistente foi o produzido com a rocha mais resistente (220 MPa). Para outros concretos, como os produzidos com 130, 145 e 160 litros de água por metro cúbico, a comparação entre as médias mostra que os concretos confeccionados com o agregado menos resistente apresentam maior resistência à compressão.

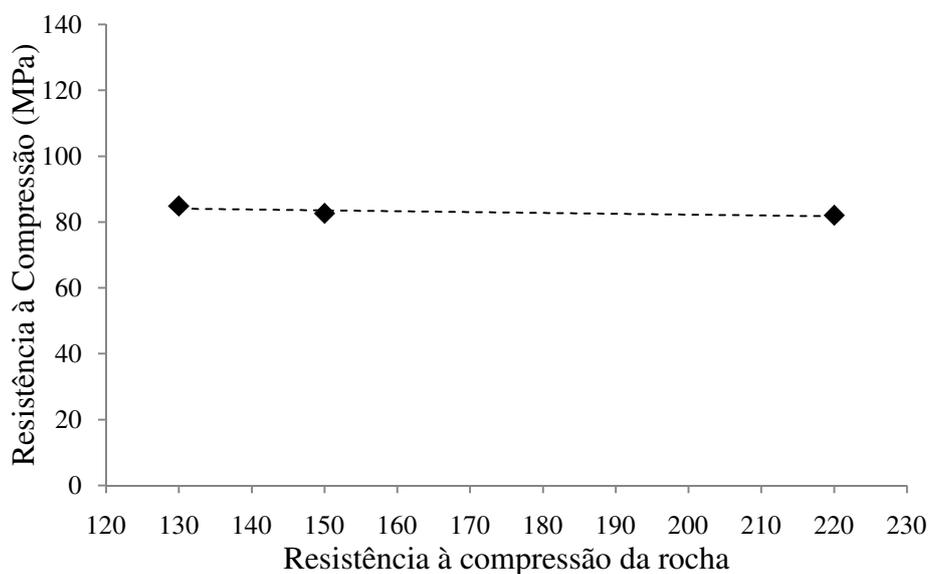


Figura 20 - Efeito da resistência à compressão da rocha na resistência à compressão média do concreto

Já para as misturas feitas com 200 litros de água por metro cúbico, o tipo de rocha parece não apresentar influência. Esta ocorrência para concretos convencionais, feitos a partir de rochas distintas, porém mantendo-se a mesma relação água/aglomerante, já foi relatado em outros trabalhos como em Ke-Ru-Wu *et al* (2001).

Já para concretos de alto desempenho com resistência elevada, autores como Aïtcin e Mehta (1990), notaram que a pasta de cimento endurecida e a zona de transição não são mais as únicas limitantes da resistência. Assim o limite de resistência dos concretos passa muitas vezes a ser dado pelo agregado graúdo.

Ke-Ru-Wu et al (2001), exemplificaram muito bem esta condição. Os referidos autores produziram concretos com relação água/cimento de 0,26, com agregados de resistência à compressão de 95, 98, 150 e 210 MPa. Os concretos produzidos com agregados cuja resistência à compressão era 150 e 210 MPa apresentaram resistência da ordem de 100 MPa, enquanto os concretos produzidos com agregados de resistência 95 e 98 MPa tiveram sua resistência limitada em 80 MPa. Neste caso, claramente, a resistência do agregado limitou a resistência do concreto.

A partir desta observação Ke-Ru-Wu et al (2001) afirmam que em concretos com alta resistência à compressão, as tensões na interface são aumentadas de tal maneira que, sob carga, as fissuras podem se estender através do agregado, o que faz uso do potencial da resistência total das partículas de agregado graúdo. Assim, segundo os autores, o agregado graúdo desempenha um papel importante na resistência.

Contudo, a análise da Figura 20 não permite corroborar esta afirmação, pois se o concreto de alto desempenho fizesse uso do potencial da resistência total das partículas de agregado graúdo o concreto seria tanto mais resistente quanto mais resistente fosse o agregado. Isto não foi observado no presente estudo experimental.

É importante destacar que diferentemente do trabalho de Ke-Ru-Wu et al (2001), neste trabalho o agregado de menor resistência à compressão apresentava resistência equivalente ao concreto de maior resistência. Respeitada esta condição, pode-se afirmar através da análise dos dados obtidos no programa experimental, que o aumento da resistência do agregado não é convertido no aumento da resistência do concreto.

Entende-se como uma possível explicação para os fatos observados que tanto pela resistência à compressão quanto pela densidade de massa, o módulo de elasticidade da rocha aumenta com o aumento da resistência à compressão. Considerando que para cada consumo de água o módulo de elasticidade da argamassa dos concretos estudados eram iguais, a diferença do módulo da argamassa para o módulo do agregado é tão maior quanto maior a diferença de resistência existente entre eles. A diferença de módulo de

elasticidade da rocha e da argamassa durante o processo de carregamento produzem tensões na interface argamassa agregado que, por sua vez, serão tanto maiores quanto maior for a diferença existente entre o módulo de deformação destas fases, podendo proporcionar o aparecimento e propagação de fissuras na interface, que favorecem a ruptura do concreto.

Zhou, Lydon e Barr (1995) produziram um conjunto de misturas de concreto de alto desempenho com teor fixo de argamassa (em volume) de 54% e seis tipos diferentes de agregados: argila expandida, aglomerado de cinza, calcário (angular), seixo (arredondado), esferas de vidro (10mm) e esferas de aço (3mm). Os seis traços de concreto foram produzidos com o mesmo volume de agregado graúdo. A Tabela 17 apresenta os um resumo dos dados produzidos no referido estudo.

Tabela 17 – Estudo experimental (ZHOU, LYDON e BARR, 1995)

Agregado	ρ	ϕ_{\max} (mm)	E_{agregado} (GPa)	γ_{mistura} (kg/m ³)	E_c (GPa)	f_c (MPa)
Argamassa	-	-	-	2.290	40,8	91
Argila expandida	0,80	10	5,2	1.540	18,6	28
Aglomerado de cinza	1,52	6	18,2	1.990	30,2	74
Calcário	2,64	10	56	2.430	49,5	91
Seixo	2,57	10	54	2.460	51,3	88
Esferas de vidro	2,52	10	72	2.390	52,8	96
Esferas de aço	7,85	3	210	4.620	69,9	83

(ρ) - densidade; (ϕ_{\max}) – dimensão máxima característica; E_{agregado} - do agregado; γ_{mistura} - massa específica da mistura; E_c – módulo de elasticidade do concreto; f_c – resistência à compressão.

Os resultados apresentados por Zhou, Lydon e Barr, (1995) e mostrados na Tabela 17, corroboram com os resultados experimentais encontrados neste trabalho. Nota-se que as maiores resistências à compressão são obtidas com concretos produzidos com agregados cuja ordem de grandeza do módulo de elasticidade é semelhante à da argamassa.

4.1.3. Efeito do fator dimensão máxima característica na resistência à compressão do concreto

O fator dimensão máxima característica do agregado graúdo foi considerado estatisticamente significativo na variável de resposta. A Figura 21 mostra a influência média da dimensão máxima característica na resistência à compressão. Observa-se que a resistência aumenta inversamente à dimensão máxima característica. A média quadrada obtida na análise de variância confirma a importância deste parâmetro na resistência do concreto.

Os motivos pelos quais se observa esse comportamento da resistência à compressão já foram destacados no item 2.5. A menor probabilidade de haverem partículas contendo falhas e a maior homogeneidade do concreto, resultado da existência de menores zonas de transição, são os principais agentes.

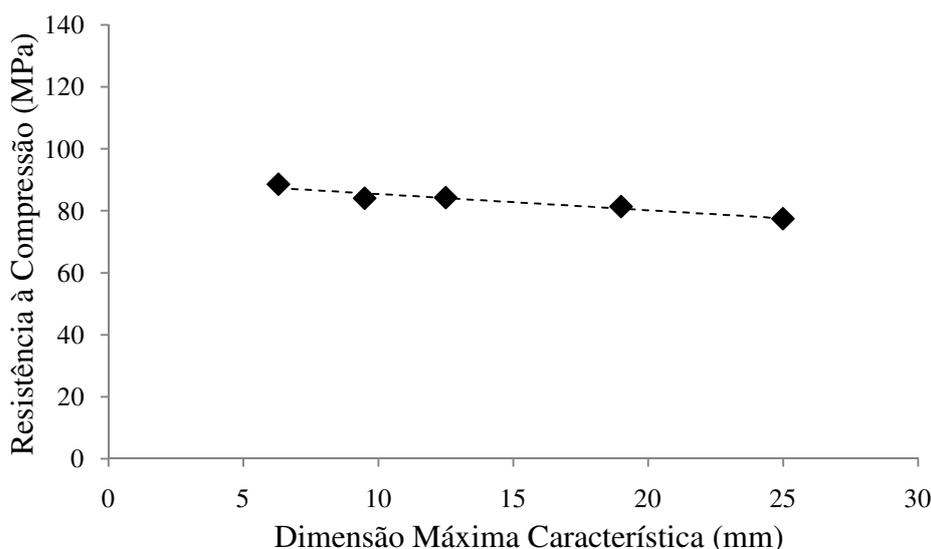


Figura 21 - Efeito da dimensão máxima característica do agregado graúdo na resistência à compressão média do concreto

É importante destacar que através da análise da Tabela 15, observa-se que o aumento da resistência a compressão é mais significativo para os menores consumos de água.

O efeito do fator dimensão máxima característica apresentou a segunda maior média quadrada na análise de variância, (Tabela 16), sendo, portanto, este o segundo fator, entre os avaliados, que mais influenciou a resistência à compressão do concreto.

Pompeu (2004) relata em seus resultados que para concretos com resistência entre 47 e 61 MPa, produzidos com basalto, a resistência à compressão é afetada pela dimensão máxima característica. O referido autor constatou um aumento da resistência à compressão do concreto com a redução da dimensão máxima característica. No estudo foram utilizados agregados com dimensão máxima característica de 19 mm e 9,5 mm e o acréscimo de resistência observado foi da ordem de 7,5 a 18,5%, dependendo do teor de agregado utilizado na dosagem.

A redução da dimensão máxima característica é um dos fundamentos da tecnologia de concretos pó reativo, cuja resistência ultrapassa os 200 MPa. Segundo Vanderlei (2004), o agregado graúdo de concreto é um material rígido, e na aplicação de cargas de compressão aparecem tensões de tração e cisalhamento na interface pasta/agregado, gerando fissuras na mesma. Segundo o autor, o módulo de elasticidade da pasta é cerca de 3 vezes inferior que o módulo de elasticidade do agregado graúdo. Já o tamanho das fissuras está relacionado com a extensão da zona sob tensão de tração ou de cisalhamento. No caso de agregado esférico, o tamanho da fissura é diretamente proporcional ao diâmetro do agregado. Ou seja, com a tensão de compressão o concreto deforma, contudo a pasta cimento, por apresentar módulo de elasticidade menor do que o agregado, deforma mais do que as frações rochosas. Esta diferença de deformação cria tensões no entorno das partículas. Quando estas tensões de tração ou cisalhamento ultrapassam a capacidade da resistência da pasta, esta é microfissurada. Como o tamanho das fissuras oriundas deste processo é diretamente proporcional ao tamanho do agregado, o aumento do tamanho do agregado graúdo implica em microfissuras maiores, quando comparada com o que a mesma tensão provocaria em um concreto de mesma matriz e agregados menores. Assim, antes da ruptura, o concreto produzido com agregados de menor dimensão resiste a tensões mais elevadas.

4.1.4. Interações

Além dos fatores principais, as interações destes fatores entre si se mostraram significativas. A interação entre o consumo de água e a resistência à compressão da rocha mostrou-se significativa na análise de variância. A ocorrência significativa desta interação ocorreu, pois para o menor consumo de água o concreto produzido com a rocha de maior resistência apresentou-se mais resistente que os demais. Já para os demais casos os concretos produzidos com a rocha menos resistente apresentaram os maiores valores de resistência. Já para o maior consumo de água, como citado anteriormente, não houve mudança perceptível nas resistências médias. A Figura 22 apresenta a interação entre o consumo de água e a resistência à compressão da rocha.

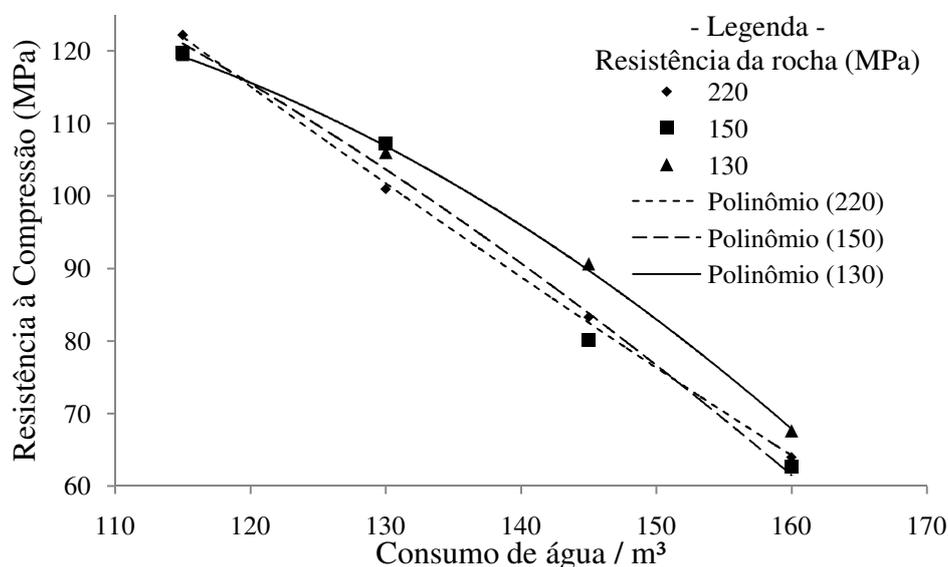


Figura 22 – Efeito da interação entre o consumo de água e a resistência à compressão da rocha

A interação entre o consumo de água e a dimensão máxima característica do agregado aconteceu da mesma maneira. Para o maior consumo de água não houve alteração da média das resistências. Contudo, com a diminuição do teor de água, e conseqüente aumento da resistência, o efeito benéfico da diminuição da dimensão máxima característica foi maior, conforme também já foi constatado por outros autores como Aïtcin (2000). A Figura 23 apresenta a interação do consumo de água com a dimensão máxima característica do agregado, este resultado está totalmente de acordo com a literatura existente.

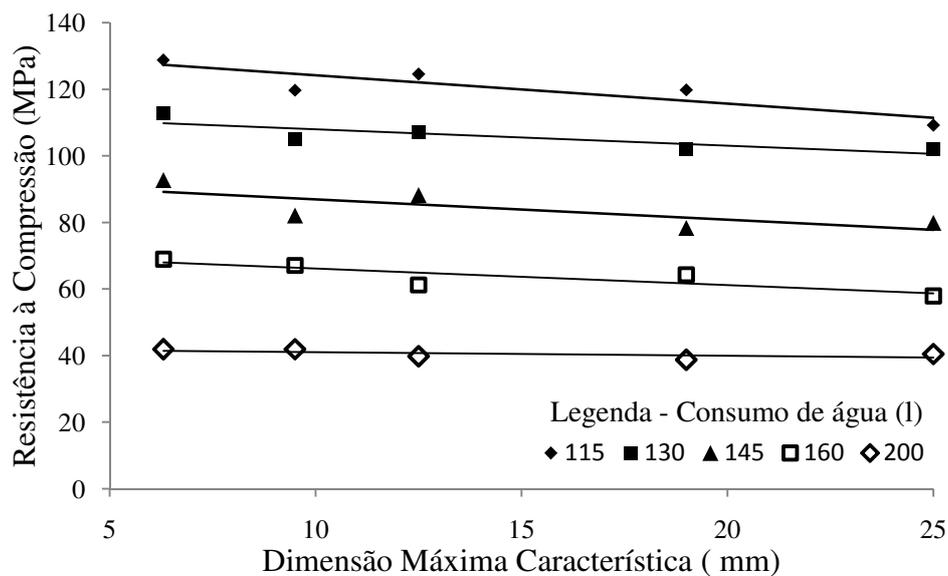


Figura 23 - Efeito da interação do consumo de água e da dimensão máxima característica

Já a interação entre a dimensão máxima característica do agregado e a resistência à compressão da rocha mostrou-se significativa. Isto pode ser entendido como uma indicação de que cada rocha contém diferentes características e estas características não são homogêneas. Isto é, uma rocha ter o seu tamanho reduzido pode se apresentar mais significativo do que para outra. A Figura 24 apresenta a interação da dimensão máxima característica com a resistência à compressão da rocha.

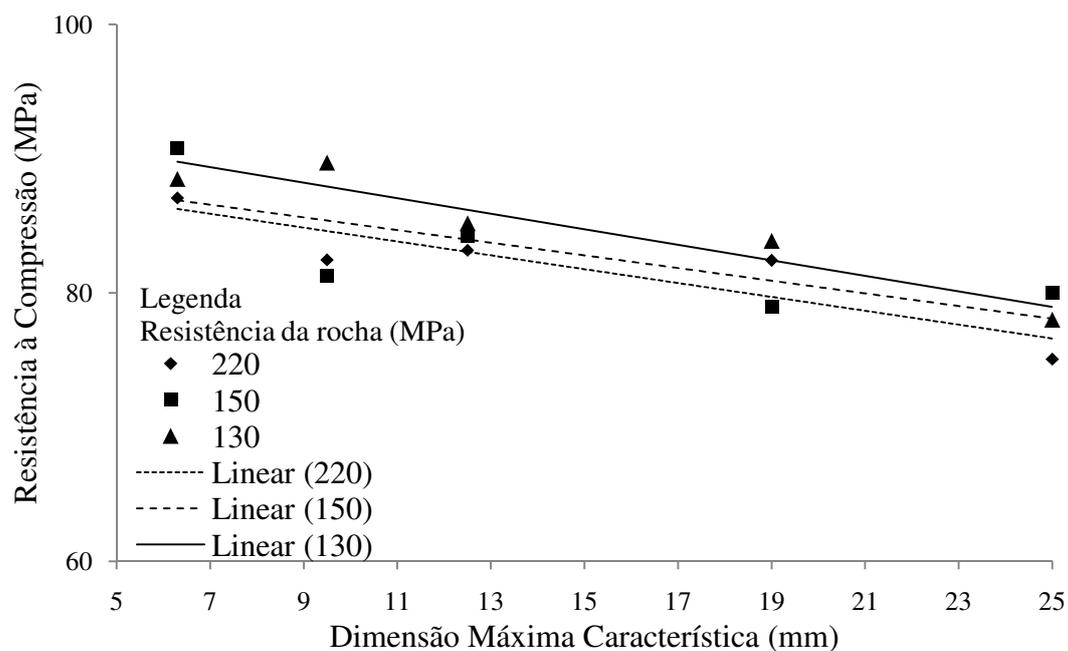


Figura 24 - Efeito da interação da dimensão máxima característica e da resistência à compressão da rocha

Por fim, a interação entre as variáveis consumo de água, resistência da rocha e dimensão máxima característica também demonstrou ser apresentada significativa, porém, a probabilidade muito próxima do limite de 5%, sendo de difícil interpretação seu fundamento físico.

4.1.5. Modelo matemático para estimativa da resistência à compressão do concreto

Uma vez feita a interpretação, análise, discussão dos resultados, identificados os fatores principais e suas interações que influenciaram de maneira significativa a resistência à compressão do concreto, partiu-se para a definição de um modelo de regressão que apresentasse um bom ajuste aos dados experimentais.

Inicialmente, optou-se por utilizar um modelo polinomial aditivo, bastante simples no que tange à sua montagem e utilização. A primeira tentativa resultou no modelo que consiste na Equação 11:

$$f_c = k_1 + k_2 \cdot a + k_3 \cdot f_{cr} + k_4 \cdot \phi_{max} + k_5 \cdot a \cdot f_{cr} + k_6 \cdot a \cdot \phi_{max} + k_7 \cdot f_{cr} \cdot \phi_{max} + k_8 \cdot a \cdot f_{cr} \cdot \phi_{max} \quad \text{Equação 11}$$

Onde: f_c – resistência média à compressão do concreto aos 28 dias

a – consumo de água por metro cúbico de concreto

f_{cr} – resistência à compressão da rocha utilizada como agregado

ϕ_{max} – dimensão máxima do agregado graúdo

Destaca-se que o modelo inclui todos os efeitos principais (a , f_{cr} e ϕ_{max}), as interações entre eles e também a interação entre os três fatores.

Os valores das constantes estimados através de regressão feita a partir dos dados obtidos no programa experimental foram:

$$k_1 = 236 \qquad k_2 = -0,94965 \qquad k_3 = \frac{1}{10}$$

$$k_4 = -0,63077 \qquad k_5 = -\frac{1}{1254} \qquad k_6 = \frac{1}{1026}$$

$$k_7 = -\frac{1}{135} \qquad k_8 = \frac{1}{21029}$$

A Equação 11 então pode ser reescrita como a Equação 12:

$$f_c = 236 - 0,95 \cdot a + \frac{f_{cr}}{10} - 0,63 \cdot \phi_{max} - \frac{a \cdot f_{cr}}{1254} + \frac{a \cdot \phi_{max}}{1026} - \frac{f_{cr} \cdot \phi_{max}}{135} + \frac{a \cdot f_{cr} \cdot \phi_{max}}{21029} \quad \text{Equação 12}$$

As Figuras 25 a 27 mostram os resultados do modelo polinomial e os respectivos dados experimentais. A Figura 25 apresenta as respostas do modelo para diferentes consumos de água e dimensões máximas características, sendo mantida fixa a resistência da rocha em 220 MPa.

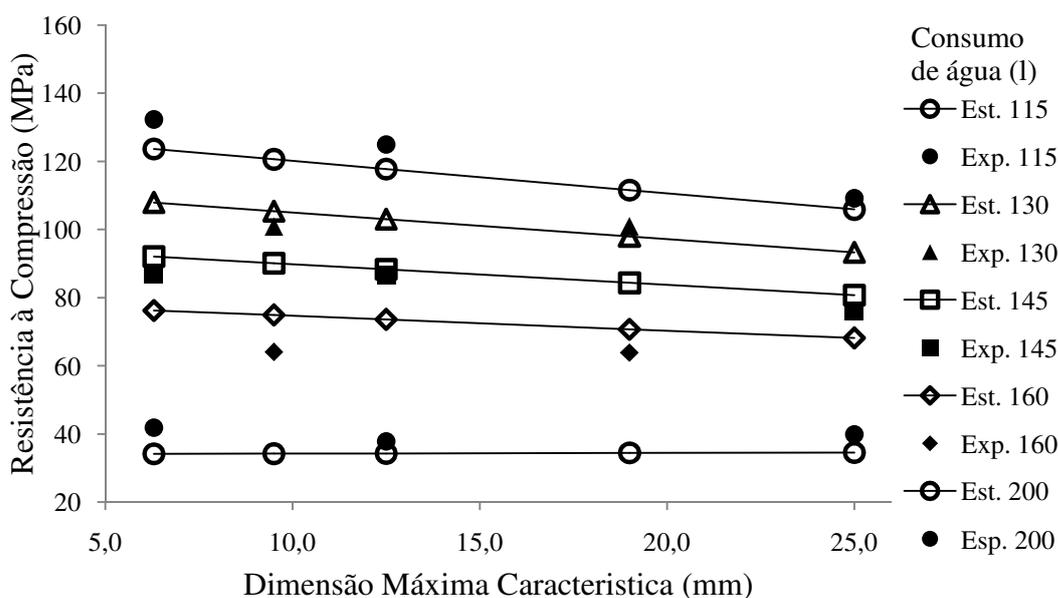


Figura 25 – Valores de resistência à compressão observados (Exp.) e valores estimados (Est.) pelo modelo polinomial, para os concretos produzidos com agregado de resistência à compressão de 220 MPa

Analisando a Figura 25 calculou-se a diferença média entre a média de três pontos experimentais, de uma mesma combinação, e o valor previsto pelo modelo para os concretos produzidos com a rocha de resistência à compressão de 220 MPa, que resultou em 5,56 MPa.

A Figura 26 mostra a resposta do modelo polinomial para diferentes consumos de água por metro cúbico de concreto e diferentes dimensões máximas características de agregado graúdo para a rocha de resistência à compressão de 150 MPa e os respectivos dados experimentais. Para a resistência de rocha 150 MPa, a diferença média entre a média de três pontos experimentais, de uma mesma combinação, e o valor previsto pelo modelo foi de 6,77 MPa.

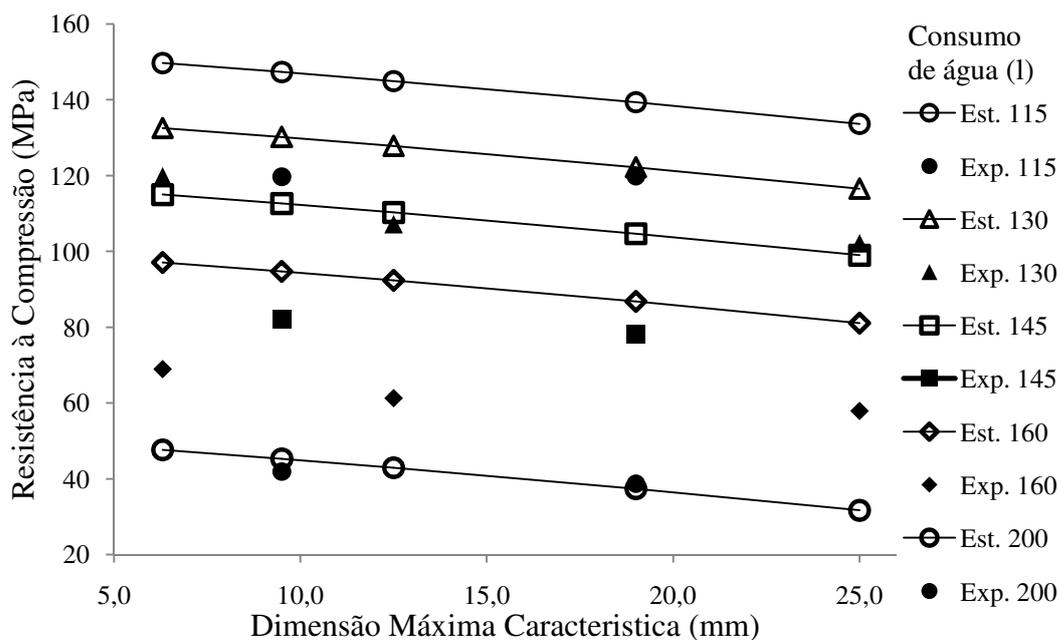


Figura 26 – Valores de resistência à compressão observados (Exp.) e valores estimados (Est.) pelo modelo polinomial, para os concretos feitos com agregado de resistência à compressão de 150 MPa

A Figura 27 apresenta a resposta do modelo polinomial para diferentes consumos de água por metro cúbico de concreto e diferentes dimensões máximas características de agregado graúdo para a rocha de resistência à compressão de 130 MPa.

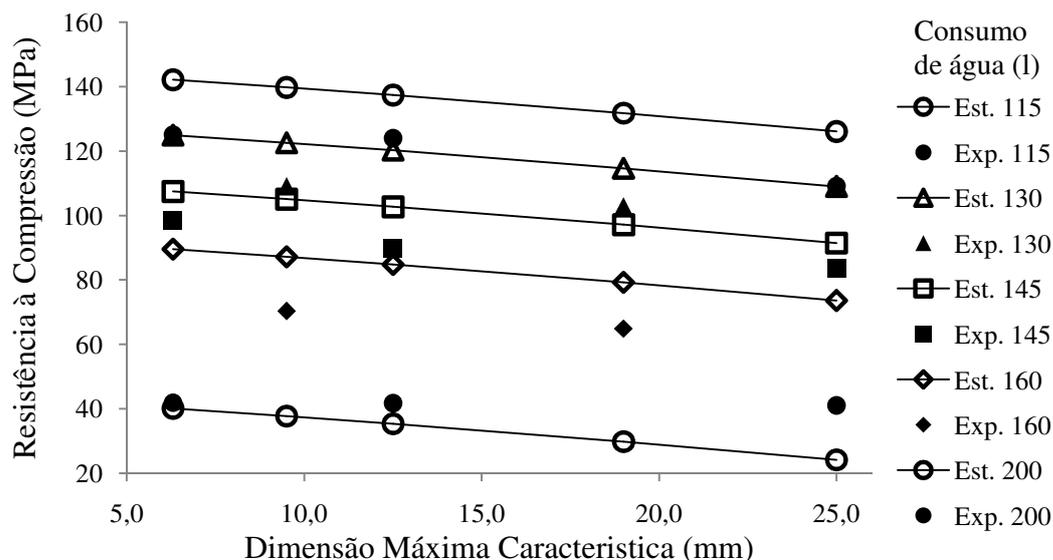


Figura 27 – Valores de resistência à compressão observados (Exp.) e valores estimados (Est.) pelo modelo polinomial, para os concretos feitos com agregado com resistência à compressão de 130 MPa

Através dos dados representados na Figura 27, calculou-se a diferença média entre a média de três pontos experimentais, de uma mesma combinação, e o valor previsto pelo modelo polinomial. A diferença média foi 3,63 MPa.

O coeficiente de determinação para o modelo resultou em um $r^2 = 0,9505$. É importante salientar que a Equação 12 é geral, ou seja, revelando a natureza dos efeitos dos fatores consumo de água, resistência da rocha e dimensão máxima característica, e suas respectivas interações.

Embora a regressão polinomial obtida seja matematicamente correta, fisicamente este modelo não é semelhante a nenhum dos modelos fundamentais apresentados no item 2.1 desta dissertação.

Para tornar o modelo de regressão aceitável sob o ponto de vista matemático e também contemplar os fenômenos físicos que estão sendo investigados, optou-se por trabalhar com funções já estabelecidas no meio científico e ajustá-las de acordo com os fatores em estudo. Como ponto inicial, para levar em consideração o efeito do consumo de água, utilizou-se a Equação 1 de Feret.

$$f_c = k \left(\frac{c}{c + a + v} \right)^2 \quad \text{Equação 1}$$

Como já foi destacado no item 3.4.3.1, as dosagens de traços de concreto utilizadas neste trabalho apresentam uma relação direta entre o consumo de água e de aglomerante, uma vez que o volume de pasta é constante e igual à 35% do volume total para todas as misturas. Assim a Equação 1 pode ser reescrita como a Equação 13, que relaciona a resistência à compressão do concreto ao consumo de água por metro cúbico de mistura

$$f_c = k \left(\frac{330 - a}{350} \right)^2 \quad \text{Equação 13}$$

Onde: f_c – resistência média à compressão do concreto aos 28 dias

a – consumo de água por metro cúbico de concreto

Na Equação 13, a resistência à compressão passa a ser função somente da massa de água. Para isso considerou-se a massa específica do cimento de 3,15 kg/dm³, a massa específica da sílica ativa como 2,20 kg/dm³, dados estes obtidos no programa experimental deste trabalho. Considerou-se também o teor de ar incorporado como sendo igual à 2% valor este previsto pelo método na composição volumétrica do traço.

O efeito da dimensão máxima característica foi considerado com o emprego da equação da máxima espessura de pasta, que é função da dimensão máxima característica.

$$MPT = \phi_{max} \left(\sqrt[3]{\frac{g^*}{g}} - 1 \right) \quad \text{Equação 4}$$

Onde: MPT – máxima espessura de pasta

ϕ_{max} – dimensão máxima do agregado graúdo

g – teor de agregado por metro cúbico de concreto

g^* – compacidade do agregado

A compacidade (g^*) consiste em uma forma de quantificar a densidade de empacotamento das partículas, de diferentes formas e distribuições granulométricas.

Considerando que o volume de agregado (g) e a compacidade das partículas é constante, uma vez que a distribuição granulométrica é a mesma para todos os agregados, e a forma das partículas é semelhante, a máxima espessura de pasta torna-se função somente da dimensão máxima característica. Assim a Equação 12 pode ser reescrita como a Equação 14.

$$MPT = f(\phi_{max}) \quad \text{Equação 14}$$

Onde: MPT – máxima espessura de pasta

ϕ_{max} – dimensão máxima do agregado graúdo

A máxima espessura de pasta é relacionada à resistência à compressão do concreto segundo De Larrard (1999) através de um expoente fracionário igual a 0,125.

Quanto à influência da resistência da rocha, dado pelo comportamento médio da influência observado no gráfico da Figura 20, notadamente pequeno porém significativo como comprovou a análise de variância (Tabela 16), e a grande amplitude do módulo da variável de controle, julgou-se conveniente utilizar o logaritmo da variável resistência à compressão da rocha ao invés da variável diretamente.

O modelo então pode ser escrito como uma adição dos efeitos das variáveis principais com a forma da Equação 15.

$$f_c = k_1 \cdot \left(\frac{330 - a}{350} \right)^2 + \frac{k_2}{\phi_{max}^{0,125}} + k_3 \cdot \text{Log}(f_{cr}) \quad \text{Equação 15}$$

Onde: f_c – resistência média à compressão do concreto aos 28 dias

a – consumo de água por metro cúbico de concreto

f_{cr} – resistência à compressão da rocha utilizada como agregado

ϕ_{max} – dimensão máxima do agregado graúdo

Este modelo inclui somente os efeitos principais (a , f_{cr} e ϕ_{max}). Isto é justificado pelo fato de que na análise de variância os fatores principais apresentam as maiores médias

quadradas. Os valores das constantes estimadas a partir dos dados obtidos no programa experimental foram:

$$k_1 = 341 \qquad k_2 = 60 \qquad k_3 = -24$$

A Equação 15 então pode ser reescrita na forma da Equação 16.

$$f_c = 341 \cdot \left(\frac{330 - a}{350} \right)^2 + \frac{60}{\phi_{max}^{0,125}} - 24 \cdot \text{Log}(f_{cr}) \qquad \text{Equação 16}$$

As Figuras 28 a 30 mostram os resultados do modelo de Feret modificado e os respectivos dados experimentais. A Figura 28 apresenta as respostas do modelo de Feret modificado, para diferentes consumos de água e dimensões máximas características, sendo mantida fixa a resistência da rocha em 220 MPa.

Analisando a Figura 28 calculou-se a diferença média entre a média de três pontos experimentais, de uma mesma combinação, e o valor previsto pelo modelo de Feret modificado para os concretos produzidos com a rocha de resistência à compressão de 220 MPa, foi que resultou em 4,49 MPa.

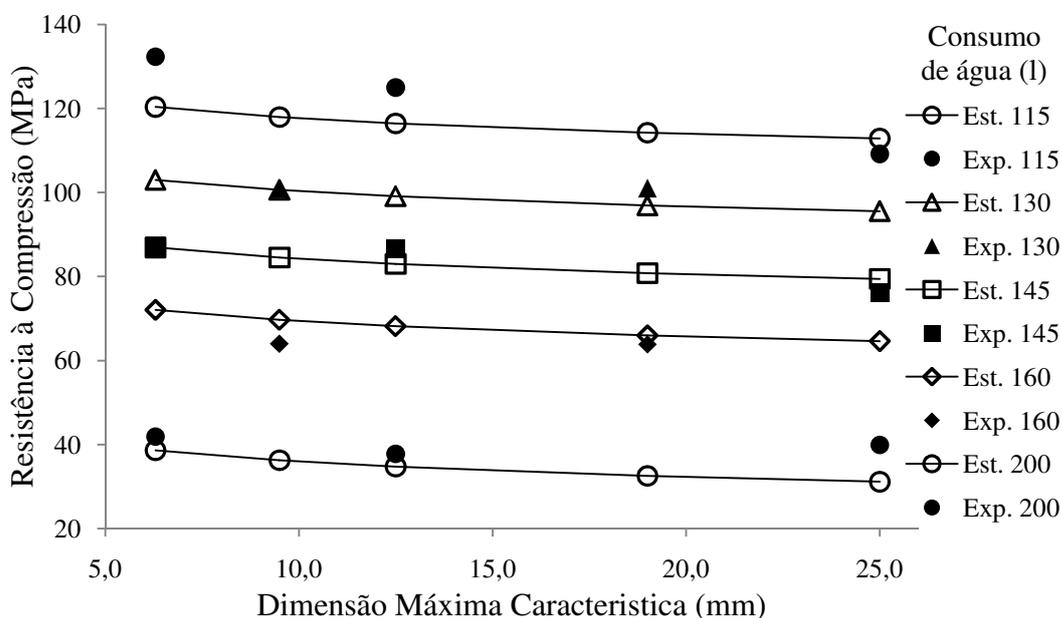


Figura 28 – Valores de resistência à compressão observados (Exp.) e valores estimados (Est.) pelo modelo de Feret modificado, para o concreto feito com agregado com resistência à compressão de 220 MPa

A Figura 29 apresenta a resposta do modelo de Feret para diferentes consumos de água por metro cúbico de concreto e diferentes dimensões máximas características de agregado graúdo para a rocha de resistência à compressão de 150 MPa.

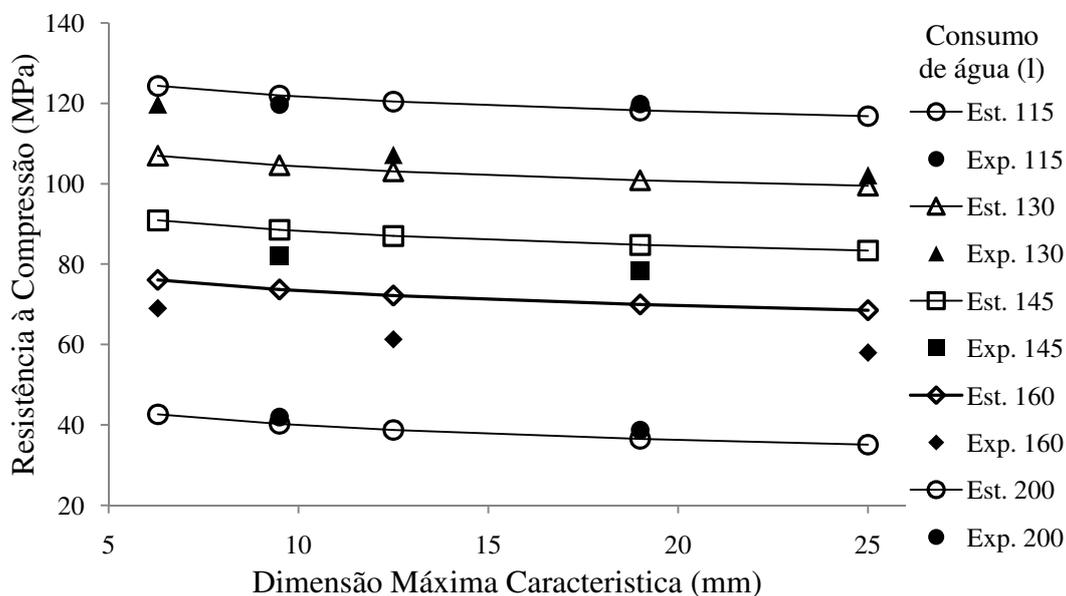


Figura 29 – Valores de resistência à compressão observados (Exp.) e valores estimados (Est.) pelo modelo de Feret modificado, para o concreto feito com agregado com resistência à compressão de 150 MPa

Através dos dados representados na Figura 29, calculou-se a diferença média entre a média de três pontos experimentais, de uma mesma combinação, e o valor previsto pelo modelo Feret modificado. A diferença média foi 5,14 MPa.

A Figura 30 mostra a resposta do modelo de Feret para diferentes consumos de água por metro cúbico de concreto e diferentes dimensões máximas características de agregado graúdo para a rocha de resistência à compressão de 130 MPa e os respectivos dados experimentais. Para a resistência de rocha 130 MPa a diferença média entre a média de três pontos experimentais, de uma mesma combinação, e o valor previsto pelo modelo foi de 3,34 MPa.

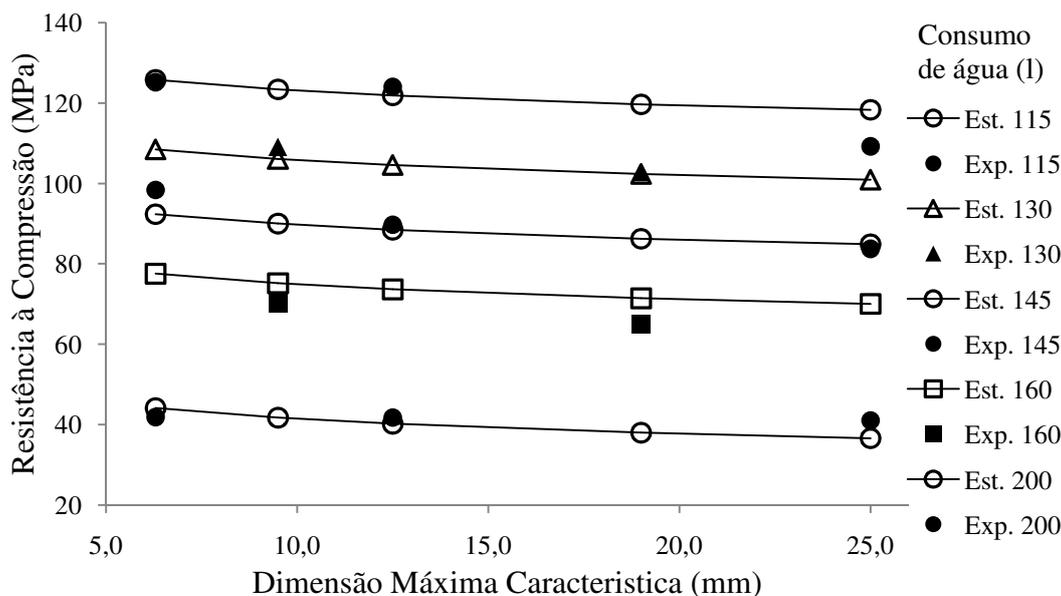


Figura 30 – Valores de resistência à compressão observados (Exp.) e valores estimados (Est.) pelo modelo de Feret, para o concreto feito com agregado com resistência à compressão de 130 MPa

O coeficiente de determinação para o modelo Feret resultou em um coeficiente de determinação de $r^2 = 0,9495$. Vale destacar que mesmo contendo um número muito menor de termos, quando comparado com o modelo polinomial, o presente modelo apresenta boa aderência aos dados experimentais. Isto se deve basicamente ao fato de o modelo representar não só um ajuste matemático aos dados experimentais, mas também contemplar o comportamento fenomenológico envolvido.

Para efeito de comparação modificou-se o modelo da Equação 15, considerando o consumo de água através da lei de Abrams (Equação 2).

$$f_c = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} \quad \text{Equação 2}$$

Como no presente estudo utilizou-se, além do cimento, sílica ativa como aglomerante, a relação a/c foi substituída por a/a , relação água/aglomerante. A variável a/a está relacionada ao consumo de água por metro cúbico de concreto, pois o volume de pasta das misturas é constante e igual à 35%. A Equação 17 relaciona, para os dados experimentais deste estudo, o consumo de água à relação água/aglomerante.

$$a/a = \frac{a}{(350 - ar - a) \cdot (90\% \cdot \rho_{cimento} + 10\% \cdot \rho_{sílica})} \quad \text{Equação 17}$$

Onde: a/a – relação água/aglomerante

a – consumo de água por metro cúbico de concreto

ar – volume de ar incorporado, considerou-se 2%, (MEHTA; AİTCIN, 1990)

$\rho_{cimento}$ – massa específica do cimento

$\rho_{sílica}$ – massa específica da sílica ativa

Alterando o primeiro termo da Equação 15 através da incorporação da Equação 2, tem-se o modelo com a forma da Equação 18.

$$f_c = \frac{k_1}{k_2^{a/a}} + \frac{k_3}{\phi_{max}^{0,125}} + k_4 * \text{Log}(f_{cr}) \quad \text{Equação 18}$$

Onde: f_c – resistência média à compressão do concreto aos 28 dias

a/a – relação água/aglomerante

ϕ_{max} – dimensão máxima do agregado graúdo

f_{cr} – resistência à compressão da rocha utilizada como agregado

Os valores das constantes estimadas a partir dos dados obtidos no programa experimental foram:

$$k_1 = 308 \quad k_2 = 1000 \quad k_3 = 78,4 \quad k_4 = -11,8$$

Reescrevendo a Equação 18 com as constantes ajustadas, tem-se a Equação 19.

$$f_c = \frac{308}{1000^{a/a}} + \frac{78,4}{\phi_{max}^{0,125}} - 11,8 * \text{Log}(f_{cr}) \quad \text{Equação 19}$$

A Figura 31, Figura 32 e Figura 33 apresentam os resultados do modelo de Abrams modificado e os respectivos dados experimentais. A Figura 31 apresenta as respostas deste modelo para diferentes consumos de água e, por conseguinte distintas relações

água/aglomerante, e diversas dimensões máximas características, sendo mantida fixa a resistência da rocha em 220 MPa.

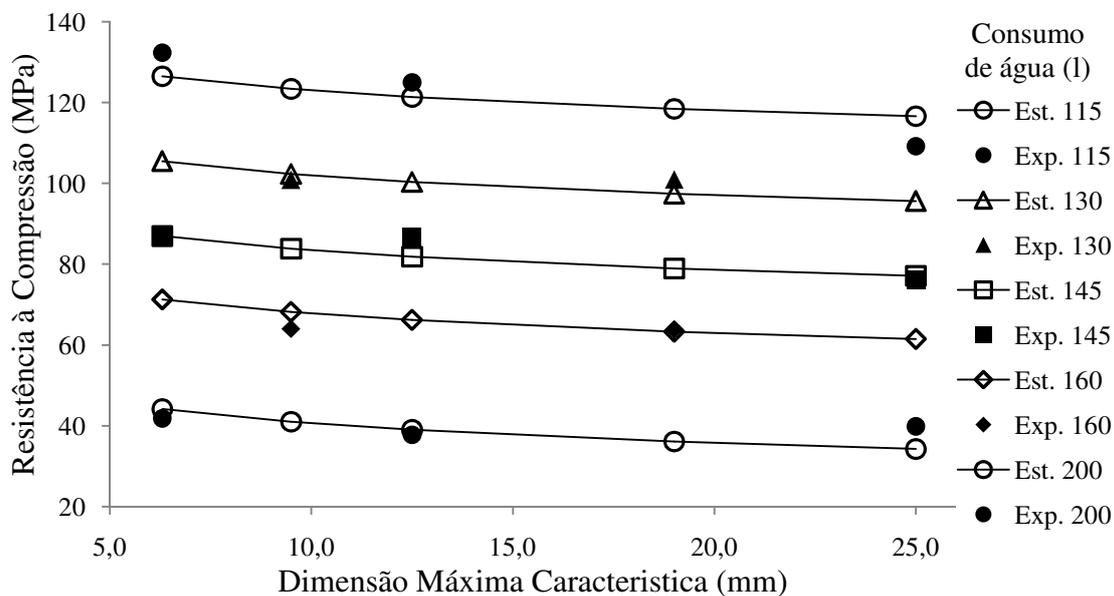


Figura 31 – Valores de resistência à compressão observados e valores estimados pelo modelo Abrams, para o concreto feito com agregado com resistência à compressão de 220 MPa

Através dos dados representados na Figura 31, calculou-se a diferença média entre a média de três pontos experimentais, de uma mesma combinação, e o valor previsto pelo modelo de Abrams. A diferença média foi 3,20 MPa.

A Figura 32 apresenta a resposta do modelo de Abrams para diferentes consumos de água por metro cúbico de concreto e diferentes dimensões máximas características de agregado graúdo para a rocha de resistência à compressão de 150 MPa.

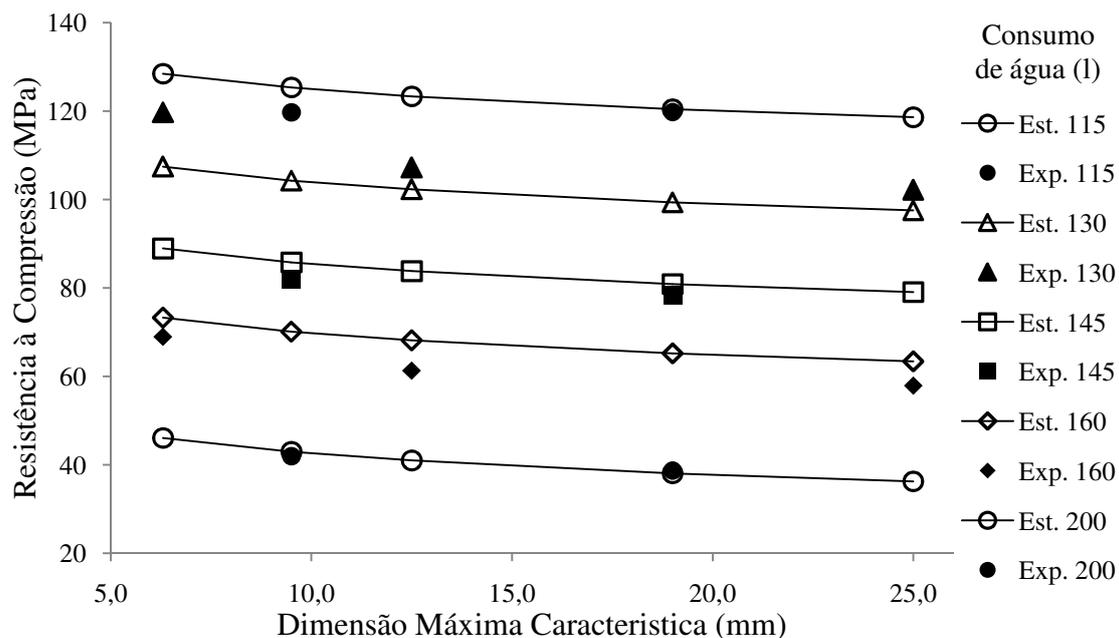


Figura 32 – Valores de resistência à compressão observados versus valores estimados pelo modelo de Abrams, para o concreto feito com agregado com resistência à compressão de 150 MPa

Através dos dados representados na Figura 32, calculou-se a diferença média entre a média de três pontos experimentais, de uma mesma combinação, e o valor previsto pelo modelo de Abrams, a diferença média foi 3,80 MPa.

A Figura 33 mostra a resposta do modelo de Abrams para diferentes consumos de água por metro cúbico de concreto e diferentes dimensões máximas características de agregado graúdo para a rocha de resistência à compressão de 130 MPa e os respectivos dados experimentais. Para a resistência de rocha 130 MPa a diferença média entre a média de três pontos experimentais, de uma mesma combinação, e o valor previsto pelo modelo também foi de 3,80 MPa.

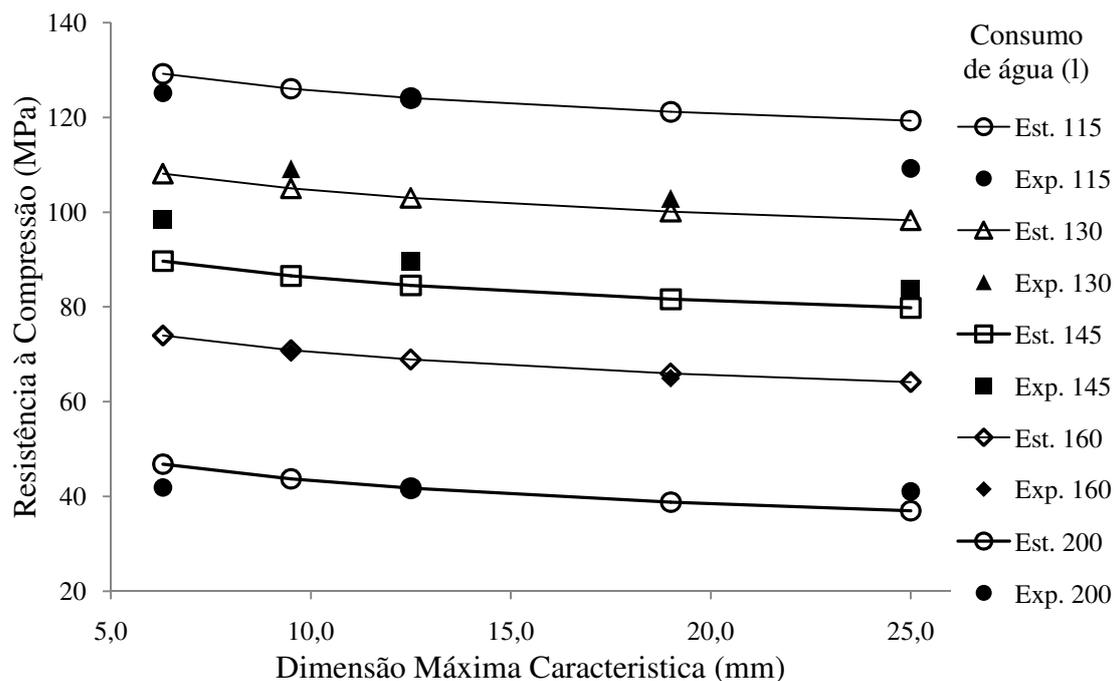


Figura 33 – Valores de resistência à compressão observados versus valores estimados pelo modelo de Abrams, para o concreto feito com agregado com resistência à compressão de 130 MPa

O coeficiente de determinação para o modelo de Abrams modificado resultou em um $r^2=0,9707$. Conclui-se assim que os três modelos gerados possuem boa aproximação aos dados experimentais, sendo que o modelo de Feret modificado e o modelo Abrams modificado apresentam uma fundamentação teórica mais consistente. Destes dois, o que apresentou o melhor aderência aos dados experimentais foi o modelo Abrams modificado. Os três modelos de previsão de resistência à compressão foram desenvolvidos considerando as condições experimentais deste trabalho, assim são válidas para idade de 28 dias, consumos de água compreendidos entre 115 e 200 litros de água por metro cúbico de concreto e rochas com resistência à compressão superiores à resistência do concreto produzido. Estes resultados se limitam aos materiais utilizados na fabricação dos concretos utilizados no estudo.

4.2. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

A Tabela 18 resume os resultados obtidos para resistência à tração por compressão diametral (Anexo 3), onde cada valor apresentado representa a média de três observações experimentais. A análise da Tabela 18 confirma a influência do consumo de água sobre a resistência à tração por compressão diametral. Observa-se uma tendência de aumento da resistência à tração com a diminuição do consumo de água. Já quanto as variáveis resistência da rocha e dimensão máxima característica, não se identificam tendências definidas através de simples visualização dos valores médios.

Analisando os dados experimentais pode-se destacar que o desvio padrão da resistência à tração por compressão diametral das repetições de uma mesma combinação foram na média igual a 0,603 MPa. De maneira semelhante ao que ocorre com o desvio padrão médio da resistência à compressão, o desvio padrão médio da resistência à tração também é maior para os menores consumos de água. Para o consumo de água de 115 litros o desvio foi 1,04 MPa, e para o consumo de 200 litros o desvio foi de 0,38 MPa. Os valores dos desvios padrão encontrados para exemplares de uma mesma combinação são semelhantes aos encontrados por Souza (2003), para concretos de alta resistência estudados pelo referido autor. Para os concretos de resistência convencional, que correspondem neste estudo aos concretos dosados com consumo de 200 litros de água por metro cúbico, os valores de desvios padrão encontrados para exemplares de uma mesma combinação são compatíveis com valores encontrados por Manuel (2005).

Tabela 18 - Resistência à tração por compressão diametral, aos 28 dias (MPa)²⁴

Consumo Água (l)	\varnothing_{\max} (mm)	Resistência da Rocha (MPa)								
		220			150			130		
		Média	DP ²⁵	CV% ²⁶	Média	DP	CV%	Média	DP	CV%
115	6,3	7,68	0,48	6,25				7,35	1,64	23,86
	9,5				7,98	1,04	13,02			
	12,5	6,85	1,15	16,74				6,33	1,12	18,19
	19				7,89	0,30	3,80			
	25	7,63	1,87	24,51				7,55	0,70	9,36
130	6,3				6,91	0,41	5,91			
	9,5	7,18	0,53	7,33				6,28	1,07	17,21
	12,5				6,47	0,37	5,72			
	19	6,16	0,89	14,36				7,24	0,77	11,01
	25				5,64	0,19	3,38			
145	6,3	5,90	1,26	21,33				6,14	0,38	6,34
	9,5				5,71	0,92	16,08			
	12,5	6,14	0,26	4,17				5,82	0,97	17,66
	19				4,63	0,21	4,51			
	25	6,26	0,02	0,27				5,81	0,31	6,06
160	6,3				5,27	0,39	7,45			
	9,5	5,00	0,98	19,63				4,98	0,52	13,05
	12,5				4,70	0,52	11,04			
	19	4,45	0,19	4,25				4,49	0,36	8,15
	25				4,81	0,12	2,48			
200	6,3	3,50	0,52	14,83				3,58	0,60	16,26
	9,5				3,79	0,34	8,95			
	12,5	3,11	0,29	9,45				3,20	0,43	13,41
	19				3,45	0,24	7,05			
	25	3,21	0,52	16,25				3,30	0,08	2,74

²⁴ Cada valor representa a média de três observações experimentais²⁵ DP – Desvio Padrão²⁶ CV% - Coeficiente de Variação (%)

Para comprovar estatisticamente a influência do consumo de água e verificar se os demais fatores estudados no experimento e suas interações são significativas, foi realizada uma análise de variância, apresentada na Tabela 19.

Tabela 19 – Análise de variância (ANOVA) para resistência à tração por compressão diametral

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Probab.	S/N
A: Água	222,96	4	55,74	52,55	0,00%	S
B: Fcg	2,97	2	1,49	1,40	25,82%	NS
C: DMC	3,71	4	0,93	0,87	48,86%	NS
AB	7,85	8	0,98	0,92	50,72%	NS
AC	13,02	16	0,81	0,77	71,01%	NS
BC	5,22	8	0,65	0,61	75,99%	NS
ABC	10,16	32	0,32	0,30	99,96%	NS
Erro	41,36	39	1,06			
Total	307,24	113				

A: consumo de água; B: resistência à compressão da rocha; C: dimensão máxima característica. GDL: graus de liberdade; SQ: soma quadrada; MQ=SQ/GDL: média quadrada; F: valor calculado de F: valor calculado da distribuição de Fischer; S/N: efeito significativo (S) e não significativo (NS).

Como se pode observar na Tabela 19, somente o consumo de água foi estatisticamente significativo para a resistência à tração.

4.2.1. Efeito do fator consumo de água na resistência à tração por compressão diametral do concreto

A importância do fator consumo de água ou da relação água/aglomerante nas propriedades do concreto foram abordadas no capítulo 2.1. A Figura 34 apresenta a resistência média à tração por compressão diametral para cada consumo de água. Como era esperado a resistência à tração aumenta com a diminuição do consumo de água.

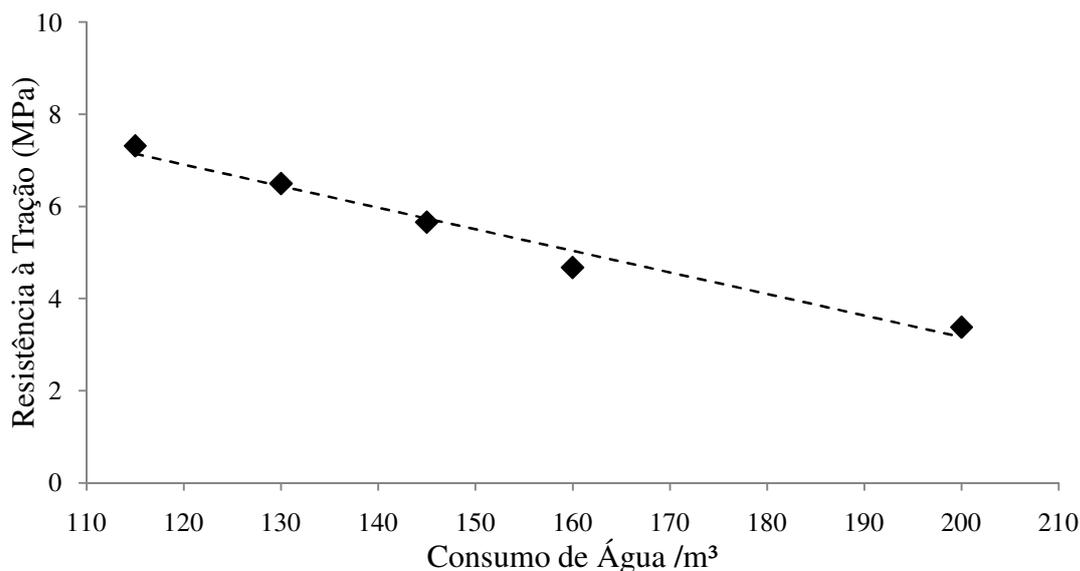


Figura 34 - Efeito do consumo de água na resistência à tração por compressão diametral média do concreto

Contudo, como também foi observado por Pompeu (2004), quando aumenta a resistência à compressão, aumenta também a resistência à tração, mas a uma razão decrescente. A relação água/aglomerante determina a porosidade da pasta em qualquer estágio de hidratação. A rigor a resistência do concreto é influenciada pelo volume de todos os vazios: ar aprisionado, poros capilares, poros do gel. Como o fator consumo de água está ligado à estrutura porosa da pasta, este fator mostrou-se significativo.

A partir da Figura 34 e da Figura 18 é possível calcular a relação média existente entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão. Para o consumo de água 115 litros a resistência à tração representa 6,06% da resistência à compressão. Para o consumo de 130 litros de água 6,18%, para o consumo de 145, 6,63%, para o consumo de 160, 7,24% e para o consumo de 200 litros a resistência por compressão diametral representa 8,13 % da resistência à compressão do concreto.

4.2.2. Efeito do fator resistência à compressão da rocha na resistência à tração por compressão diametral do concreto

A Figura 35 apresenta a resistência à tração por compressão diametral média para cada resistência de rocha. A análise de figura parece indicar uma tendência de aumento da resistência à tração do concreto com o aumento da resistência da rocha. No entanto, como foi verificado na Tabela 19, a resistência da rocha não se mostrou significativa.

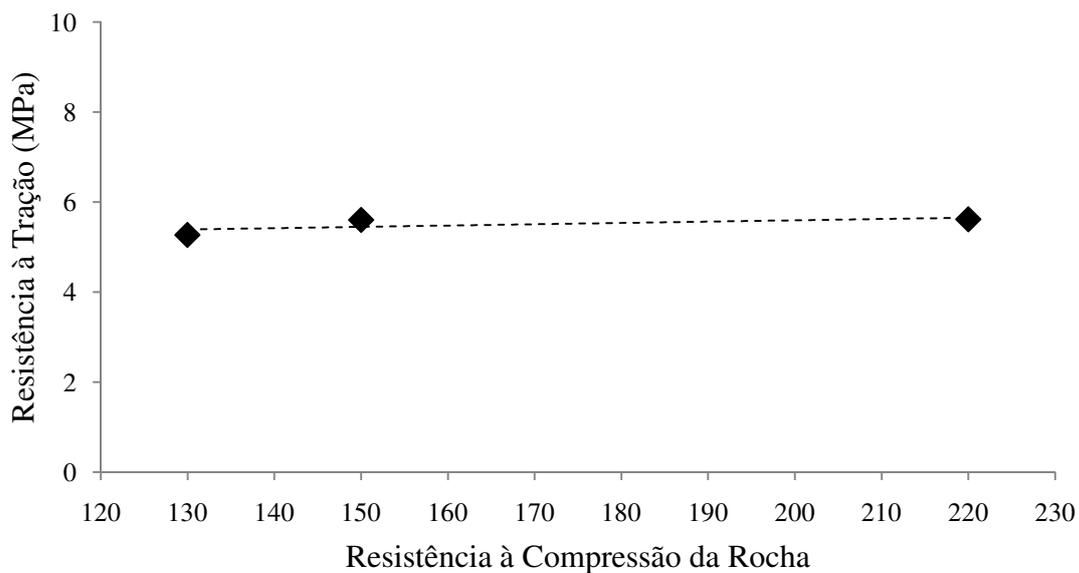


Figura 35 - Efeito da resistência à compressão da rocha na resistência à tração por compressão diametral média do concreto

4.2.3. Efeito do fator dimensão máxima característica do agregado na resistência à tração por compressão diametral do concreto

A Figura 36 apresenta a resistência à tração por compressão diametral média para cada dimensão máxima característica. A análise de figura parece indicar uma tendência de aumento da resistência à tração do concreto com a diminuição da dimensão máxima característica do agregado. Contudo, foi verificado na Tabela 19, que a dimensão máxima característica não se mostrou significativa.

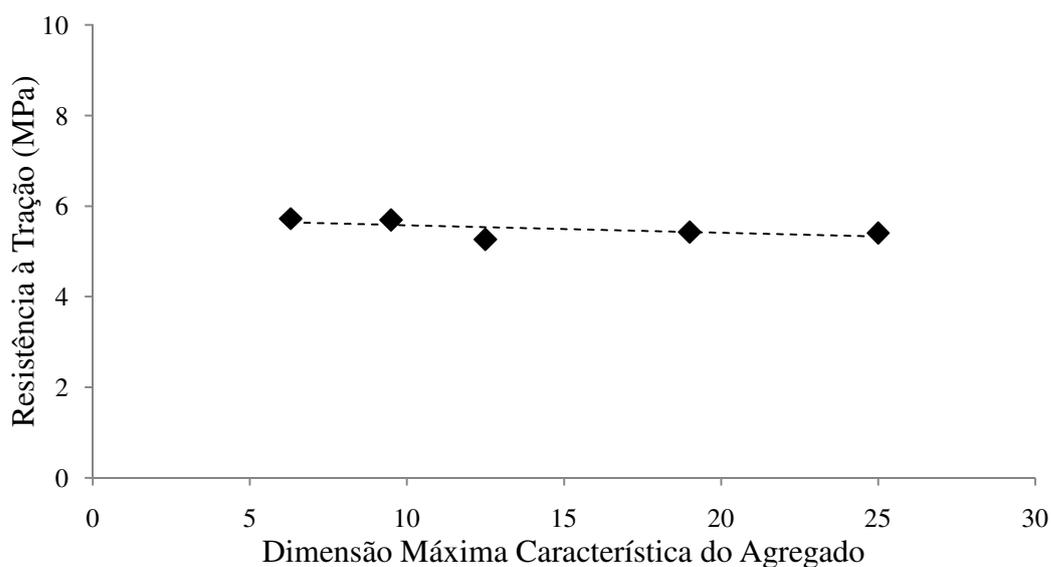


Figura 36 - Efeito da dimensão máxima característica do agregado na resistência à tração por compressão diametral média do concreto

4.2.4. Modelo matemático para estimativa da resistência à tração por compressão diametral do concreto

Tendo em vista que somente o fator consumo de água mostrou-se significativo na análise de variância, o modelo para estimativa da resistência de tração por compressão diametral apresentará como variável, somente este fator.

Considerando também o comportamento médio linear observado na Figura 34, optou-se por utilizar uma função linear, Equação 20.

$$f_t = k_1 + k_2 \cdot a \quad \text{Equação 20}$$

Onde: f_t – resistência média à tração do concreto aos 28 dias

a – consumo de água por metro cúbico de concreto

Os valores das constantes estimadas a partir dos dados obtidos no programa experimental foram:

$$k_1 = 12,5 \quad k_2 = -\frac{10}{215}$$

A Equação 20 então pode ser escrita como a Equação 21.

$$f_t = 12,5 - \frac{10}{215} a \quad \text{Equação 21}$$

A Figura 37 mostra os resultados deste modelo e os respectivos dados experimentais. O coeficiente de determinação foi $r^2 = 0,7549$.

O coeficiente de determinação encontrado é baixo quando comparado com outros trabalhos como de Souza (2003). Contudo, o presente modelo procurou apresentar uma forma simples e que representasse o fenômeno estudado, buscando para isso a identificação da tendência apresentada na Figura 34. Já modelos como o de Souza (2003) conseguem alcançar valores de coeficiente de determinação superiores a 0,9 entretanto estes modelos utilizam um número de termos e com expoentes elevados, dando à equação muitos pontos de inflexão, permitindo a esta que se aproxime mais dos dados experimentais. Isto, contudo, não melhora o intervalo de confiança do modelo nem o torna mais eficiente em novas previsões, que é sua finalidade.

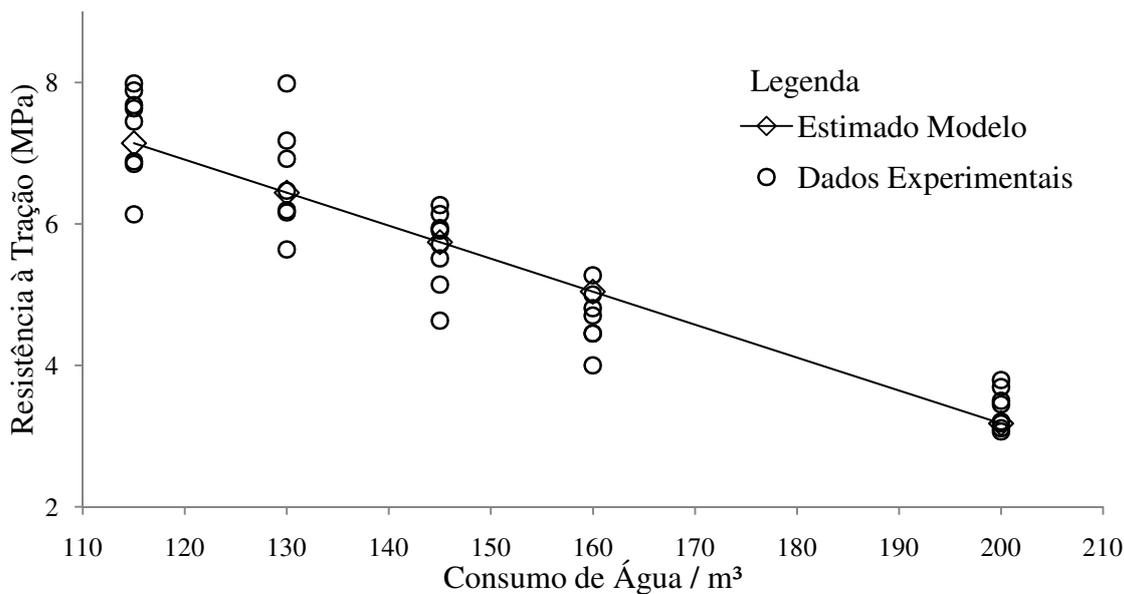


Figura 37 - Efeito do consumo de água na resistência à tração por compressão diametral média do concreto, aos 28 dias

4.2.5. Modelo matemático para correlação entre a resistência à compressão média e a resistência à tração por compressão diametral média do concreto

Alternativamente à determinação da resistência à tração por compressão diametral através do consumo de água, esta propriedade também pode ser correlacionada à resistência à compressão do concreto. Com este objetivo, para cada combinação relacionou-se a resistência à compressão média do concreto a sua resistência à tração por compressão diametral. O modelo matemático que relaciona a resistência à tração por compressão diametral do concreto à resistência à compressão foi então escrito como a Equação 22.

$$f_t = k_1 + k_2 \cdot f_c \quad \text{Equação 22}$$

Onde: f_t – resistência média à tração do concreto aos 28 dias

f_c – resistência média à compressão do concreto aos 28 dias

Os valores das constantes estimadas a partir dos dados obtidos no programa experimental foram:

$$k_1 = 1,6$$

$$k_2 = \frac{1}{21}$$

A Equação 22 então pode ser reescrita como a Equação 23.

$$f_t = 1,6 - \frac{f_c}{21} \quad \text{Equação 23}$$

A Figura 38 mostra os resultados deste modelo e os respectivos dados experimentais a partir dos quais o modelo foi gerado. O coeficiente de determinação foi $r^2 = 0,7430$.

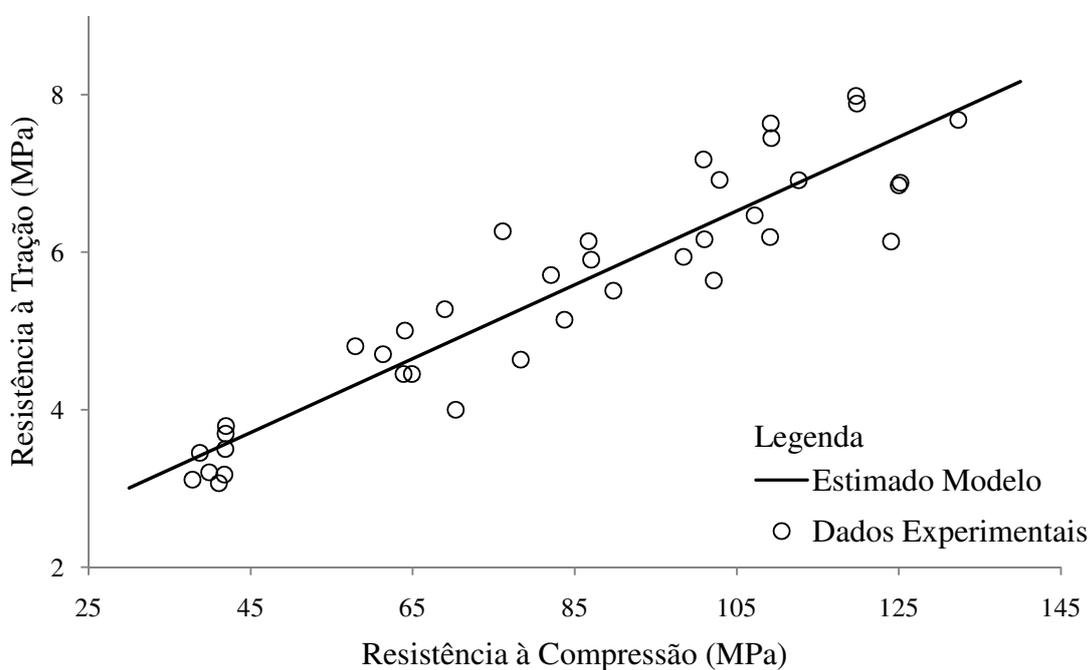


Figura 38 – Correlação entre a resistência à compressão e a resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias

4.3. MÓDULO DE ELASTICIDADE

A Tabela 20 resume os resultados obtidos para módulo de elasticidade (Apêndice 4), onde cada valor apresentado representa a média de três observações experimentais.

Percebe-se claramente, pela observação dos valores da Tabela 20, que os fatores consumo de água e resistência da rocha têm uma influência direta sobre o módulo de elasticidade do concreto de alto desempenho. A influência do fator consumo de água já era esperado e a influência do fator resistência da rocha se deve ao fato de o módulo de elasticidade da rocha ser também proporcional à resistência da rocha. Assim, rochas mais resistentes apresentam módulos de elasticidade mais elevados, que por fim, acabam contribuindo com o aumento do módulo de elasticidade do concreto.

Analisando os dados experimentais pode-se destacar que o desvio padrão do módulo de elasticidade das repetições de uma mesma combinação foi em média igual à 0,85 GPa. Diferentemente do que ocorre com o desvio padrão da resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral, o desvio padrão para cada consumo de água é bastante semelhante à média. Não há uma tendência de aumento do desvio padrão como o aumento do módulo de elasticidade. Os valores de desvio padrão encontrados para exemplares de uma combinação são semelhantes aos encontrados por Souza (2003), para concretos de alta resistência.

Tabela 20 – Módulo de elasticidade, aos 28 dias (GPa)²⁷

Consumo Água (l)	\varnothing_{\max} (mm)	Resistência da Rocha (MPa)								
		220			150			130		
		Média	DP ²⁸	CV% ₂₉	Média	DP	CV%	Média	DP	CV%
115	6,3	52,74	0,09	0,17				41,90	0,91	2,15
	9,5				46,75	0,74	1,58			
	12,5	52,61	1,57	2,99				39,84	1,20	2,98
	19				47,18	0,85	1,78			
	25	53,59	0,23	0,43				41,46	0,25	0,61
130	6,3				41,99	1,27	2,99			
	9,5	49,19	1,35	2,73				38,12	0,32	0,83
	12,5				44,32	0,80	1,78			
	19	50,73	0,92	1,79				38,44	0,17	0,44
	25				43,67	0,21	0,48			
145	6,3	46,31	0,58	1,25				36,89	0,57	1,54
	9,5				40,25	1,01	2,50			
	12,5	42,67	0,58	1,35				36,52	0,26	0,71
	19				39,38	1,11	2,78			
	25	46,66	0,69	1,48				36,60	0,71	1,92
160	6,3				35,94	0,88	2,42			
	9,5	41,43	2,87	6,76				33,30	0,22	0,65
	12,5				38,32	2,33	6,07			
	19	42,07	0,64	1,52				33,10	1,12	3,34
	25				36,37	0,93	2,53			
200	6,3	35,73	1,56	4,29				25,43	1,06	4,09
	9,5				29,64	1,08	3,60			
	12,5	36,90	1,35	3,61				28,14	0,27	0,94
	19				31,90	0,77	2,39			
	25	34,36	0,21	0,61				28,36	0,52	1,83

²⁷ Cada valor representa a média de três observações experimentais²⁸ DP – Desvio Padrão²⁹ CV% - Coeficiente de Variação (%)

Para comprovar estatisticamente a influência do consumo de água e da resistência da rocha e verificar se a dimensão máxima característica e as interações entre os fatores estudados no experimento são significativas, foi realizada uma análise de variância, apresentada na Tabela 21.

Tabela 21 – Análise de variância (ANOVA) para módulo de elasticidade

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Probab.	S/N
A: Água	3412,23	4	853,06	516,88	0,00%	S
B: Fcg	1899,04	2	949,52	575,33	0,00%	S
C: DMC	7,01	4	1,75	1,06	38,87%	NS
AB	50,47	8	6,31	3,82	0,21%	S
AC	67,77	16	4,24	2,57	0,83%	S
BC	43,98	8	5,50	3,33	0,54%	S
ABC	90,92	32	2,84	1,72	5,32%	NS
Erro	64,37	39	1,65			
Total	5635,78	113				

A: consumo de água; B: resistência à compressão da rocha; C: dimensão máxima característica. GDL: graus de liberdade; SQ: soma quadrada; $MQ = SQ/GDL$: média quadrada; F: valor calculado de F: valor calculado da distribuição de Fischer; S/N: efeito significativo (S) e não significativo (NS).

Pela ordem de importância, foram estatisticamente significativos os fatores isolados resistência do agregado e consumo de água, sendo a dimensão máxima característica do agregado considerada não significativa para o módulo de elasticidade.

4.3.1. Efeito do fator consumo de água no módulo de elasticidade do concreto

A Figura 39 apresenta o módulo de elasticidade médio para cada consumo de água.

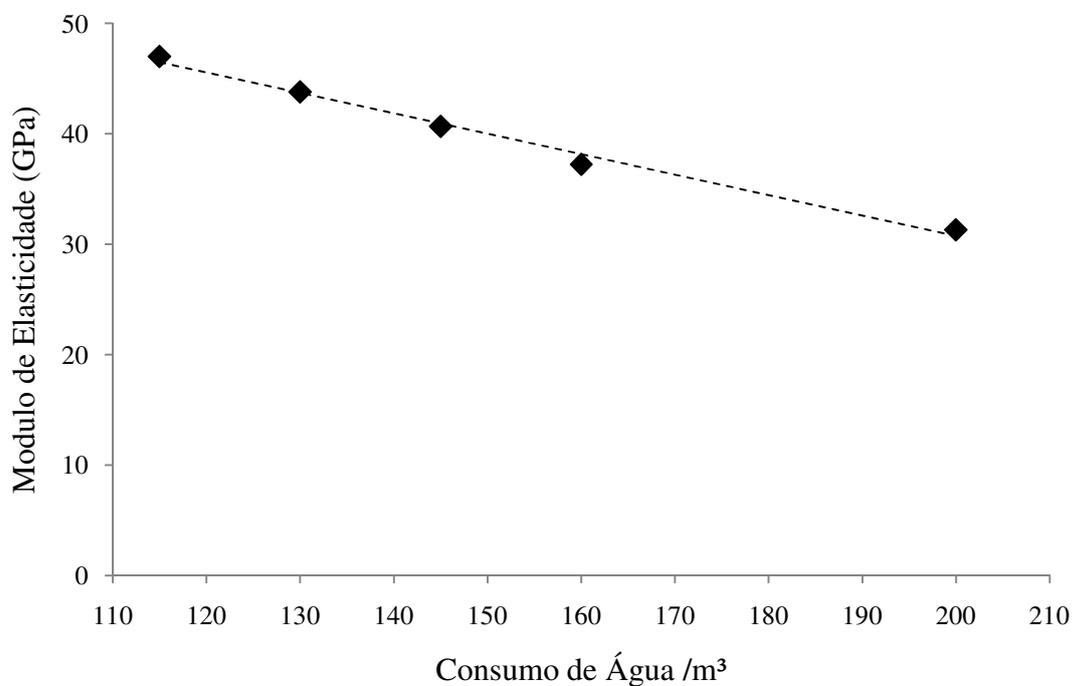


Figura 39 - Efeito do consumo de água no módulo de elasticidade médio do concreto aos 28 dias

Como era esperado, o módulo aumenta com a diminuição do consumo de água. Com a redução do consumo de água, entende-se neste caso, a diminuição da relação água/aglomerante, tendo assim, um menor afastamento dos grãos de aglomerante, menos água livre, menor porosidade da matriz e zona de transição também menor fazendo com que haja um menor espaço para crescimento de cristais de hidróxido de cálcio.

Trabalhos como os de Dal Molin (1995) e Souza (2003), que utilizaram como adição sílica ativa e metacaulim, respectivamente, também identificaram como significativa a influência da relação água/aglomerante no módulo de elasticidade do concreto.

4.3.2. Efeito do fator resistência à compressão da rocha no módulo de elasticidade do concreto

Diferentemente do que foi verificado para a resistência à compressão do concreto, o fator resistência à compressão da rocha para o módulo de elasticidade é um fator significativo. Isso pode ser comprovado pela média quadrada (MQ), maior do que para os outros fatores e pela alteração na média geral do módulo de elasticidade médio para cada resistência de rocha que pode ser observada na Figura 40.

Analisando a Tabela 20, de maneira geral, se observa que para todos os níveis de consumo de água há uma tendência de aumento do módulo de elasticidade com o aumento da resistência à compressão da rocha.

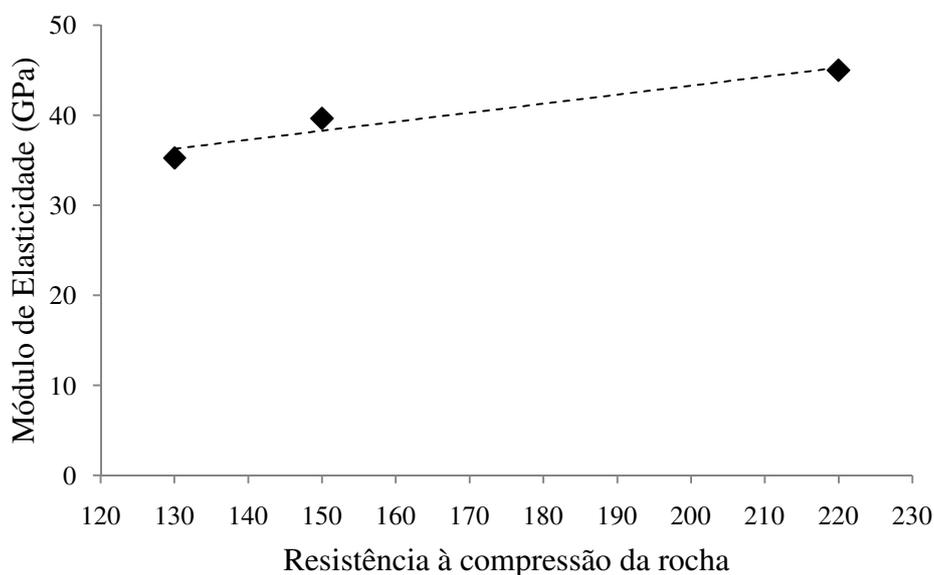


Figura 40 - Efeito da resistência à compressão da rocha no módulo de elasticidade médio do concreto

Alhadass (2008) comparando concretos convencionais feitos com agregados de diferentes tipologias encontrou influência do tipo de agregado no valor do módulo de deformação. Segundo o autor, concretos com agregados de basalto e dolomito apresentaram os maiores valores de módulo em relação aos concretos produzidos com agregados de calcário e gnaiss. Não havendo, entretanto, no estudo de Alhadass (2008) a identificação da resistência de cada tipo de rocha. Pompeu (2004) comparou o módulo de elasticidade de concretos produzidos com granito e basalto com resistência à compressão de 100 MPa. O autor observou que os concretos produzidos com agregados

de basalto apresentaram valores de módulo de elasticidade maiores que as misturas de concreto feitas com agregado de granito. Neste trabalho também não foram identificadas as resistências à compressão de cada tipo de rocha.

4.3.3. Efeito do fator dimensão máxima característica do agregado no módulo de elasticidade do concreto

O fator dimensão máxima característica do agregado graúdo não foi considerado significativo estatisticamente na variável de resposta. A Figura 41 mostra a influência média da dimensão máxima característica na resistência no módulo de elasticidade.

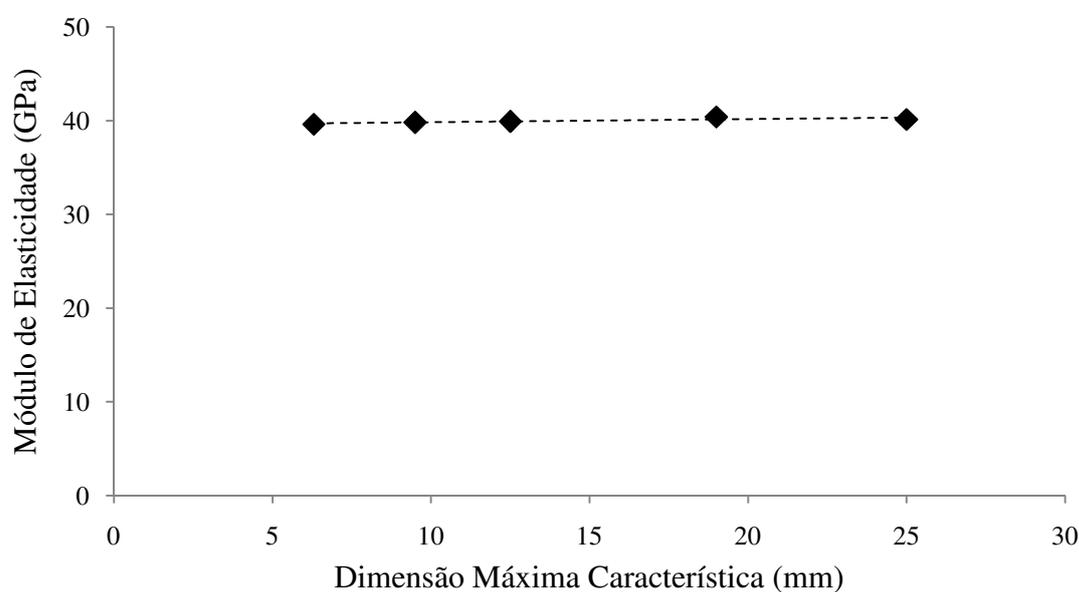


Figura 41 - Efeito da dimensão máxima característica da rocha no módulo de elasticidade médio do concreto

Outros autores como Barbosa et al (1999) relatam que empregando agregados graúdos de basalto com dimensão máxima de 19,5 mm obtiveram valores de módulo de elasticidade maiores do que os com agregado de dimensão máxima de 9,5. Isto, no entanto, não é consenso na literatura. Pompeu (2004) notou uma tendência de aumento do módulo com a diminuição da dimensão máxima característica do agregado. Por outro lado, o mesmo autor destaca que há um expressivo aumento do módulo de elasticidade quando o teor de agregado aumenta.

Há de se considerar a sobreposição de dois efeitos que corroboram para a alteração significativa do módulo de elasticidade. A diminuição da dimensão máxima

característica do agregado graúdo, para concretos produzidos com baixos consumos de água, implica num aumento da resistência à compressão e, por conseguinte do módulo de elasticidade. Por outro lado o aumento da dimensão máxima característica melhora o empacotamento granular, uma vez que este tende a aumentar com o aumento da relação entre a maior e a menor partícula da distribuição granulométrica. Assim concretos produzidos com agregados de maior dimensão máxima característica podem ser dosados com teores de agregados mais elevados de agregado graúdo, elevando assim o módulo de elasticidade.

4.3.4. Modelo matemático para estimativa do módulo de elasticidade do concreto

Uma vez identificados os fatores principais e suas interações que influenciaram de maneira significativa o módulo de elasticidade do concreto, partiu-se para a definição de um modelo de regressão que apresentasse um bom ajuste aos dados experimentais.

Tendo em vista a análise de variância (Tabela 21), construiu-se o modelo da Equação 24. Dado a importância dos fatores principais, resistência à compressão da rocha e consumo de água, que foram verificados através dos valores elevados de médias quadradas, considerou-se inicialmente estes fatores. A resistência à compressão da rocha foi considerada diretamente, pois como mostra a Figura 40, o módulo de elasticidade médio do concreto aumenta com o aumento da resistência à compressão da rocha. Já a Figura 39, que relaciona o consumo de água ao módulo de elasticidade média do concreto, revela uma tendência inversa, ou seja, o módulo de elasticidade diminui com o aumento do consumo de água. Por este motivo o fator consumo de água foi considerado no modelo de maneira inversamente proporcional à propriedade modelada. Os demais termos da Equação 24 representam as interações entre a resistência da rocha e o consumo de água, a resistência da rocha e a dimensão máxima característica e a dimensão máxima característica e o consumo de água.

$$E_c = k_1 \cdot f_{cr} + \frac{k_2}{a} + \frac{k_3 \cdot \sqrt{f_{cr}}}{a} + k_4 \cdot f_{cr} \cdot \Phi_{max} + \frac{k_5 \cdot \Phi_{max}}{a} \quad \text{Equação 24}$$

Onde: E_c – módulo de elasticidade médio do concreto aos 28 dias

a – consumo de água por metro cúbico de concreto

f_{cr} – resistência à compressão da rocha utilizada como agregado

Φ_{max} – dimensão máxima característica do agregado graúdo

Os valores das constantes estimadas a partir dos dados obtidos no programa experimental foram:

$$k_1 = 65 \quad k_2 = 2.206.019 \quad k_3 = 156.412 \quad k_4 = -0,162 \quad k_5 = 7.149$$

A Equação 24 então pode ser escrita na forma da Equação 25.

$$E_c = 65 \cdot f_{cr} + \frac{2206019}{a} + \frac{156412 \cdot \sqrt{f_{cr}}}{a} - 0,162 \cdot f_{cr} \cdot \Phi_{max} + \frac{7149 \cdot \Phi_{max}}{a} \quad \text{Equação 25}$$

A Figura 42, mostra os resultados deste modelo e os respectivos dados experimentais.

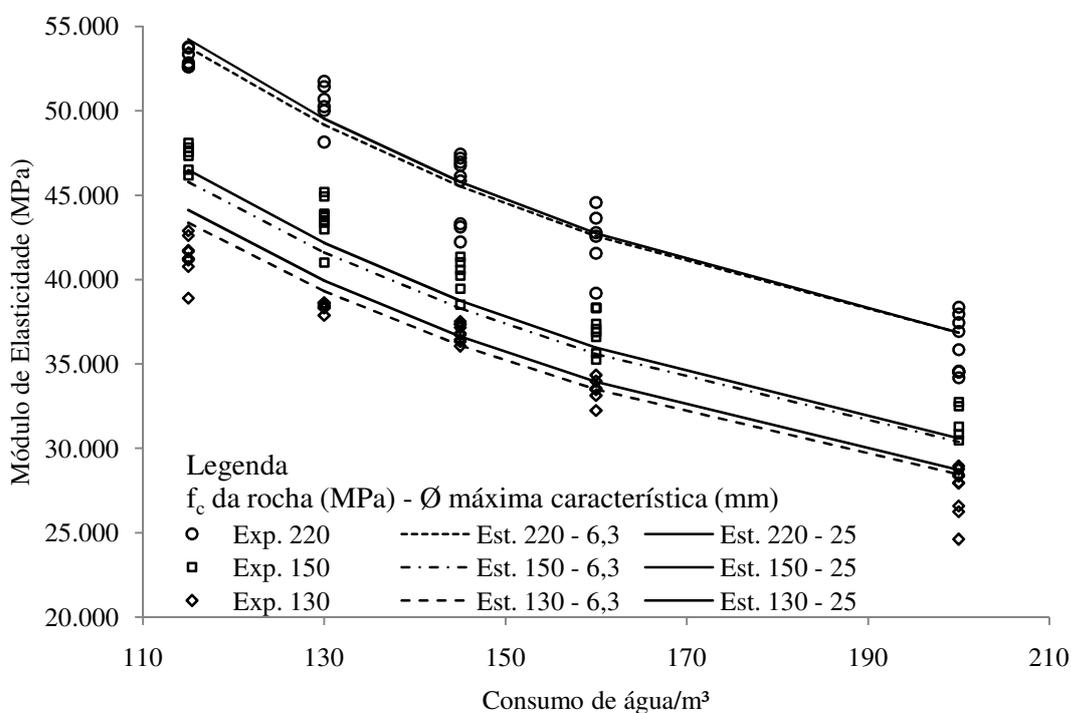


Figura 42 - Efeito da resistência à compressão da rocha e do consumo de água no módulo de elasticidade médio do concreto, aos 28 dias

A Figura 42 apresenta os valores experimentais (Exp.) e os valores estimados (Est.) pelo modelo da Equação 25.

Através da análise dos dados da Figura 42, calculou-se o desvio médio entre o módulo de elasticidade médio do concreto, para três valores experimentais, e o valor estimado pelo modelo para cada tipo de rocha. Para rocha com resistência à compressão de 220 MPa, o desvio médio foi de 1,07 GPa, para a rocha com resistência à compressão de 150 MPa, o desvio médio foi de 1,42 GPa e para a rocha de 130 MPa, o desvio médio foi de 1,12 GPa. O coeficiente de determinação para o modelo resultou um $r^2=0,9650$.

4.3.5. Modelo matemático para correlação entre a resistência à compressão média e a resistência da rocha com o módulo de elasticidade do concreto

Alternativamente à determinação do módulo de elasticidade através do consumo de água, da resistência da rocha e das interações entre estas variáveis e a dimensão máxima característica, esta propriedade também pode ser relacionada à resistência à compressão do concreto. Como foi destacado no item 4.1.1, a resistência à compressão do concreto é influenciada de maneira bastante significativa pelo consumo de água, e também como mostra o item 4.1.3, pela dimensão máxima característica do agregado graúdo.

É importante destacar que a resistência à compressão do concreto, diferentemente das variáveis de controle, já é um resultado. Ou seja, as demais variáveis de controle já exerceram sua influência sobre este parâmetro.

Cabe ressaltar que no presente estudo detectou-se uma pequena influência da resistência à compressão da rocha sobre a resistência à compressão do concreto. Contudo, como mostra a Figura 40, a resistência à compressão da rocha influencia a média do módulo de elasticidade do concreto. Tendo em vista a representatividade do parâmetro resistência à compressão do concreto e a importância da resistência à compressão da rocha sobre o módulo de elasticidade do concreto propôs-se o modelo da Equação 26.

$$E_c = k_1 \cdot f_c^{k_2} \cdot f_{cr}^{k_3} \quad \text{Equação 26}$$

Onde: E_c – módulo de elasticidade médio do concreto aos 28 dias

f_c – resistência média à compressão do concreto aos 28 dias

f_{cr} – resistência à compressão da rocha utilizada como agregado

Os valores das constantes estimadas a partir dos dados obtidos no programa experimental foram:

$$k_1 = 780 \quad k_2 = 0,4621 \quad k_3 = 0,3619$$

A Equação 26 então pode ser escrita como a Equação 27.

$$E_c = 780 \cdot f_c^{0,4621} \cdot f_{cr}^{0,3619} \quad \text{Equação 27}$$

A Figura 43 mostra os resultados deste modelo e os respectivos dados experimentais.

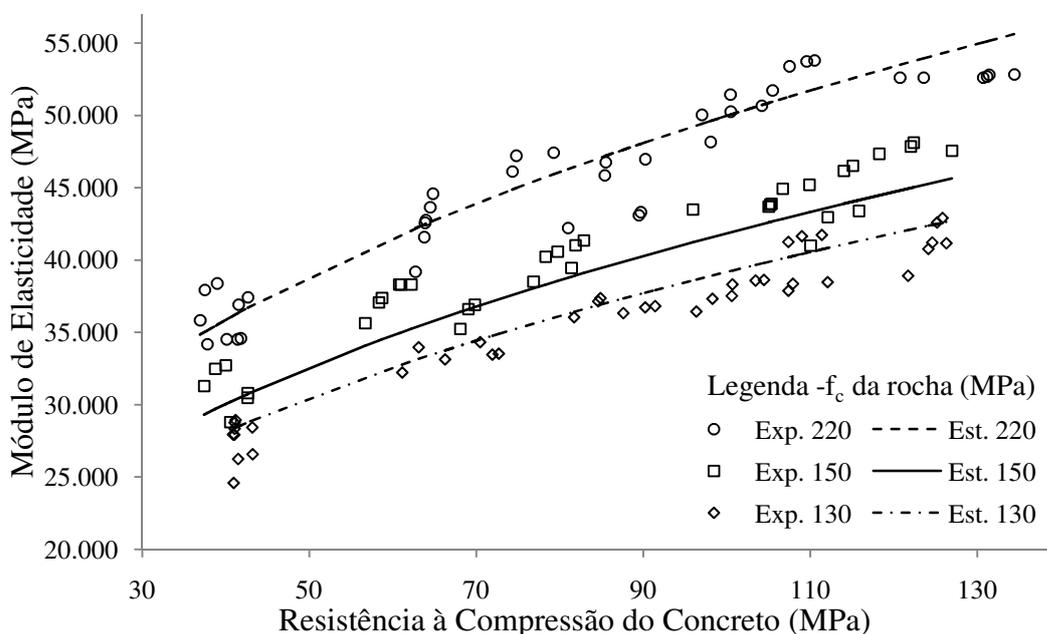


Figura 43 – Correlação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade médio do concreto valores experimentais (Exp.) e valores estimados pelo modelo (Est.)

Através da análise dos dados da Figura 43, calculou-se o desvio médio entre o módulo de elasticidade médio do concreto, para três valores experimentais, e o valor estimado

pelo modelo para cada tipo de rocha. Para rocha com resistência à compressão de 220 MPa, o desvio médio foi de 1,439 GPa, para a rocha com resistência à compressão de 150 MPa, o desvio médio foi de 1,814 GPa e para a rocha de 130 MPa, este desvio médio foi de 1,087 GPa. O coeficiente de determinação para o modelo resultou em um $r^2=0,9883$.

Há algumas equações bastante conhecidas do meio técnico que correlacionam a resistência à compressão de concretos ao módulo de elasticidade. A NBR 6118 (2007), por exemplo, relaciona a resistência à compressão de concretos com resistência à compressão de até 50 MPa, ao módulo de elasticidade unicamente a através da resistência característica do concreto, através da Equação 28.

$$E_{cs} = 0,85.5600. \sqrt{f_{ck}} \quad \text{Equação 28}$$

Onde: E_{cs} – módulo de elasticidade médio do concreto aos 28 dias

f_{ck} – resistência característica à compressão do concreto aos 28 dias

A Prática Recomendada pelo IBRACON (2004) sugere uma correção na Equação 28 do módulo de elasticidade levando em conta a consistência do concreto no estado fresco e a influência de diferentes tipos de agregado, como mostra a Equação 29.

$$E_{cs} = a_1 \cdot a_2 \cdot 0,85.5600. \sqrt{f_{ck}} \quad \text{Equação 29}$$

Onde: E_{cs} – módulo de elasticidade médio do concreto aos 28 dias

f_{ck} – resistência característica à compressão do concreto aos 28 dias

a_1 – fator de correção em função do tipo de agregado, 1,2 para basalto

a_2 – fator de correção em função do tipo de agregado da consistência do concreto no estado fresco, 1,0 para consistência plástica

A norma americana ACI 318/2005 também prescreve uma expressão para avaliação do módulo de deformação em função da resistência à compressão, conforme apresentado na Equação 30.

$$E_{cs} = 4700 \cdot \sqrt{f_c} \quad \text{Equação 30}$$

Onde: E_{cs} – módulo de elasticidade médio do concreto aos 28 dias

f_c – resistência à compressão do concreto aos 28 dias

A expressão prescrita pelo EUROCODE (2004), para avaliação do módulo de deformação em função da resistência à compressão e pelo tipo de rocha, é dado pela Equação 31.

$$E_{cs} = a_e \cdot 22000 \cdot \sqrt[3]{f_{cm}/10} \quad \text{Equação 31}$$

Onde: E_{cs} – módulo de elasticidade médio do concreto aos 28 dias

a_e – fator de correção em função do tipo de agregado, 1,2 para basalto

f_{cm} – resistência média do concreto aos 28 dias

Dal Molin (1995) propõe um modelo de previsão do módulo de elasticidade a partir da resistência à compressão, válido para o intervalo de resistência à compressão 20 a 90 MPa. O modelo está representado na Equação 32.

$$E_c = 9570 \cdot f_c^{0,31} \quad \text{Equação 32}$$

Onde: E_c – módulo de elasticidade médio do concreto aos 28 dias

f_c – resistência à compressão do concreto aos 28 dias

A Figura 44 apresenta a uma comparação feita entre os valores experimentais (Exp.) obtidos no programa experimental deste trabalho, os modelos de estimativa (Est.) gerados a partir dos dados experimentais deste trabalho e modelos consagrados para estimativa do módulo de elasticidade para concretos convencionais e de alta resistência.

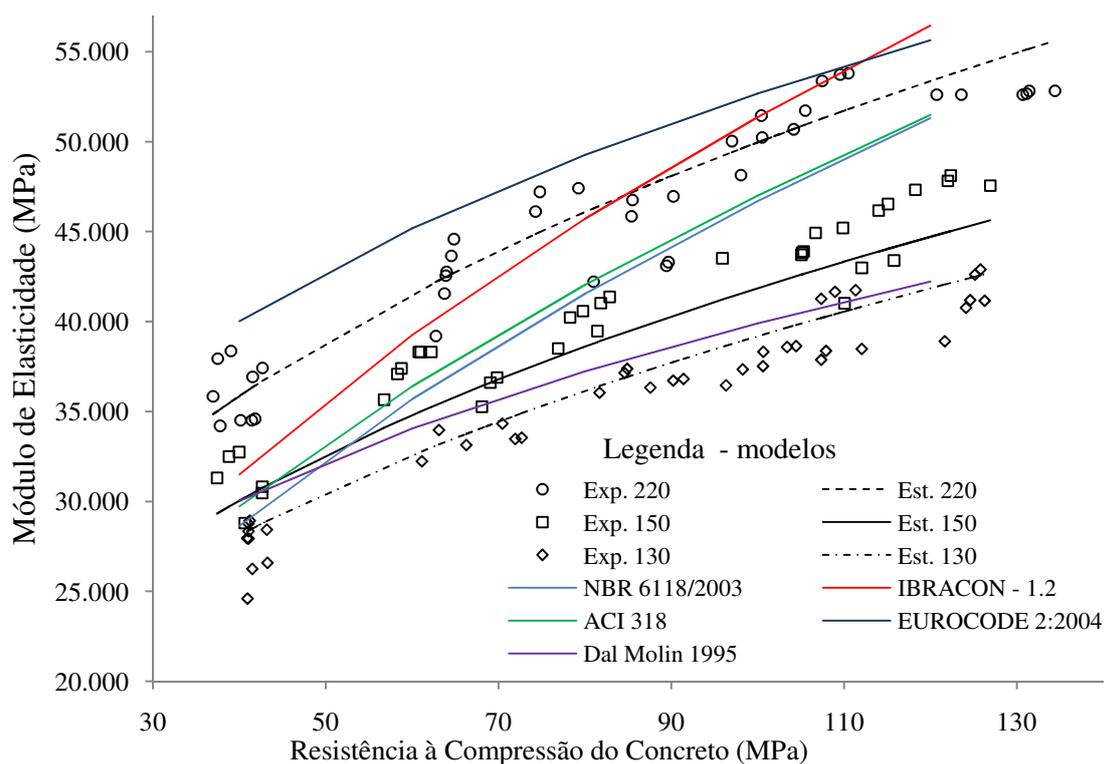


Figura 44 – Correlação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade médio do concreto

Através da análise da Figura 44, constata-se que de maneira geral o modelo do EUROCODE (2004), apresentou valores mais elevados do que os encontrados nos experimentos e mais elevados do que os demais modelos. Já o modelo do IBRACON (2004), para os valores mais elevados de resistência, fornece estimativas acima das observadas nos experimentos. Os modelos da NBR 6118 (2007) e ACI 318 (2005) apresentam uma boa estimativa dos valores médios encontrados. Contudo, cabe ressaltar que a diferença encontrada entre o módulo de elasticidade de concretos de mesma resistência produzidos com rochas diferentes chega a 10 GP, cerca de 20% de diferença. Dos modelos pesquisados na bibliografia o modelo Dal Molin (1995) apresentou os menores valores para o módulo de elasticidade, sendo assim o mais conservador sob ponto de vista da segurança.

Outro aspecto a ser destacado é o comportamento do fenômeno propriamente dito. Observa-se através da Figura 44 que as curvas parabólicas, modelo da NBR 6118/2007, ACI 318 e IBRACON são mais eficientes na previsão do módulo de elasticidade para resistências mais baixas. À medida que a resistência aumenta estes modelos tendem a fornecer valores superestimados. Os modelos Eurocode 2 e Dal Molin-1995 que são

funções exponenciais de expoente da ordem de um terço representaram melhor a tendência de comportamento observada nos dados experimentais.

Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002) utilizaram três diferentes tipos de agregados: basalto, granito e seixo rolado, comumente utilizados na Europa para produção de concreto de alto desempenho. Os autores produziram seis traços de concreto com consumos de água de 123 e 167 litros de água, e com 500 e 324 kg de cimento, respectivamente, por metro cúbico de concreto. Os resultados obtidos foram comparados com os estimados pelo modelo Eurocode-2 de 2001. A conclusão do estudo foi que os valores experimentais são cerca de 13% maiores para o agregado de basalto do que o previsto pelo referido modelo. Já para o granito britado os valores experimentais foram cerca de 21% menores. Os concretos produzidos com seixo rolado (natural) apresentaram valores próximos aos previstos pelo modelo Eurocode 2. Tendo em vista a diferença entre os valores previstos pelo modelo de previsão e os dados experimentais, os referidos autores recomendam que a análise das estruturas construídas com concreto de alto desempenho sejam feitas com dados reais de concretos produzidos com agregado graúdo disponível na região, salientando que as propriedades estimadas por modelos de previsão como o Eurocode-2001 são pouco precisas mesmo para pré-dimensionamento.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo estudar algumas propriedades mecânicas básicas dos concretos de alto desempenho: resistência à compressão, resistência à tração (resistência à tração por compressão diametral) e módulo de elasticidade, verificando a influência dos fatores controláveis consumo de água, dimensão máxima característica do agregado e da resistência da rocha utilizada como agregado graúdo na mistura. Com base no comportamento dos concretos de alto desempenho em relação a estas variáveis, pretendeu-se colaborar para o estabelecimento de novos modelos de estimativa das propriedades mecânicas.

As conclusões apresentadas a seguir não devem ser tomadas de forma absoluta, pois se referem somente aos dados obtidos de concretos que utilizaram tipos, quantidades e qualidades específicas de materiais e técnicas de execução. Sua representatividade deve ser firmada através da execução de novas pesquisas que apresentem resultados que possam complementar e confirmar os obtidos neste estudo.

5.1. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos podem-se enumerar as seguintes conclusões, todas comprovadas estatisticamente:

5.1.1. Em relação à resistência à compressão

O presente estudo confirmou que a relação água/aglomerante (fator consumo de água) tem a maior influência sobre a resistência à compressão. Através da análise dos dados experimentais foi possível quantificar o aumento da eficiência do cimento e da sílica ativa em traços com menores consumos de água. Comparado-se um traço de concreto produzido com 200 litros de água com um concreto produzido com 115 litros de água, constatou-se que para se produzir 1 MPa no primeiro traço são necessários 9,78 kg de aglomerante enquanto no segundo são necessários 5,45 kg.

A dimensão máxima característica do agregado tem uma influência direta sobre a resistência à compressão. Em geral, a diferença de resistência à compressão existente entre concretos produzidos com agregado graúdo de dimensão máxima característica de 6,3 mm foi aproximadamente 15% maior do que concretos produzidos com agregado de dimensão máxima característica de 25 mm pelo melhor desempenho dos agregados de menor dimensão máxima característica. A menor probabilidade de haverem partículas contendo falhas e a maior homogeneidade do concreto são responsáveis pelo aumento de sua resistência à compressão, à medida que se reduz a dimensão máxima característica do agregado. Soma-se a isto o fato de o tamanho das fissuras geradas durante o carregamento estar relacionado com a extensão da zona sob tensão de tração e cisalhamento e esta, no caso de partículas esféricas, ser diretamente proporcional ao diâmetro do agregado.

A influência da dimensão máxima característica é maior para concretos produzidos com consumo de água menor. Para os concretos produzidos com consumo de água de 200 litros a diferença de resistência é insignificante para os concretos com agregado de dimensão máxima 6,3 e 25 mm, enquanto para concretos produzidos com consumo de água de 115 litros essa diferença é, em média, de 20 MPa para as diferentes rochas estudadas.

Quanto à influência da resistência à compressão da rocha na resistência à compressão do concreto confirmou-se neste estudo que em concretos convencionais a resistência do agregado isoladamente não representa uma alteração significativa. Para os concretos de alto desempenho, produzidos neste estudo com consumo de água inferior a 160 litros, constatou-se a influência da resistência à compressão da rocha.

Contrariando o que concluíram outros autores como Ke-Ru-Wu et al (2001), os resultados experimentais do presente trabalho não confirmam o princípio de resistência potencial do agregado. Diferentemente disto observou-se um aumento da resistência à compressão do concreto diretamente proporcional à aproximação da resistência da rocha e a resistência do concreto produzido, respeitando-se a premissa de que o agregado sempre apresenta resistência superior à resistência do concreto produzido.

Quanto ao modelo de estimativa da resistência à compressão do concreto, apresentou-se o modelo proposto na Equação 19, que contemplou somente os fatores principais,

relação água aglomerante, dimensão máxima característica e resistência da rocha. Mesmo omitindo as interações entre estes fatores que se mostraram significativas na análise de variância, obteve-se um bom ajuste aos dados experimentais, com um $r^2=0,9707$.

5.1.2. Em relação à resistência à tração

Constatou-se, mais uma vez, a importância do fator consumo de água, ou relação água/aglomerante, na resistência à tração do concreto representa 6,06% da resistência à compressão do concreto para o consumo de água de 115 litros de água. Esse percentual aumenta para 6,18%, 6,63%, 7,24% e 8,13% para os consumos de água de 130, 145, 160 e 200, respectivamente. Observou-se assim um aumento da resistência à tração com a diminuição do consumo de água por metro cúbico de concreto.

O efeito da resistência à compressão da rocha não se mostrou um fator significativo na resistência à tração por compressão diametral do concreto. A dimensão máxima característica do agregado graúdo também não causou variação significativa na resistência à tração, tampouco nenhuma interação entre os fatores de controle foi identificada como significativa.

A partir dos dados experimentais criou-se um modelo de previsão da resistência à tração partindo-se do consumo de água. Este modelo, (Equação 21), apresentou um coeficiente de determinação $r^2=0,7549$. O coeficiente de determinação é baixo quando comparado ao coeficiente de determinação do modelo apresentado para resistência à compressão. Isto se deve à variabilidade dos dados e diferentemente de outros trabalhos, optou-se por adotar modelos simples de previsão.

Um modelo foi criado também para correlacionar a resistência à tração com a resistência à compressão. As duas propriedades apresentam-se diretamente proporcionais. A Equação 23 mostra o modelo que relaciona a resistência à tração com resistência à compressão, sendo o coeficiente de determinação entre os dados gerados pelo modelo e os dados experimentais $r^2=0,7430$.

5.1.3. Em relação ao módulo de elasticidade

O fator consumo de água e resistência da rocha têm uma influência direta sobre o módulo de elasticidade do concreto. Como era esperado, o módulo de elasticidade cresce com a diminuição do consumo de água.

Diferentemente do que ocorre para a resistência à compressão do concreto, o fator resistência à compressão da rocha para o módulo de elasticidade é um fator significativo. Isto se deve ao fato de o módulo de elasticidade da rocha também ser proporcional à resistência da rocha contribuindo assim para o aumento desta propriedade do concreto.

O fator dimensão máxima característica do agregado graúdo não se mostrou significativo na análise de variância.

O modelo de previsão do módulo de elasticidade criado a partir dos dados experimentais, (Equação 25), apresenta como variáveis os fatores principais: resistência da rocha e consumo de água bem como suas interações significativas. O coeficiente de determinação encontrado para este modelo foi de $r^2=0,9650$.

Alternativamente também foi criado um modelo de previsão do módulo de elasticidade a partir da resistência à compressão do concreto e da resistência à compressão da rocha. Este modelo, Equação 27, apesar de mais simples que o anterior, apresenta um coeficiente de determinação $r^2 = 0,9883$.

Finalmente tendo em vista o efeito da resistência e da dimensão máxima característica do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho destaca-se a grande influência da dimensão máxima característica do agregado na resistência à compressão e a também expressiva influência exercida pela resistência à compressão da rocha no módulo de elasticidade do concreto de alto desempenho.

5.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Listam-se aqui algumas sugestões à cerca de estudos que futuramente podem ser desenvolvidos e que contribuiriam para o melhor entendimento de pontos pouco explorados neste trabalho:

- avaliação da influência de outras classes de rochas com diferentes níveis de resistência na resistência à compressão do concreto;
- avaliação da influência do teor de agregado graúdo na resistência à tração do concreto de alto desempenho.
- avaliação do módulo de elasticidade da rocha e o módulo de elasticidade do concreto, buscando-se comprovar as observações feitas neste estudo.

REFERÊNCIAS

- [1] ACI Committee 211.1. **Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete**, ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1991.
- [2] ACI Committee 211.4R-93, **Guide for selecting proportions for high-strength concrete with Portland cement and fly ash**, ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, materials and general properties of concrete, Detroit, MI, 1993.
- [3] AÍTCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. São Paulo. Editora Pini, 2000.
- [4] AÍTCIN, P. C. **Cements of yesterday and today concrete of tomorrow**. Cement and Concrete Research, v. 30, p. 1349-1359, 2000 (2).
- [5] AJDUKIEWICZ, A.; KLISZCZEWICZ, A. **Differences in instantaneous deformability of HS/HPC according to the kind of coarse aggregate**. Cement and Concrete Composites, v. 24, p. 263-267, 2002.
- [6] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. (2005). **ACI 318/2005 – Building Code Requirements For Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318R-05)**.
- [7] ALMEIDA, I. R. **Betões de Alta Resistência e Durabilidade. Composição e Características**. Lisboa (Portugal): Publicação INCMC 2, LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1990.
- [8] ALHADAS, M. F. S., **Estudo da Influência do Agregado Graúdo de Diferentes Origens Mineralógicas nas Propriedades Mecânicas do Concreto**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.
- [9] ALVES, M. F., **Estudo comparativo de métodos de dosagem para concreto de alta resistência**, Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000.
- [10] ARNDT, J. A.; SOUZA, J.; BIANCHINI, M. **Influência do índice de forma do agregado graúdo na resistência à compressão do concreto**. 49º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON. Bento Gonçalves, 2007.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733: Cimento Portland – Cimento Portland de alta resistência inicial – especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.
- [12] _____. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

- [13] _____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- [14] _____. **NBR 6118**: Concreto – Projeto e execução de obras de concreto armado. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- [15] _____. **NBR – 7211**: Agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro. 2009.
- [16] _____. **NBR – 7222**: Argamassa e concreto – determinação da resistência à tração por compressão diâmetral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 2011.
- [17] _____. **NBR 7389**: Apreciação petrográfica de materiais naturais, para utilização como agregado em concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- [18] _____. **NBR – 7809**: Agregado graúdo – determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro. 2008
- [19] _____. **NBR 8522**: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- [20] _____. **NBR 12767**: Rochas para revestimento – determinação da resistência à compressão uniaxial. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- [21] _____. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.
- [22] _____. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- [23] BARRETO, T. G.; GONÇALVES, E. V.; RIBEIRO, P. P.; SANTOS, T. V. I.; MAZZERO, R.; MARTH, S. D. **Desenvolvimento de concreto de alto desempenho em laboratório com o uso de agregados graúdos de diferentes jazidas expostos à diferentes tipos de cura**. 49º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON. Salvador, 2008.
- [24] BARBOSA, M. P.; AKASAKI, J. L.; ALCÂNTARA, M. A. M.; GARCIA, F. N. **A influência do tipo de agregado graúdo nos módulos de elasticidade e na resistência à tração dos concretos de elevado desempenho**. 41º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON. Salvador, 1999.
- [25] CHANG, P. K. **An approach to optimizing mix design for properties of high-performance concrete**. Cement and Concrete Research, v. 34, p. 623-629, 2004.
- [26] CHI, J. M.; HUANG, R.; YANG, C. C.; CHANG, J. J. **Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete**. Cement and Concrete Research, v. 25, p. 197-205, 2001.

- [27] CHRISTÓFOLLI, J. L.; INOUE, M. H.; FREITAS, J. A. **Recorde Nacional de Concreto de Alto Desempenho em pilares**, Centro Empresarial Antártica. In: 49° Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON. Bento Gonçalves, 2007.
- [28] CREMONINI, R. A.; DAL MOLIN, D. C. C.; MANCIO, M.; CECCATTO, D.; GOULART, J. **Desenvolvimento de um método de dosagem específico para concretos de alta resistência com baixo consumo de cimento**. In: 43° Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON. Foz do Iguaçu, 2001.
- [29] DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adição de microssilica**. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- [30] DAL MOLIN, D. C. C.; MONTEIRO, P. J. M. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adição de microssilica**. Boletim técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.
- [31] DAL MOLIN, D. C. C.; WOLF, J. **Viabilidade técnico-econômica da utilização de concreto de alta resistência em edifícios altos**. In: ENCONTRO NACIONAL DA CONSTRUÇÃO, 10, Gramado, 1990. Anais...Porto Alegre: SERGS. p. 853-863.
- [32] DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. **Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model**. Cement and Concrete Research. v.24, n.6, p 997-1009, 1994.
- [33] EUROCODE – **European Standard. Design of concrete structures**. Part 1-1: General rules and rules of buildings, 2004.
- [34] FERNANDES, J. F.; OBATA, S. M.; HELENE, P. L. **Influência da dosagem do concreto na determinação da energia de fratura**. 49° Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON. Bento Gonçalves, 2007.
- [35] FORMAGINI, S. **Dosagem Científica e Caracterização Mecânica de Concretos de Altíssimo Desempenho**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.
- [36] FRANÇA, E. P.; MAGALHÃES, A. G.; PAULINO, M. T.; CALIXTO, J. M.; VASCONCELOS, W. L. **Estudo comparativo das propriedades físicas e mecânicas de concretos de alto desempenho elaborados com agregados graúdos de naturezas mineralógicas diversas**. 49° Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON. Bento Gonçalves, 2007.
- [37] GARLET, G.; REGINATO, P. A. R. **Agregados graúdos e sua influência na resistência à compressão de concretos de baixa e alta resistência de Caxias do**

Sul (RS). 49° Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON. Bento Gonçalves, 2007.

- [38] JUCÁ, T. P.; TEIXEIRA, F. A.; PEREIRA, C. H. A. F.; OLIVEIRA, K. R. B.; SENA, A. M.; GUIMARÃES, L. E.; ANTONELLI, G. R.; GOMES, F. M.; GEYER, A. **Estudo da dosagem de concretos de alto desempenho – comparativo de custos.** 43° Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON. Foz do Iguaçu, 2001.
- [39] HELENE, P. L.; TERZIAN, P. R. **Manual de dosagem e controle do concreto.** Brasília: Pini, 1992.
- [40] IL-SEOK-OH. **Effects of aggregates on the properties of concrete.** Iowa State University, april, 24, 2001.
- [41] IBRACON. **Comentários técnicos e exemplos de aplicação da NB-1.** Comitê técnico de concreto estrutural, 2004.
- [42] KE-RU-WU.; BING, C.; WU, Y; DHONG, Z. **Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high performance concrete.** Cement and Concrete Research, v. 31, p.1421-1425, 2001.
- [43] KIM, J. H.; YOON, Y. S.; LIM, C. H. **Genetic algorithm in mix proportioning of high-performance concrete.** Cement and Concrete Research, v. 34, p.409-420, 2003.
- [44] LONG, G.; WANG, X.; XIE, Y. **Very-high-performance concrete with ultrafine powders.** Cement and Concrete Research, v. 32, p.601-605, 2002.
- [45] MA, J.; ORGASS, M. **Comparative Investigations on Ultra-High Performance Concrete with and without coarse aggregates.** LACER, N°9, 2004.
- [46] MANUEL, P. J. M. **Estudo da influência do teor de argamassa no desempenho de concretos auto-adensáveis.** Dissertação (Mestrado). UFRGS, Porto Alegre, 2005.
- [47] MASLEHUDDIN, M.; ALMUSALLAM, A. A.; BESHAR, H. **Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete.** Construction and Building Materials, v. 17, p. 97-103, 2003.
- [48] MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais.** 3.ed. São Paulo: IBRACON, 2008.
- [49] MEHTA, P.K; AİTCIN, P-C. **Principles underlying production of high performance concrete.** Cement, Concrete & Aggregates v. 12, n.2, p. 70-78, 1990.

- [50] MENDES, S. E. S. **Estudo Experimental de Concreto de Alto Desempenho Utilizando Agregados Graúdos disponíveis na região Metropolitana de Curitiba**. Dissertação (Mestrado) – ST/PPGCC, Universidade Federal do Paraná, 2002.
- [51] NETO, J. B., “**Desempenho Elevado**”, *TÉCHNE*, edição 100, Julho, pp.34-38, 2005.
- [52] NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2º ed. São Paulo: Pini, 1997.
- [53] O'REILLY, V. D. **Método de dosagem de concreto de elevado desempenho**. São Paulo: Editora Pini, 1998.
- [54] OZTURAN, T.; CENEN, C. **Effect of Coarse Aggregate Type on Mechanical Properties of Concretes With Different Strengths**. *Cement and Concrete Research*, v. 27, n.2, p. 165-170, 1997
- [55] PACELLI DE ANDRADE, W. P. **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades**. São Paulo. Editora Pini, 1997.
- [56] PAULA, A. L. **Avaliação da Resistência de Pilares de Concreto de Alta Resistência**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.
- [57] POMPEU, B. B. N. **Efeito do tipo, tamanho e teor de agregado graúdo na resistência e energia de fratura do concreto**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.
- [58] RIBEIRO, J. L. D.; KULAKOWSKI, M. P.; DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao planejamento de experimentos em projetos de pesquisa de engenharia civil**. *Revista Ambiente Construído, ANTAC*. Porto Alegre, v. 5, n.2, p.37-49, 2005.
- [59] RICHARD, P.; CHEYREZY, M. **Composition of reactive powder concretes**. *Cement and Concrete Research*. v. 25, p. 1501-11511, 1995.
- [60] RESENDE, H. F. V. **Formação de padrões em meios granulares densos**. Tese (Doutorado). Rede Temática em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual de Minas Gerais, Ouro Preto, 2008.
- [61] RUDUIT, F.R.; CREMONINI, R. A. **Estudo comparativo de métodos de preparo de topos de corpos-de-prova de concreto para ensaio de resistência à compressão**. 51º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON. Curitiba, 2009.
- [62] SILVA, A. P.; SEGADÃES, A. M.; DEVEZAS, T. C. **Aplicação de métodos estatísticos na otimização da densidade de empacotamento de distribuições de pós de alumina**. *Revista Cerâmica*. n. 60 p. 345-354. 2004.

- [63] SILVA, A. S. M. da, **Dosagem de Concreto Pelos Métodos de Empacotamento Compressível e Aïtcin-Faury Modificado**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- [64] SOUZA, P. S. **Verificação da influência do uso de metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- [65] TRISTÃO, F. A. **Influência da composição granulométrica da areia nas propriedades das argamassas mistas de revestimento**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.
- [66] TRISTÃO, F. A. **Influência dos parâmetros texturais das areias nas propriedades das argamassas mistas de revestimento**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- [67] TUTIKIAN, B. F. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- [68] VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas**. 2004. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004
- [69] WEIDMANN, D. F. **Contribuição ao estudo da influência da forma e da composição granulométrica de agregados miúdos de britagem nas propriedades do concreto de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- [70] ZHOU, F. P.; LYDON, F. D.; BARR, B. I. G. **Effect of coarse aggregate on elastic modulus and compressive strength of high performance concrete**. Cement and Concrete Research, v. 25, n°1, p. 177-186. 1995.

APÊNDICE 1 - Projeto experimental fracionado

Nº.	Relação a/a	Resistência da Rocha (MPa)	Dimensão Máxima Característica (mm)
1	0,17	220	6,3
2	0,17	220	12,5
3	0,17	220	25
4	0,17	150	9,5
5	0,17	150	19
6	0,17	130	6,3
7	0,17	130	12,5
8	0,17	130	25
9	0,21	220	9,5
10	0,21	220	19
11	0,21	150	6,3
12	0,21	150	12,5
13	0,21	150	25
14	0,21	130	9,5
15	0,21	130	19
16	0,25	220	6,3
17	0,25	220	12,5
18	0,25	220	25
19	0,25	150	9,5
20	0,25	150	19
21	0,25	130	6,3
22	0,25	130	12,5
23	0,25	130	25
24	0,30	220	9,5
25	0,30	220	19
26	0,30	150	6,3
27	0,30	150	12,5
28	0,30	150	25
29	0,30	130	9,5
30	0,30	130	19
31	0,50	220	6,3
32	0,50	220	12,5
33	0,50	220	25
34	0,50	150	9,5
35	0,50	150	19
36	0,50	130	6,3
37	0,50	130	12,5
38	0,50	130	25

APÊNDICE 2 – Resultados de resistência à compressão (MPa)

		Consumo de Água/m ³ de concreto (l)																								
		115					130					145					160					200				
		Ø _{max}					Ø _{max}					Ø _{max}					Ø _{max}					Ø _{max}				
		6,3	9,5	12,5	19	25	6,3	9,5	12,5	19	25	6,3	9,5	12,5	19	25	6,3	9,5	12,5	19	25	6,3	9,5	12,5	19	25
Resistência da Rocha (MPa)	220	134,4	-	130,7	-	110,5	-	104,2	-	105,5	-	90,2	-	89,7	-	79,2	-	64,8	-	64,0	-	42,6	-	39,0	-	41,8
		131,4	-	123,6	-	109,6	-	100,5	-	100,5	-	85,5	-	89,5	-	74,8	-	64,5	-	63,9	-	41,5	-	37,5	-	40,1
		131,1	-	120,8	-	107,5	-	98,0	-	97,0	-	85,4	-	81,0	-	74,3	-	62,7	-	63,7	-	41,4	-	37,0	-	37,8
	150	-	126,9	-	122,3	-	115,8	-	109,9	-	105,3	-	82,9	-	79,8	-	69,8	-	62,2	-	58,7	-	42,7	-	40,0	-
		-	118,2	-	122,0	-	112,1	-	106,7	-	105,2	-	81,9	-	78,3	-	69,0	-	61,0	-	58,3	-	42,6	-	38,8	-
		-	114,0	-	115,1	-	110,0	-	105,0	-	95,9	-	81,4	-	76,9	-	68,1	-	60,8	-	56,7	-	40,6	-	37,4	-
	130	125,8	-	126,3	-	111,4	-	112,1	-	104,5	-	100,6	-	91,4	-	84,9	-	72,7	-	70,5	-	43,2	-	43,2	-	41,2
		125,2	-	124,1	-	109,0	-	107,9	-	103,4	-	98,3	-	90,2	-	84,6	-	71,9	-	63,1	-	41,5	-	41,1	-	41,1
		124,6	-	121,7	-	107,4	-	107,4	-	100,7	-	96,3	-	87,6	-	81,7	-	66,3	-	61,1	-	40,9	-	41,0	-	40,9

APÊNDICE 3 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral (MPa)

		Consumo de Água/m ³ de concreto (l)																								
		115					130					145					160					200				
		ØMAX					ØMAX					ØMAX					ØMAX					ØMAX				
		6,3	9,5	12,5	19	25	6,3	9,5	12,5	19	25	6,3	9,5	12,5	19	25	6,3	9,5	12,5	19	25	6,3	9,5	12,5	19	25
Resistência da Rocha (MPa)	220	8,22	-	8,16	-	9,72	-	7,78	-	6,69	-	6,94	-	6,33	-	6,28	-	6,10	-	4,67	-	4,02	-	3,40	-	3,70
		7,48	-	6,34	-	7,07	-	6,92	-	6,66	-	6,26	-	6,23	-	6,27	-	4,68	-	4,35	-	3,50	-	3,12	-	3,26
		7,33	-	6,05	-	6,11	-	6,83	-	5,14	-	4,50	-	5,85	-	6,24	-	4,22	-	4,34	-	2,98	-	2,81	-	2,66
	150	-	8,84	-	8,07	-	7,38	-	6,87	-	5,79	-	6,42	-	4,87	-	5,53	-	5,01	-	4,89	-	4,15	-	3,61	-
		-	8,28	-	8,04	-	6,75	-	6,38	-	5,43	-	6,03	-	4,51	-	5,47	-	5,00	-	4,86	-	3,75	-	3,57	-
		-	6,83	-	7,54	-	6,61	-	6,15	-	5,71	-	4,67	-	4,51	-	4,82	-	4,10	-	4,67	-	3,48	-	3,17	-
	130	8,64	-	6,80	-	8,12	-	7,40	-	7,67	-	6,28	-	6,62	-	5,39	-	4,44	-	4,84	-	4,17	-	3,51	-	3,15
		6,63	-	6,75	-	7,48	-	5,78	-	6,95	-	6,00	-	5,09	-	5,24	-	4,13	-	4,40	-	3,89	-	3,33	-	3,07
		5,38	-	4,85	-	6,73	-	5,39	-	6,13	-	5,54	-	4,82	-	4,79	-	3,42	-	4,12	-	3,02	-	2,70	-	2,98

APÊNDICE 4 – Resultados de módulo de elasticidade (GPa)

		Consumo de Água/m ³ de concreto (l)																								
		115					130					145					160					200				
		Ø _{MAX}					Ø _{MAX}					Ø _{MAX}					Ø _{MAX}					Ø _{MAX}				
		6,3	9,5	12,5	19	25	6,3	9,5	12,5	19	25	6,3	9,5	12,5	19	25	6,3	9,5	12,5	19	25	6,3	9,5	12,5	19	25
Resistência da Rocha (MPa)	220	52,7		52,6		53,4		48,1		50,0		45,9		42,2		46,1		43,7		41,6		34,5		35,9		34,2
		52,8		52,6		53,7		50,2		51,4		46,8		43,1		47,2		39,2		42,6		36,9		37,9		34,5
		52,8		52,6		53,8		50,7		51,7		47,0		43,3		47,4		44,6		42,8		37,4		38,4		34,6
	150		47,3		47,8		41,0		43,7		43,5		41,0		40,2		35,3		38,3		37,1		28,8		32,5	
			46,2		46,5		43,0		44,9		43,8		39,5		38,5		36,6		38,3		35,6		30,5		31,3	
			47,6		48,1		43,4		45,2		43,9		41,4		40,6		36,9		38,3		37,4		30,8		32,7	
	130	41,2		40,8		41,3		38,4		38,6		36,4		36,3		36,1		33,1		34,0		26,2		27,9		28,0
		42,6		38,9		41,7		37,9		38,3		37,3		36,7		37,1		33,5		32,2		24,6		28,3		28,8
		42,9		41,2		41,7		38,5		38,6		37,5		36,8		37,4		33,5		34,3		26,6		28,4		28,9

ANEXO 1 - Resultados de PACELLI DE ANDRADE, 1997

Agregado	Procedência	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
ROCHAS METAMÓRFICAS			
Anfibólio-Gnaisse	Itumbiara	101,5	40,8
Anfibólio-Gnaisse	Miranda	75,5	38,1
Anfibólio-Biotita	Miranda	120,9	26,9
Clorita Xisto	Corumbá I	74,6	-
Filito Grafítico	Paulista	30,7	34,2
Gnaisse	Angra dos Reis	142,5	65,6
Gnaisse	Boa Esperança	121,5	47,8
Gnaisse	Fumaça	129,9	48,9
Gnaisse	Sapucaia	102,2	19,4
Gnaisse	Itumbiara	91,7	45,5
Granada-Gnaisse	Miranda	44,2	9,4
Micaxisto	Serra do Falcão	85,2	47,4
Micaxisto	Cana Brava	16,0	-
Micaxisto Carbonático	Santa Rita	81,8	21,6
Muscovita-Gnaisse	Itumbiara	84,7	5,5
Quartzito	Paulista	237,1	64,6
Quartzito	Salto Caiabis	97,8	42,9
Quartzito	Salto Apiacás	104,4	16,1
Quartzito	Serra da Mesa	54,3	44,1
Quartzito	Corumbá I	367,3	-
Quartzito	Bocaina	112,5	12,7
Quartzito	Serra da Mesa	68,1	20
Quartzito Sacaróide	Serra da Mesa	38,4	-
Xisto	Cana-Brava	77,2	24,7
Xisto Grafítico	Cana-Brava	58,9	35,8
ROCHAS SEDIMENTARES			
Arenito	Capanda-	236,2	36,0
Calcário	Serra da Mesa	4,3	-
Metarenito	Salto Apiacás	95,4	35,5
ROCHAS MAGMÁTICAS			
Basalto amigdalóide	Marimbondo	24,1	86,5
Basalto denso	Marimbondo	128,0	49,6
Basalto	Itumbiara	115,3	71,8
Basalto	Itaipu	164,6	58,2
Basalto	Boa Esperança	181,7	45,4
Bostonito	Jacutinga	150,3	-
Diabásio	Jacutinga	223,0	-
Gabro	Cana-Brava	69,8	8,2
Gabro	Cana-Brava	208,9	50,6
Gabro	Cana-Brava	142,9	34,7
Granito	Serra da Mesa	184,4	44,4
Granito	Serra da Mesa	132,1	37,9