

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**CONTRIBUIÇÃO AOS MÉTODOS DE DOSAGEM DE  
CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA A PARTIR DO  
ENTENDIMENTO DA INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS NA  
MISTURA**

**Abrahão Bernardo Rohden**

Porto Alegre  
2015

ABRAHÃO BERNARDO ROHDEN

**CONTRIBUIÇÃO AOS MÉTODOS DE DOSAGEM DE  
CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA A PARTIR DO  
ENTENDIMENTO DA INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS NA  
MISTURA**

Tese de doutorado 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 Doutor em Engenharia.

Porto Alegre  
2015

**ABRAHÃO BERNARDO ROHDEN**

**CONTRIBUIÇÃO AOS MÉTODOS DE DOSAGEM DE  
CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA A PARTIR DO  
ENTENDIMENTO DA INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS NA  
MISTURA**

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, Área de Construção Civil, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 16 de Julho de 2015

---

Prof. Denise Carpena Coitinho Dal Molin  
Dra. pela USP  
orientadora

---

Prof. Carlos Torres Formoso  
Ph.D. pela University of Salford  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Ângela Borges Masuero (UFRGS)**  
Dra. pelo. PPGEM/UFRGS

**Prof. Jairo José de Oliveira Andrade**  
Dr. pelo PPGEC/NORIE/UFRGS

**Prof. Berenice Martins Toralles-Carbonari**  
Dra. Universitat Politècnica de Catalunya

### CIP - Catalogação na Publicação

Rohden, Abrahão Bernardo

CONTRIBUIÇÃO AOS MÉTODOS DE DOSAGEM DE CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA A PARTIR DO ENTENDIMENTO DA INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS NA MISTURA / Abrahão Bernardo Rohden. -- 2015.

177 f.

Orientadora: Denise Carpena Coitinho Dal Molin.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2015.

1. concreto de alta resistência. 2. agregado graúdo. 3. resistência do agregado. 4. dimensão máxima característica. 5. compacidade ótima. I. Dal Molin, Denise Carpena Coitinho, orient. II. Título.

Dedico este trabalho à uma pessoa:  
que teve paciência,  
quando eu só tinha dúvidas;  
que teve dúvidas,  
quando eu só tinha certeza;  
que teve respostas,  
quando eu só tinha perguntas;  
que me fez perguntas,  
que eu não sabia as respostas;  
que teve idéias,  
quando elas me faltaram.

Pelo apoio, pela orientação e principalmente pelo exemplo, muito obrigado  
Professora Denise.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Professora Denise Carpena Coitinho Dal Molin pela orientação deste trabalho.

Agradeço à todos os colegas que ao longo dos últimos seis inesquecíveis anos compartilharam comigo a gratificante experiência de fazer pesquisa no NORIE.

Agradeço também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pela bolsa de estudos que possibilitou a minha dedicação aos meus estudos para proposição desta Tese.

“Só existem dois dias no ano que nada pode ser feito. Um se chama ontem e o outro se chama amanhã, portanto hoje é o dia certo para amar, acreditar, fazer e principalmente viver” –

*Dalai Lama*

## RESUMO

ROHDEN, A. B. Contribuição aos métodos de dosagem de concreto de alta resistência a partir do entendimento da influência dos agregados na mistura. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

O concreto de alta resistência não é mais o concreto do futuro. Com a publicação da revisão da norma de estruturas de concreto armado de 2014, os tecnologistas do concreto são desafiados à utilizar o material de maneira cada vez mais competitiva. O custo sempre foi um grande entrave do emprego deste material, devido principalmente ao maior consumo de aglomerante, do uso de adições e aditivos. Trabalhos foram desenvolvidos nos últimos anos no Brasil buscando identificar quais dos métodos internacionalmente utilizados eram mais adequados aos materiais aqui disponíveis. Neste sentido o presente trabalho teve por objetivo contribuir com algumas lacunas existentes nos métodos de dosagem utilizados para o proporcionamento do concreto de alta resistência no estado fresco e no estado endurecido. A primeira contribuição foi no entendimento de como as propriedades mecânicas da rocha efetivamente influenciam a resistência à compressão do concreto. Foram estudados, separadamente, as fases pasta, argamassa e o agregado de diferentes concretos, caracterizando-se a resistência à compressão e o módulo de elasticidade de cada parte, estabelecendo uma relação de efeito causa entre as propriedades determinadas. A segunda contribuição foi a proposição de uma metodologia para avaliar a resistência à compressão das diferentes dimensões de partículas uma vez que a dimensão máxima característica é um importante limitador da resistência à compressão do concreto. A avaliação da resistência à compressão das diferentes frações do agregado foi realizada através da imersão do agregado numa matriz de elevada resistência. A terceira contribuição refere-se ao concreto no estado fresco e constituiu-se na discussão da eficácia da aplicação do empacotamento máximo do agregado como critério de dosagem dos concretos de alta resistência, bem como na proposição de um parâmetro alternativo a este. Foram realizados dois estudos em laboratório. Primeiramente avaliou-se a influência do empacotamento frente a demanda de água para diferentes misturas. A partir deste estudo fez-se então a proposição de um parâmetro alternativo para definição do esqueleto granular. Realizou-se então um comparativo do mesmo com um método que utiliza a compacidade máxima do esqueleto granular como parâmetro de dosagem. Comparou-se então a eficiência das diferentes abordagens através do indicador consumo de aglomerante por MPa para dois níveis de resistência à compressão. Realizou-se a caracterização reológica das diferentes pastas utilizadas na produção dos traços de concreto dosados no estudo. Como resultados finais destaca-se que a resistência à compressão do concreto de alta resistência é limitada pela diferença entre os módulos de elasticidade da fase argamassa e da fase rocha e diferentemente do que indicavam outros estudos a resistência potencial do agregado não se converte em incrementos de resistência no concreto. Demonstrou-se experimentalmente que, diferente dos concretos convencionais produzidos com pastas pouco viscosas, para as pastas de elevada viscosidade utilizadas na produção de concreto de alta resistência o empacotamento máximo não se constitui como a alternativa mais eficaz de determinação do esqueleto granular em termos de custo.

*Palavras-chave: concreto de alta resistência; agregado graúdo; resistência do agregado; dimensão máxima característica; compacidade ótima.*



## ABSTRACT

ROHDEN, A. B. Contribution to high strength concrete mix proportion methods based on the understanding of the aggregates influence on the mixture. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The high strength concrete is no longer considered the concrete of the future. Since the revision of the Brazilian Standard for Reinforced Concrete Structures, in 2014, concrete technologists are challenged to use such material in an increasingly competitive way. The cost has always been an obstacle for concrete, mainly due to the higher binder consumption and to the use of additions and admixtures. In the recent years, researches were developed aiming to identify which of the internationally consolidated mix proportion method better suits to the materials available in Brazil. The main objective of the present work is to contribute to solve some gaps regarding mix proportion for high strength concrete in fresh and hardened states. The first contribution refers to the understanding about how the mechanical properties of the coarse aggregate can influence, effectively, the compressive strength of concrete. Binder paste, mortar and aggregate phases of different concretes were studied, separately. Compressive strength and elasticity modulus of each phase were characterized, aiming to establish a cause-effect relationship between such properties. The second contribution was the proposition of a methodology to evaluate the compressive strength for the different aggregate particle sizes, since the maximum particle size is an important limiting for the compressive strength of concrete. The compressive strength of the different aggregate fractions was evaluated by the immersion of the aggregate in a high strength matrix. The third contribution refers to the fresh state of concrete and consisted in a discussion about the effectiveness of the maximum aggregate packing criteria used in mix proportion for high strength concrete, as well as the proposition of an alternative parameter to this one. Two experimental programs were developed. In the first one, the influence of packing due to water demand was evaluated and an alternative parameter to the definition of the granular skeleton was proposed. Then, a comparative study was performed, with a method that considers the compactness of the granular skeleton as one of the mix proportion parameter. The efficiency of these different approaches was compared by considering the binder consumption per MPa for two levels of compressive strength. The rheological characterization of the different binder pastes used to produce the concrete mixtures was performed. Results show that the compressive strength of high strength concrete is limited by the difference between the elasticity modulus of the coarse aggregate and mortar phases. Unlike other studies, it was verified that the potential compressive strength of the aggregate does not increase the compressive strength of concrete. Experimental results showed that unlike conventional concrete, produced with low viscosity pastes, for high viscosity pastes used in the production of high strength concrete, the maximum packing is not the most effective alternative for determining the granular skeleton.

*Keywords: high strength concrete; stress of the aggregate; maximum characteristic dimension; great compactness.*

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>12</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>14</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>16</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>18</b>
1.1 OBJETIVO PRINCIPAL .....	20
1.2 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS.....	21
1.3 ESTRUTURA DA TESE.....	21
1.4 DELIMITAÇÕES.....	22
<b>2 AGREGADOS PARA CONCRETO.....</b>	<b>23</b>
2.1 EMPACOTAMENTO DO ESQUELETO GRANULAR.....	23
2.2 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS.....	25
2.3 DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA DO AGREGADO GRAÚDO.....	31
2.4 FORMA DOS GRÃOS DO AGREGADO GRAÚDO .....	34
2.5 RESISTÊNCIA DO AGREGADO .....	38
2.6 TEXTURA SUPERFICIAL DO AGREGADO GRAÚDO .....	43
2.7 MINERALOGIA DO AGREGADO GRAÚDO .....	44
2.8 TEOR DE AGREGADO GRAÚDO.....	45
<b>3 MÉTODOS DE DOSAGEM PARA CAR .....</b>	<b>48</b>
3.1 MÉTODO TORALLES-CARBONARI (1996).....	48
3.1.1 DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO – ESTUDO DA PASTA .....	49
3.1.2 DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO ADIÇÃO MINERAL/CIMENTO – ESTUDO DA PASTA.....	50
3.1.3 DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO SUPERPLASTIFICANTE/CIMENTO – ESTUDO DA PASTA .....	50
3.1.4 ESTUDO DO ESQUELETO GRANULAR.....	51
3.1.5 DETERMINAÇÃO DA COMBINAÇÃO ENTRE PASTA E ESQUELETO GRANULAR.....	53
3.1.6 FLUXOGRAMA DO MÉTODO DE DOSAGEM PROPOSTO.....	53
3.1.7 COMENTÁRIOS SOBRE O MÉTODO.....	54
3.2 MÉTODO DE FRANÇOIS DE LARRARD (1999).....	55
3.2.1 COMENTÁRIOS SOBRE O MÉTODO.....	60
3.3 MÉTODO DE AÏTCIN (2000).....	60
3.3.1 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	61
3.3.2 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ÁGUA .....	62
3.3.3 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE SUPERPLASTIFICANTE .....	63
3.3.4 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE AGREGADO GRAÚDO .....	63
3.3.5 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE AR .....	64
3.3.6 FLUXOGRAMA DO MÉTODO DE DOSAGEM PROPOSTO.....	64
3.3.7 COMENTÁRIOS SOBRE O MÉTODO.....	65
3.4 COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE DOSAGEM – ESTUDOS EXPERIMENTAIS .....	66
3.5 CONCEITOS RELACIONADOS À REOLOGIA DE PASTAS DE CIMENTO PORTLAND .....	70
<b>4 PROGRAMA EXPERIMENTAL E RESULTADOS .....</b>	<b>75</b>
4.1 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	77
4.1.1 MATERIAIS LIGANTES .....	77
4.1.1.1 CIMENTO.....	77
4.1.1.2 SÍLICA ATIVA.....	78
4.1.2 AGREGADOS.....	79
4.1.2.1 AREIA MOÍDA .....	79
4.1.2.2 AGREGADO MIÚDO.....	80
4.1.2.3 AGREGADO GRAÚDO .....	83
4.1.2.3.1 MASSA ESPECÍFICA .....	83
4.1.2.3.2 ÍNDICE DE FORMA.....	84
4.1.2.3.3 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA .....	84
4.1.2.3.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DA ROCHA.....	85
4.1.3 ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE.....	86
4.1.3.1 DEMANDA DE ÁGUA .....	86
4.1.3.2 CONE MARSH.....	87
4.2 ESTUDO 1 - INFLUÊNCIA DO <i>E</i> DA ROCHA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO.....	91
4.2.1 ESTUDO 1 – METODOLOGIA .....	91
4.2.1.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	95

4.2.1.2	MÓDULO DE ELASTICIDADE .....	95
4.2.2	RESULTADOS DO ESTUDO 1 .....	95
4.2.2.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO.....	99
4.2.2.2	MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO.....	102
4.3	ESTUDO 2 – DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA VERSUS RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	105
4.3.1	ESTUDO 2 – METODOLOGIA .....	105
4.3.1.1	MATRIZ PADRÃO .....	106
4.3.1.2	PARTÍCULAS.....	108
4.3.1.3	MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA .....	112
4.3.2	RESULTADOS DO ESTUDO 2 .....	115
4.4	ESTUDO 3 – COMPACIDADE MÁXIMA VERSUS DEMANDA DE ÁGUA .....	117
4.4.1	ESTUDO 3 – METODOLOGIA .....	117
4.4.2	RESULTADOS DO ESTUDO 3 .....	120
4.5	ESTUDO 4 – MÁXIMA ESPESSURA DE ARGAMASSA VERSUS EMPACOTAMENTO MÁXIMO .....	129
4.5.1	ESTUDO 4 – METODOLOGIA .....	129
4.5.1.1	DOSAGEM COM EMA VARIÁVEL.....	130
4.5.1.2	DOSAGEM COMPARATIVA PELO MÉTODO TORALLES-CARBONARI .....	132
4.5.1.3	ENSAIOS REALIZADOS .....	138
4.5.1.3.1	ABATIMENTO .....	138
4.5.1.3.2	CONSISTÊNCIA PELO ESPALHAMENTO NA MESA DE GRAFF.....	138
4.5.1.3.3	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	139
4.5.1.3.4	MÓDULO DE ELASTICIDADE .....	140
4.5.1.3.5	REOLOGIA DAS PASTAS .....	140
4.5.2	RESULTADOS ESTUDO 4 .....	143
4.5.2.1	ABATIMENTO .....	143
4.5.2.2	DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA PELO ESPALHAMENTO NA MESA DE GRAFF.....	147
4.5.2.3	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	149
4.5.2.4	REOLOGIA DAS PASTAS .....	155
4.5.2.5	MÓDULO DE ELASTICIDADE .....	162
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>165</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>167</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Empacotamento de partículas.....	24
Figura 2 – Compacidade real do agregado (a); volume de agregado por m <sup>3</sup> de concreto (b). ....	33
Figura 3 – Graus de esfericidade e arredondamento. ....	36
Figura 4 - Agregado com índice de forma (a) 4,0 e (b) 1,8.....	38
Figura 5 – Teor de agregado graúdo. ....	47
Figura 6 – Limite inferior e superior para determinação da relação água/cimento.....	50
Figura 7 – Comparação entre a consistência do concreto pelo cone de Abrams e cone de Marsh. ....	51
Figura 8 – Compacidade esqueleto granular. ....	52
Figura 9 – Curvas idealizadas do conteúdo de pasta frente à trabalhabilidade e à resistência.....	53
Figura 10 – Etapas do método de dosagem para concreto de alta resistência. ....	54
Figura 11 – Relações propostas entre a relação água/aglomerante e a resistência à compressão. ....	61
Figura 12 – Determinação da dosagem mínima de água.....	62
Figura 13 – Teor de agregado graúdo. ....	63
Figura 14 – Fluxograma do método de dosagem. ....	64
Figura 15 – Comparativo entre a Figura 11 e dados experimentais de outros trabalhos brasileiros. ....	66
Figura 16 – Consumo de cimento por faixa de resistência à compressão. ....	67
Figura 17 – Custo do metro cúbico de concreto por faixas de resistência. ....	68
Figura 18 – Consumo de cimento e sílica ativa para cada nível de resistência à compressão. ....	69
Figura 19 – Custo final (R\$/m <sup>3</sup> ) em função da resistência à compressão. ....	70
Figura 20 – Aplicação de tensão de cisalhamento em um fluido confinado. ....	72
Figura 21 – Modelos de comportamento reológico.....	72
Figura 22 – Etapas do trabalho experimental. ....	75
Figura 23 – Curva granulométrica do cimento Portland de alta resistência inicial utilizado. ....	78
Figura 24 – Curva granulométrica da sílica ativa utilizada. ....	79
Figura 25 – Curva granulométrica da sílica moída utilizada.....	80
Figura 26 – Curva granulométrica dos agregados miúdos utilizados.....	82
Figura 27 – Distribuição granulométrica.....	85
Figura 28 – Determinação gráfica do ponto de saturação do aditivo sp para relação a/a 0,20. ....	88
Figura 29 – Determinação gráfica do ponto de saturação do aditivo sp para relação a/a 0,25. ....	89
Figura 30 – Determinação gráfica do ponto de saturação do aditivo sp para relação a/a 0,30. ....	89
Figura 31 – Determinação gráfica do ponto de saturação do aditivo sp para relação a/a 0,35. ....	90
Figura 32 – Determinação gráfica do ponto de saturação do aditivo sp para relação a/a 0,40. ....	90
Figura 33 – Li e sp para determinação da relação a/a em função do teor de superplastificante.....	91
Figura 34 – Efeito da resistência da rocha na resistência do concreto para diferentes a/a. ....	92
Figura 35 – Resistência à compressão potencial da pasta e da argamassa para diferentes a/a.....	97
Figura 36 – Módulo de elasticidade da pasta e da argamassa para diferentes relações a/a.....	98
Figura 37 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade das rochas. ....	98
Figura 38 – Diferença de <i>E</i> da fase agregado e argamassa e a <i>f<sub>c</sub></i> concretos com relação a/a 0,17. ....	100
Figura 39 – Diferença de <i>E</i> da fase agregado e argamassa e a <i>f<sub>c</sub></i> concretos com relação a/a 0,21. ....	100
Figura 40 – Diferença de <i>E</i> da fase agregado e argamassa e a <i>f<sub>c</sub></i> concretos com relação a/a 0,25. ....	101
Figura 41 – Diferença de <i>E</i> da fase agregado e argamassa e a <i>f<sub>c</sub></i> concretos com relação a/a 0,30. ....	101
Figura 42 – Diferença de <i>E</i> da fase agregado e argamassa e a <i>f<sub>c</sub></i> concretos com relação a/a 0,50. ....	102
Figura 43 – Influência do <i>E</i> do agregado graúdo B220 no módulo de elasticidade do concreto. ....	103
Figura 44 – Influência do <i>E</i> do agregado graúdo B150 no módulo de elasticidade do concreto. ....	103
Figura 45 – Influência do <i>E</i> do agregado graúdo B130 no módulo de elasticidade do concreto. ....	104
Figura 46 – <i>F<sub>c</sub></i> com diferentes a/a e diferentes dmc produzidos com agregado de 220 MPa. ....	106
Figura 47 – Frações granulométricas utilizadas no experimento (a) 25 mm; (b) 12,5 mm; (c) 6,3. ....	109
Figura 48 – Massa unitária determinada para os diferentes protocolos de lançamento. ....	110
Figura 49 – Influência do índice de forma das partículas na massa unitária das partículas. ....	111
Figura 50 – Volume de vazios do esqueleto granular para diferentes protocolos de ensaio.....	111
Figura 51 – Sequência de moldagem dos corpos de prova. ....	113
Figura 52 – Cortes mostrando a distribuição homogênea da matriz e do agregado. ....	114

Figura 53 – Corpos de prova retificados antes do ensaio.....	115
Figura 54 – Resistência à compressão de partículas com diferentes dimensões.....	117
Figura 55 – Volume de vazios do esqueleto granular (Adaptado de Metha & Monteiro (2008)).....	118
Figura 56 – Volume de vazios para diferentes composições de areia média e brita 1.....	121
Figura 57 – Curva granular resultante das diferentes composições de brita 1 e areia média.....	122
Figura 58 – Consumo de água para diferentes composições de areia média e brita 1.....	122
Figura 59 – Resistência à compressão em função da relação água/aglomerante.....	123
Figura 60 – Determinação da composição de brita 1 e areia média com menor volume de vazios....	124
Figura 61 – Composição de brita 1 e areia média que demandou menor consumo de água.....	125
Figura 62 – Influência da demanda de água na $f_c$ para diferentes proporções de areia média/brita 1.	125
Figura 63 – Área superficial do esqueleto granular.....	126
Figura 64 – Máxima espessura de pasta existente entre as partículas.....	126
Figura 65 – Viscosidade da pasta dos concretos estudados para taxa de cisalhamento.....	128
Figura 66 – Viscosidade da pasta para taxa de cisalhamento.....	128
Figura 67 – Determinação da compacidade ótima entre a brita 1 e brita zero.....	133
Figura 68 – Determinação da compacidade ótima entre M1 e areia grossa.....	134
Figura 69 – Determinação da compacidade ótima entre M2 e areia média.....	135
Figura 70 – Determinação da compacidade ótima entre M3 e areia fina.....	136
Figura 71 – Representação esquemática do carregamento para a determinação do $E$ do concreto.....	140
Figura 72 – Reometro Brookfield R/S Plus com geometria do tipo cilíndricos coaxiais.....	141
Figura 73 – Rampa utilizada na caracterização reométrica.....	141
Figura 74 – Perfil reológico com as características reológicas determinadas.....	142
Figura 75 – Abatimento em função do teor de excesso de pasta traço 12.....	144
Figura 76 – Abatimento em função do teor de excesso de pasta traço 11.....	144
Figura 77 – Consumo de água em função da espessura média de argamassa.....	146
Figura 78 – Fluidez em função da espessura média de argamassa.....	148
Figura 79 – Fluidez em função do teor de excesso de pasta para os concretos dosados.....	149
Figura 80 – Corpo de prova do traço de CAD com EMA 1,65 mm no momento da ruptura.....	150
Figura 81 – Corpo de prova do traço de CAD com EMA 1,01 mm no momento da ruptura.....	150
Figura 82 – Resistência à compressão versus consumo de aglomerante.....	153
Figura 83 – Curvas granulométricas utilizadas nos diferentes traços de concreto.....	154
Figura 84 – Tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento da pasta do Traço 1.....	156
Figura 85 – Tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento da pasta do Traço 2.....	156
Figura 86 – Tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento da pasta do Traço 3.....	156
Figura 87 – Tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento da pasta do Traço 4.....	157
Figura 88 – Tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento da pasta do Traço 5.....	157
Figura 89 – Tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento da pasta do Traço 15.....	157
Figura 90 – Tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento da pasta do Traço 6.....	158
Figura 91 – Tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento da pasta do Traço 7.....	158
Figura 92 – Tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento da pasta do Traço 8.....	158
Figura 93 – Tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento da pasta do Traço 9.....	159
Figura 94 – Tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento da pasta do Traço 10.....	159
Figura 95 – Tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento da pasta do Traço 11.....	159
Figura 96 – Viscosidade das pastas em função do consumo de água por metro cúbico de concreto..	160
Figura 97 – Tensão de cisalhamento inicial das pastas em função da água.....	161
Figura 98 – Área de histerese das pastas em função da água por metro cúbico de concreto.....	162
Figura 99 – Módulo de elasticidade em função da resistência dos concretos dosados.....	164

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resistências encontradas para diferentes rochas. ....	42
Tabela 2 – Classificação da textura superficial dos agregados. ....	43
Tabela 3 – Propriedades do concreto afetadas pelas propriedades do agregado. ....	45
Tabela 4 – Formulação básica utilizada na determinação da viscosidade. ....	71
Tabela 5 – Influência do aumento dos constituintes da mistura sobre a trabalhabilidade. ....	74
Tabela 6 – Características químicas do cimento Portland CP V ARI empregado. ....	77
Tabela 7 – Características físicas e mecânicas do cimento Portland CP V ARI empregado. ....	77
Tabela 8 – Composição granulométrica resumida do CPV ARI. ....	78
Tabela 9 – Composição granulométrica resumida da sílica ativa. ....	79
Tabela 10 – Composição granulométrica resumida da sílica moída. ....	80
Tabela 11 – Caracterização física da areia fina. ....	81
Tabela 12 – Caracterização física da areia média. ....	81
Tabela 13 – Caracterização física da areia grossa. ....	82
Tabela 14 – Caracterização física do agregado graúdo. ....	83
Tabela 15 – Caracterização física do agregado graúdo brita zero. ....	84
Tabela 16 – Caracterização física do agregado graúdo brita 1. ....	85
Tabela 17 – Resistência à compressão da rocha utilizada como agregado graúdo. ....	86
Tabela 18 – Fração total de material aglomerante e relação agregado miúdo. ....	94
Tabela 19 – Traços das pastas em kg utilizados no estudo. ....	94
Tabela 20 – Traços de argamassa em kg utilizados no estudo. ....	94
Tabela 21 – Resistência à compressão da pasta para diferentes relações água/aglomerante. ....	96
Tabela 22 – Resistência à compressão da argamassa para diferentes relações água/aglomerante. ....	96
Tabela 23 – Módulo de elasticidade das pastas para diferentes relações água/aglomerante. ....	97
Tabela 24 – Módulo de elasticidade das argamassas para diferentes relações água aglomerante. ....	97
Tabela 25 – Matriz utilizada no experimento – composição do concreto de pós reativos. ....	107
Tabela 26 – Índice de forma do agregado graúdo. ....	108
Tabela 27 – Materiais utilizados no ensaio de determinação da resistência à compressão. ....	112
Tabela 28 – Resistência à compressão da matriz. ....	115
Tabela 29 – Influência da dimensão do agregado na resistência à compressão do concreto. ....	116
Tabela 30 – Composições granulares estudadas. ....	119
Tabela 31 – variáveis fixas dos traços de concreto estudados. ....	120
Tabela 32 – Compacidade entre composições de brita 1 e areia média. ....	120
Tabela 33 – Consumo de água para diferentes esqueletos no proporcionamento de concreto. ....	122
Tabela 34 – Resistência à compressão dos diferentes traços de concreto aos 28 dias. ....	123
Tabela 35 – Traço de concreto de alta resistência. ....	131
Tabela 36 – Traço de concreto convencional. ....	131
Tabela 37 – Ensaio de compacidade entre a brita 1 e brita zero. ....	132
Tabela 38 – Ensaio de compacidade entre M1 e Areia Grossa. ....	133
Tabela 39 – Ensaio de compacidade entre a mistura M2 e a areia média. ....	134
Tabela 40 – Ensaio de compacidade entre a mistura M3 e areia fina. ....	135
Tabela 41 – Misturas experimentais para determinação do traço de concreto convencional. ....	137
Tabela 42 – Misturas experimentais para determinação do traço de concreto de alta resistência. ....	138
Tabela 43 – Misturas experimentais para caracterização reométrica das pastas utilizadas. ....	143
Tabela 44 – Abatimento em função do teor de excesso de pasta determinado experimentalmente. ....	143
Tabela 45 – Abatimento em função do teor de excesso de pasta determinado experimentalmente. ....	144
Tabela 46 – Consumo de água por m <sup>3</sup> para diferentes EMA para os traços de concreto de CAD. ....	145
Tabela 47 – Consumo de água por m <sup>3</sup> para diferentes EMA para os traços de CC. ....	145
Tabela 48 – Traços de concretos otimizados dosados com EMA e segundo Empacotamento máx. ...	146
Tabela 49 – Espalhamento na mesa de Graff para os CAR dosados variando-se a EMA. ....	147
Tabela 50 – Espalhamento na mesa de Graff para os CC dosados variando-se a EMA. ....	147
Tabela 51 – Espalhamento na mesa de Graff para os traços de CAR. ....	148
Tabela 52 – Espalhamento na mesa de Graff para os traços de CC. ....	148

Tabela 53 – Resistência à compressão dos CAR dosados com EMA variável. ....	149
Tabela 54 – Resistência à compressão dos concretos convencionais dosados com EMA variável. ...	151
Tabela 55 – Resistência à compressão dos CAR dosados pelo método Toralles-Carbonari (1996)...	151
Tabela 56 – Resistência à compressão dos CC dosados pelo método Toralles-Carbonari (1996).....	152
Tabela 57 – Eficácia do empacotamento e do parâmetro EMA no proporcionamento de CAR e CC.	153
Tabela 58 – Módulo de Elasticidade dos concretos de alta resistência dosados com EMA variável..	163
Tabela 59 – Módulo de Elasticidade dos concretos convencionais dosados com EMA variável. ....	163
Tabela 60 – Módulo de Elasticidade do CAR dosado pelo método Toralles-Carbonari (1996).....	163
Tabela 61 – Módulo de Elasticidade do CC dosado pelo método Toralles-Carbonari (1996).....	164

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIMS – *Aggregate Imaging System*.

$C$ : é o volume de aglomerante;

$CA$ : é o volume de agregado graúdo;

$D$ : é a dimensão máxima característica da mistura granular;

EMA – espessura média de argamassa.

$FA$ : é o volume de agregado miúdo;

$f_{cp}$ : é a resistência à compressão da pasta de cimento;

$f_{cm}$ : é a resistência à compressão da matriz;

$g$ : é o volume de agregado por unidade de volume de concreto;

$g^*$ : é a densidade de empacotamento dos agregados;

$g_{max}^*$ : é a máxima densidade de empacotamento dos agregados;

$MPT$ : é a máxima espessura de pasta;

$\psi_1$ : contribuição da pasta de cimento na viscosidade aparente;

$\psi_2$ : contribuição do agregado para a viscosidade aparente;

$\eta_a$ : viscosidade aparente do concreto fresco, usado como um índice de trabalhabilidade;

$R_{c28}$ : é a resistência à compressão padrão do cimento aos 28 dias;

$\varphi^{-1}(f_c)$ : função da relação água/cimento com a resistência à compressão do concreto;

$v_c$ : é o volume de cimento por unidade de volume de pasta no estado fresco;

$v_w$ : é o volume de água por unidade de volume de pasta no estado fresco;

$v_a$ : é o volume de ar aprisionado por volume de pasta no estado fresco;

$x$ : é a relação ótima entre agregado graúdo/miúdo (que leva a densidade de empacotamento ótima).

$W$ : é o volume de água da mistura;





## 1 INTRODUÇÃO

O tema concreto de alta resistência é estudado há muitos anos. O material surgiu na década de 1960 como o aprimoramento do que posteriormente veio a ser denominado concreto convencional. Aïtcin (2000) apresenta um levantamento histórico bastante completo do surgimento do concreto de alta resistência e faz uma reflexão bastante crítica do caráter temporal do termo “alta resistência”.

Desde o surgimento, o processo de desenvolvimento do concreto de alta resistência passou por muitas fases. Aïtcin (2000) relata que a década de 1960 ficou marcada pois, pela primeira vez, o concreto de alta resistência foi utilizado em quantidades significativas e em estruturas importantes. Na década seguinte, nos anos de 1970, o aprimoramento do concreto de alta resistência se deu pela utilização de aditivos superplastificantes, e a década de 1980 destacou-se pelo emprego de aditivos superplastificante como redutor de água em teores cada vez maiores e também se teve as primeiras utilizações da sílica ativa como material cimentício suplementar. A década de 1990 é marcada pelo domínio do concreto de alta resistência como um material de construção. Mehta e Aïtcin (1990) propõem um dos primeiros métodos de dosagem e posteriormente outros estudos importantes para a consolidação do concreto de alta resistência em muitos países como na Espanha (TORALLES-CARBONARI, 1996), na França (De LARRARD, 1999), no Canadá (AÏTCIN, 2000), e também no Brasil (DAL MOLIN, 1995) foram realizados.

O acúmulo de conhecimento sobre o concreto de alta resistência desenvolvido na década de 1990 mostrou que a presença dos aditivos superplastificantes e das adições minerais como a sílica ativa alteram as propriedades do concreto tanto no estado endurecido quanto no estado fresco e que estas mudanças de comportamento exigem procedimentos específicos de dosagem. Assim a dosagem do concreto de alta resistência deixou de ser vista como uma simples extrapolação dos métodos de dosagem de concreto convencional (TORALLES-CARBONARI, 1996).

O estudo dos parâmetros de dosagem que influenciam as características do concreto de alta resistência mostrou que este material é mais complexo que o concreto convencional. Os diversos estudos acerca dos parâmetros de dosagem ajudaram na identificação dos fatores que limitavam principalmente a resistência à compressão do concreto de alta resistência e assim na

década de 2000 surge como evolução do concreto de alta resistência aplicações do concreto de pós-reativo (VANDERLEI, 2004; FORMAGINI, 2005) também chamado de concreto de altíssimo desempenho. O concreto de pós-reativo foi obtido principalmente a partir do aumento da homogeneidade do concreto de alta resistência. Em termos de dosagem, os agregados graúdos são eliminados, e soma-se a isto o emprego de cura térmica para melhoria da microestrutura da pasta hidratada.

A presença do agregado graúdo no concreto convencional é responsável pelo aspecto determinante em fazer este material de construção ser o mais utilizado no mundo há décadas, o seu baixo custo financeiro e também ambiental (ROSSI e SALES, 2014). Para concreto geralmente proporcionam uma melhor estabilidade dimensional e resistência ao desgaste (AL-ORAIMI *et al.*, 2006; ACI COMMITTEE 221, 2001; PEREIRA *et al.*, 2009; SHEN, W. *et al.*, 2010; UYSAL, 2012). O agregado graúdo permite que o concreto seja feito com um volume menor de água e cimento, para um mesmo abatimento. No concreto convencional as propriedades mecânicas são determinadas basicamente pela relação água/cimento, quanto menor o consumo de água menor será o consumo de cimento e, por conseguinte, seu custo, para uma mesma resistência. A heterogeneidade que o agregado graúdo representa nas propriedades do concreto convencional no estado endurecido não é considerada um problema prático.

O consumo de água no concreto convencional está relacionado diretamente à dimensão máxima característica do agregado graúdo. O método de dosagem de concreto convencional proposto pela norma ACI 211.1 (1991) faz uma associação direta entre o consumo de água e a dimensão máxima do agregado graúdo. Existe uma relação direta entre o diâmetro e a área superficial dos corpos sólidos. Reduzindo-se o diâmetro de um corpo sólido à metade tem-se a sua área específica dobrada. Essa relação é validada para qualquer forma de corpo sólido, um cubo, uma esfera ou um elipsoide. Uma massa de 1000 kg de um agregado composto por partículas de diâmetro 19 mm apresenta a metade da área superficial dos mesmos 1000 kg de outro agregado, cuja forma seja semelhante, mas tenha diâmetro de 9,5 mm.

Por conseguinte, ao se eliminar o agregado graúdo do concreto, há um aumento bastante substancial da área superficial do esqueleto granular. Os concretos de pó reativo são elaborados com partículas cuja dimensão máxima é cerca de 2 mm (VANDERLEI, 2004). Sendo assim a área superficial específica destes esqueletos granulares é cerca de 20 vezes maior do que a área superficial específica de um esqueleto granular de concreto convencional com agregados de dimensão máxima característica de 19 mm.

Os traços típicos de concreto de pó reativo utilizam cerca de 200 litros de água por metro cúbico. Como a relação água/aglomerante é próxima de 0,20, o consumo de aglomerante encontrado nestes materiais é de cerca de 1000 kg/m<sup>3</sup>. O custo e o elevado consumo do aglomerante tornam o concreto de pós-reativo uma alternativa bastante dispendiosa e dificilmente é competitivo como material de construção. Sua viabilidade econômica carece de um projeto que explore ao máximo não só o desempenho mecânico, mas também os ganhos indiretos obtidos como, por exemplo, possibilidade de se construir estruturas mais leves e com uma vida útil muito mais elevada frente a agentes agressivos, como a água do mar.

Outro aspecto a ser destacado é a necessidade de o concreto pós-reativo receber cura térmica. Para elementos pré-fabricados, e pré-moldados, a aplicação de cura térmica é uma prática viável. Contudo, em estruturas moldadas *in loco* isto não é realidade. Haja vista as limitações técnicas e econômicas características implícitas aos concretos pós-reativos e o baixo custo do concreto convencional há um grande número de aplicações para o concreto de alta resistência, pois este pode se viabilizar como uma alternativa que alia o desempenho mecânico bastante superior ao concreto convencional e um custo de produção inferior ao concreto de pós-reativo. Conforme já foi citada, a década 1990 foi marcada pelo domínio do concreto de alta resistência, tendo sido desenvolvidos métodos de dosagem por diferentes pesquisadores. A diferença básica dos métodos de dosagem propostos para concretos de alta resistência dos métodos de dosagem de concreto convencional é a diminuição do volume de água empregado na mistura. Isso é feito se aproveitando a capacidade de redução de água do superplastificante.

Apesar da influência do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência ser conhecida e destacada em diversas pesquisas (OZTURAN e CENEN, 1997; POMPEU, 2004; ROHDEN, 2011) e tendo em vista ainda a influência da dimensão máxima do agregado graúdo na área específica do esqueleto granular, este conhecimento ainda não foi convertido numa estratégia de otimização passível de ser empregada num método de dosagem de concreto de alta resistência.

## 1.1 OBJETIVO PRINCIPAL

Esta pesquisa tem por objetivo principal contribuir com os métodos de dosagem de concretos de alta resistência através do estudo da influência dos princípios da resistência potencial do agregado graúdo, da dimensão máxima característica e do empacotamento máximo do agregado adotados nas propriedades do concreto de alta resistência.

## 1.2 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS

Dentre os objetivos secundários estão:

- Verificar a influência do módulo de elasticidade da fase agregado e da fase argamassa na resistência à compressão do concreto de alta resistência;
- Avaliar e propor uma metodologia para avaliação da resistência das partículas de agregado graúdo utilizados no concreto de alta resistência;
- Avaliar a eficácia da utilização do empacotamento máximo como parâmetro de dosagem para o proporcionamento de concretos de alta resistência;
- Propor um parâmetro alternativo ao empacotamento máximo como alternativa no estudo de dosagem de concretos de alta resistência, bem como realizar a comparação do parâmetro proposto com a teoria do empacotamento granular tendo em vista o consumo de aglomerante dos concretos produzidos.

## 1.3 ESTRUTURA DA TESE

No primeiro capítulo, foi realizada uma introdução ao tema da evolução do concreto de alta resistência desde o seu surgimento até os dias atuais. Destacou-se o surgimento de métodos de dosagem na década de noventa e das pesquisas posteriores realizadas sobre a influência das características dos agregados nas propriedades do concreto de alta resistência.

No capítulo 2, a revisão bibliográfica foi realizada a cerca das diferentes características do agregado graúdo e suas implicações na dosagem do concreto de alta resistência.

No capítulo 3, realizou-se uma revisão bibliográfica à cerca dos métodos de dosagem propostos por Toralles-Carbonari (1996), Aïctin (2000) e o método proposto por De Larrard (1999). Também são revisados trabalhos que realizaram comparações experimentais entre métodos de dosagem e realiza-se uma revisão sobre os fundamentos básicos de reologia tendo em vista sua aplicação ao estudo das pastas de concreto de alta resistência.

No capítulo 4 é apresentada a caracterização dos materiais empregados na pesquisa, bem como, a metodologia e os resultados dos quatro experimentos que compõem esta tese.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões da tese obtidas a partir do trabalho experimental desenvolvido na mesma.

## 1.4 DELIMITAÇÕES

No presente trabalho delimita-se ao estudo de concretos de alta resistência produzidos com agregados de origem basáltica hajavista que este é o litotipo predominante na região de Porto Alegre.

## 2 AGREGADOS PARA CONCRETO

Os agregados têm uma função essencial nas propriedades do concreto. Forma, granulometria, dimensão máxima característica, módulo de finura, resistência à compressão, textura superficial são propriedades dos agregados que interferem nas características do concreto tanto no estado fresco como no estado endurecido.

A norma NBR 7211 (ABNT, 2009) especifica os requisitos exigíveis para recepção e produção dos agregados miúdos e graúdos destinados à produção de concretos de cimento Portland. Na produção de concreto de alta resistência, além das especificações presentes na referida norma, alguns aspectos, destacados a seguir, são importantes no estudo do concreto de alta resistência.

### 2.1 EMPACOTAMENTO DO ESQUELETO GRANULAR

Segundo De Larrard (1999), 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.

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). Na Figura 1 são apresentadas algumas das configurações de pacote granular relatadas na bibliografia. Quando todas as partículas apresentam o mesmo tamanho, o volume intersticial mínimo, isto é, o volume de vazios, 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 *et al.*, 2004).

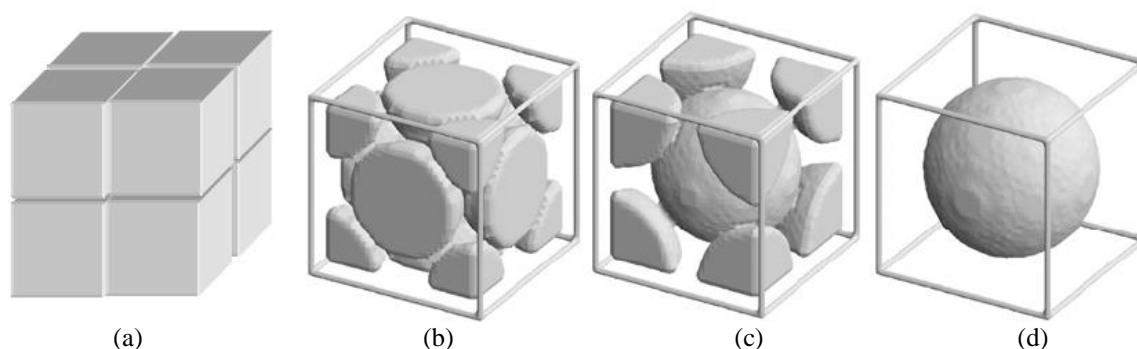


Figura 1 – Empacotamento de partículas (a) Cubos<sup>1</sup>, (b) Esferas CFC<sup>2</sup>, (c) Esferas CCC<sup>3</sup> e (d) Esferas CS<sup>4</sup> (Fonte: FORMAGINI, 2005).

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

<sup>1</sup> Estrutura Cubo

<sup>2</sup> Estrutura Cubo de Face Centrada – CFC

<sup>3</sup> Estrutura Cubo de Corpo Centrada – CCC

<sup>4</sup> Estrutura Cubo Simples - CS



unitária no estado compactado o recipiente é preenchido em três camadas adensadas através de golpes de soquete<sup>5</sup> (NEVILLE, 1997).

O Modelo de Empacotamento Compressivo (MEC), criado por De Larrard (1988) adota protocolos bem estabelecidos na determinação da compacidade. 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 1, conhecendo-se a sua massa específica aparente “ $s$ ”, e o índice de vazios, “ $v$ ”, (NEVILLE, 1997).

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

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

Uma maneira de se garantir a trabalhabilidade adequada para um traço de concreto é fornecendo água. Uma parte da água no concreto fresco é consumida para o preenchimento da porosidade do esqueleto granular, somente a outra parte poderá contribuir com a trabalhabilidade da mistura. Melhorando-se o empacotamento do esqueleto granular, menos água será utilizada para uma mesma trabalhabilidade ou uma melhor trabalhabilidade será obtida para um teor de água constante (CASTRO, 2007).

## 2.2 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS

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

---

<sup>5</sup> A relação entre as massas unitária solta e compactada geralmente se situa em torno de 0,87 e 0,96 (FORMAGINI, 2005).

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 para um concreto auto adensável (CAA), cujo peso próprio é responsável pelo seu adensamento, ou mesmo para um concreto com 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 alta resistência 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; AÏTCIN, 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).

A maximização da massa unitária, ou densidade granular, 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 *et al.*, 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 2.

$$PE_{max} = PE_L + (1 - PE_L) \times PE_m + (1 + PE_L) \times (1 - PE_M) \times PE_S \quad \text{Equação 2}$$

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 3.

$$PE_{max} = PE + (1 - PE) \times PE + (1 + PE)^2 \times PE \quad \text{Equação 3}$$

A Equação 4 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 *et al.*, 2004).

$$P = \frac{R^{\log D} - R^{\log D_s}}{R^{\log D_L} - R^{\log D_s}} \times 100 \quad \text{Equação 4}$$

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 é economicamente inviável. Andreassen e Andersen (1930)<sup>6</sup> apud Silva *et al.* (2004) entendiam 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 5.

$$P = \left(\frac{D}{D_L}\right)^q \times 100 \quad \text{Equação 5}$$

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 *et al.*, 2004). A Equação 6 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 (PACELLI DE ANDRADE, 1997), Equação 6, consideram, além do tamanho da maior partícula, a dimensão da menor fração.

$$P = \left(\frac{d^q - 4,8^q}{D^q - 4,8^q}\right) \times 100 \quad \text{Equação 6}$$

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.

---

<sup>6</sup> 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 7 (HUMMEL, 1966<sup>7</sup> apud TRISTÃO, 1995).

$$A = 100 \sqrt{\frac{d}{D}} \quad \text{Equação 7}$$

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

D – maior dimensão do agregado.

A curva de Faury também é utilizada recorrentemente em trabalhos (MELERO, 1998; SOUTO, 2010; MELO *et al.*, 2014). Esta curva de referência é constituída pela determinação de três coordenadas, formando assim dois segmentos de reta. Na dimensão mínima do agregado é atribuída uma percentagem de material passante de 0%, para a dimensão máxima de agregado é atribuído o valor passante de 100% e a percentagem correspondente à metade da dimensão máxima do agregado é determinada através da equação 8.

$$P_{D/2} = A + 17 \times \sqrt[5]{D} + \frac{B}{0,25} \quad \text{Equação 8}$$

Onde: - PD/2 é percentagem correspondente à metade da dimensão máxima do agregado.

- A é um parâmetro variável em função do tipo de agregado e da consistência desejada, para agregados graúdos britados e areia natural o valor é igual a 30 ou 34 para consistência “mole” ou “fluída” respectivamente, já para agregado graúdo e miúdo britados adota-se valores de 32 e 38 para consistência “mole” ou “fluída” respectivamente.
- B é um parâmetro relacionado a trabalhabilidade adotando-se o valor de 2 para concretos com abatimento de 40 a 200 mm.
- D é a dimensão máxima do agregado

A curva de Bolomey é semelhante a curva de Faury porem depende de menos parâmetros. Nesta a percentagem do volume absoluto da totalidade do material sólido, ou seja, agregados e

<sup>7</sup> HUMMEL, Alfred. *Prontuário del Hormigon – Hormigones normales, Hormigones ligeros*. 2º Edicion Española. Barcelona, Editores Técnicos Asociados, 1966. p. 51 -89.

cimento, é definida em relação a uma inferior à dimensão  $d$ . Esta curva poderá ser definida através de diversos valores de  $d$ , conforme apresentado na equação 9.

$$p = A + (100 - A) \times \sqrt{\frac{d}{D}} \quad \text{Equação 9}$$

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

$D$  – maior dimensão do agregado;

$A$  – é um parâmetro variável em função do tipo do agregado e da consistência do concreto, para agregados britados são sugeridos os valores de 12 a 14 para abatimento menor que 150 mm e os valores de 14 a 16 para abatimentos maiores que 150 mm.

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). 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.

## 2.3 DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA DO AGREGADO GRAÚDO

Em tecnologia do concreto 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 consumo de cimento, a relação água/aglomerante pode ser reduzida com um consequente aumento da resistência. No entanto, mantendo-se os demais fatores constantes, quanto maior o tamanho do agregado, mais alta será a relação água/aglomerante localizada 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 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 consumo 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 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 alta resistência o possível ganho de resistência associado ao aumento da dimensão máxima característica é contrabalanceado pela perda de resistência, devido a dois fatores: primeiro porque com o aumento da dimensão, a zona de transição torna-se maior e mais heterogênea; segundo, para 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 frequentemente 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 alta resistência (superior a 100 MPa) usando agregados maiores que 25 mm. Afirma ainda que neste nível de resistência é ideal trabalhar com dimensão máxima característica entre 10 e 12 mm. Para Neville (1997), no concreto de alta resistência 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 *et al.*, 2002).

A maior área superficial 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 10 define a máxima espessura de pasta (MPT).

$$MPT = \phi_{MAX} \left( \sqrt[3]{\frac{g^*}{g}} - 1 \right) \quad \text{Equação 10}$$

Onde: MPT – máxima espessura de pasta;



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

$g$  – volume de agregado (com dimensão maior que 80  $\mu\text{m}$ ) por metro cúbico de concreto;

$g^*$  - equivale à compacidade real dos agregados (com dimensão maior que 80  $\mu\text{m}$ ) empacotados com vibração de compressão de 10 kPa.

A figura 2 ilustra graficamente o conceito de máxima espessura de pasta.

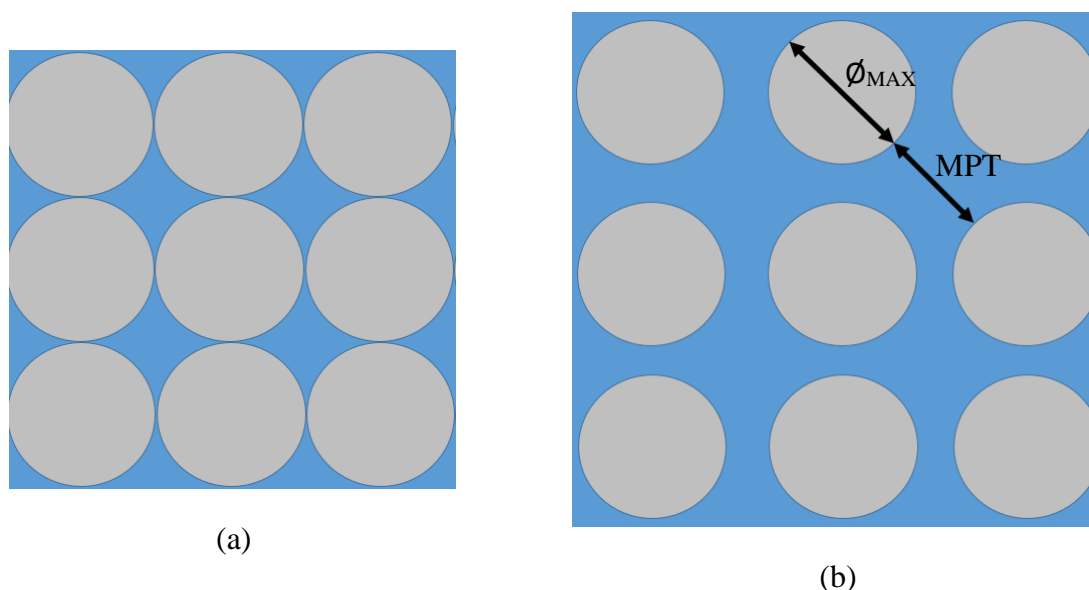


Figura 2 – Compacidade real do agregado (a); volume de agregado por  $\text{m}^3$  de concreto (b).

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.

O tamanho das partículas de um agregado apresenta uma considerável influência sobre a trabalhabilidade do concreto e no seu bombeamento (CHOI *et al.*, 2014). Uma descrição adequada do tamanho das partículas é dada por sua distribuição granulométrica, que mostra a proporção de partículas dentro das possíveis variações de tamanho. O efeito da classificação deve ser considerado em termos de área específica. Para uma dada partícula, a área específica é inversamente proporcional à sua dimensão máxima linear, de maneira que quanto mais finas

as partículas, maior a área específica para uma determinada massa. No concreto, isso significa que a área superficial a ser revestida e lubrificada pelas partículas mais finas e pela pasta de cimento será maior e, com isso, quanto mais finas as partículas do agregado miúdo, menos trabalhável será o concreto, considerando-se constantes as demais características e materiais (CASTRO, 2007).

Rohden (2011) realizou um estudo mensurando a influência da dimensão máxima característica do agregado graúdo e concluiu que a mesma 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. A menor probabilidade de haver 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, no caso de partículas esféricas, ela é diretamente proporcional ao diâmetro do agregado.

A influência da dimensão máxima característica é maior para concretos produzidos com relação água/aglomerante menor. Para os concretos produzidos com relação água/aglomerante de 0,5 a diferença de resistência é insignificante para os concretos com agregado de dimensão máxima 6,3 e 25 mm, enquanto para concretos produzidos com relação água/aglomerante 0,17 essa diferença é, em média, de 20 MPa para as diferentes rochas estudadas (ROHDEN, 2011).

## 2.4 FORMA DOS GRÃOS DO AGREGADO GRAÚDO

As rochas frequentemente se constituem de vários minerais diferentes que juntos formam um tipo de rocha. Os minerais são formados por cristais com uma dada estrutura e resistência. O tamanho do cristal pode variar, dependendo de como a rocha tenha sido formada. Quando a rocha é britada, geralmente quebra nas interfaces entre os cristais. Estes pontos são onde a coesão é mais fraca. Uma rocha resistente e homogênea pode ser difícil de ser cominuída de forma cúbica. Elas tendem a desintegrar em lamelas como os materiais de grãos finos densos (diabásio, basalto e quartzo). Se a resistência do material é consideravelmente menor em uma direção que nas demais, ele naturalmente quebrará em lâminas (BERN, 1997).

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, influencia 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 forma dos agregados na trabalhabilidade do concreto de alta resistência. 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 discoides<sup>8</sup> 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 um aumento da trabalhabilidade.

O arredondamento e a esfericidade representam a forma do grão. O método de ensaio proposto na NBR 7389 (ABNT, 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 que o arredondamento se relaciona com a perda de vértices e arestas, ou seja, o grau de curvatura dos cantos (TRISTÃO, 2005).

---

<sup>8</sup> Que tem forma de um disco

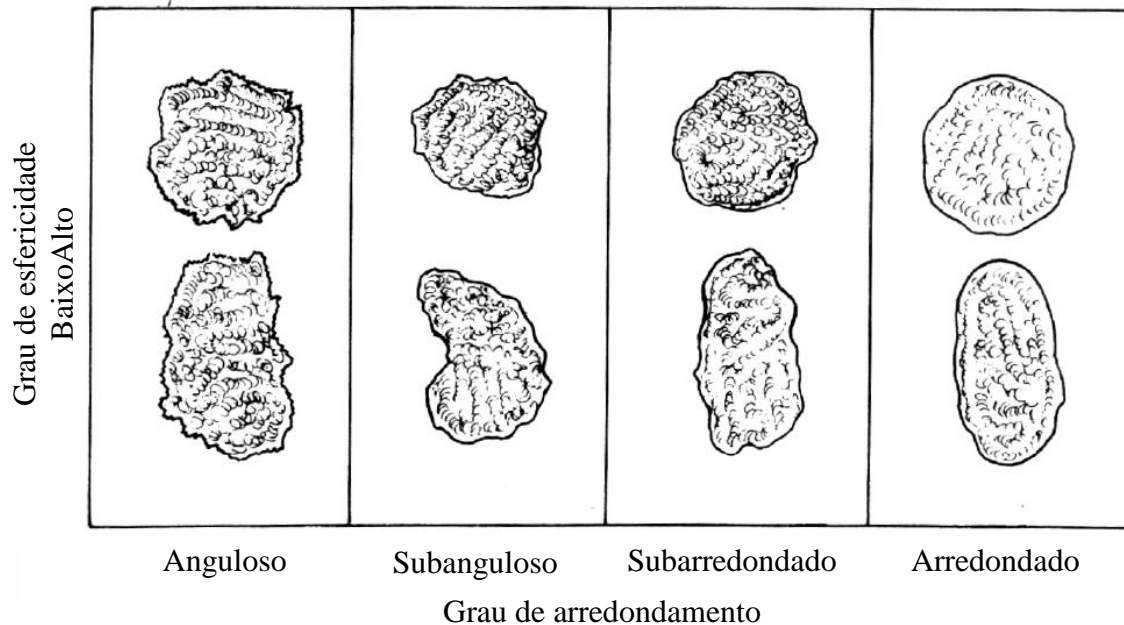


Figura 3 – Graus de esfericidade e arredondamento (Fonte ABNT NBR 7389, 2009).

Por outro lado, a norma NBR 7211 (ABNT, 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 NBR 7809 (ABNT, 2006). 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.

Existem outras formas de se caracterizar a forma do agregado. Costa *et al.* (2014) utilizaram o sistema AIMS (*Aggregate Imaging System*) que consiste num sistema de obtenção e processamento de imagens que tem como objetivo principal a caracterização direta de agregados graúdos e também miúdos com respeito as propriedades de forma, angulosidade e textura.

O concreto geralmente é idealizado por um modelo de esferas. Nele todos os componentes sólidos se aproximam de esferas envolvidas por camadas de pasta. Dessa maneira, a trabalhabilidade dessas misturas depende da mobilidade de todas as partículas sólidas, assim como do teor de água. Considerando a distribuição granulométrica das partículas finas e a granulometria dos agregados, o índice de forma tem uma influência sobre a mobilidade dos sólidos (HANKE, 1991).

De uma maneira geral diz-se que quanto mais esféricas forem as partículas de um agregado, mais trabalhável será a mistura na qual esse agregado é incorporado, considerando-se constante as demais características e materiais. Esse efeito deve-se a duas propriedades da esfera, a primeira é o efeito de rolamento e a segunda é a área superficial. O chamado efeito de rolamento evidencia a facilidade com que esferas acumuladas realizam movimentos relativos umas às outras quando comparadas às partículas de formas irregulares, até mesmo no estado seco. Quanto à área superficial, a esfera é a forma geométrica que possui a menor área superficial, considerando-se a mesma massa. Assim, quanto mais esférica forem as partículas de um agregado, menos argamassa será necessária para revesti-las e preencher os vazios entre elas, de maneira que mais argamassa ficará disponível para contribuir com a fluidez da mistura (CASTRO, 2007).

Arndt *et al.* (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/m<sup>3</sup> 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.



Figura 4 - Agregado com índice de forma (a) 4,0 e (b) 1,8 (ARNDT *et al.*, 2007).

## 2.5 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 alta resistência, são raros os casos em que o agregado possui resistência mecânica menor do que a da pasta ou da 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. Rohden (2011) avaliou a influência da resistência da rocha na resistência à compressão de concretos convencionais e concluiu que a resistência do agregado isoladamente não representa uma alteração significativa. Contudo, no concreto de alta resistência, 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 convencional, 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 (AÏTCIN, 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 graúdo 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 diabásio<sup>9</sup>), têm sido usadas como agregado graúdo nas aplicações de concreto de alta resistência (AİTCIN, 2000).

Mehta e Aİtcin (1990) afirmam 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 cujas resistências à compressão eram 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 referidos autores, o agregado graúdo desempenha um papel importante na resistência.

Contrariando o que concluíram outros autores como Ke-Ru-Wu *at al* (2001), os resultados experimentais obtidos por Rohden (2011) 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 com a resistência do concreto produzido, respeitando-se a premissa de que o agregado sempre apresenta resistência superior à resistência do concreto produzido.

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

---

<sup>9</sup> Sienito, diorito, gabro e diabásio são conhecidos de maneira coloquial como basaltos

pequenos, que possam ser quebradas em pedaços contendo 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 (METHA e AİTCIN, 1990).

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 com a 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/dm<sup>3</sup>, 2,54 kg/dm<sup>3</sup>, 2,70 kg/dm<sup>3</sup> e 3,51 kg/dm<sup>3</sup>, 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 alta resistência. Para isso foram dosados concretos com relação água/cimento de 0,35 e consumo de cimento de 450 kg/m<sup>3</sup>, 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, quanto do módulo de elasticidade e da resistência à compressão com o aumento da densidade do agregado. Baseado nesta observação, os autores concluíram que o tipo de agregado tem um efeito significativo sobre as propriedades mecânicas. Contudo, no referido texto não há detalhes sobre quais critérios 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 igual ou 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.

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).

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

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 (MEHTA e AÏTCIN, 1990).

## 2.6 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).

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).

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, gnaisse
Alveolar	Com poros e cavidades visíveis	Pedra pomes, clínquer, argila expandida

## 2.7 MINERALOGIA DO AGREGADO GRAÚDO

A mineralogia dos agregados desempenha um papel importante na resistência à compressão principalmente no concreto de alta resistência (Al-ORAIMI *et al.*, 2006; MEDDAH *et al.*, 2010; TORRIJOS *et al.*, 2013; BEUSHAUSEN e DITTMER, 2015; ZHANGA e ZHANG, 2015). 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. Os resultados apresentados por Zhang *et al.* (2012) também corroboram esta afirmação.

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. 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).

Pompeu (2004) relaciona as propriedades do concreto afetadas pelas propriedades do agregado, como mostrado na Tabela 3.

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, 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 alta resistência.

Por outro lado, no estudo de Pacelli 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 alta resistência.

Tabela 3 – Propriedades do concreto afetadas pelas propriedades do agregado (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

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 mesóstases e a distribuição dos grãos minerais na mesóstase. Até mesmo propriedades como a resistência a abrasão do concreto (KILIÇ *et al.*, 2008) e a blindagem a raios gama são influenciadas pela natureza mineralógica do agregado graúdo (OUDA, 2015; ABO-EL-ENEIN, *et al.*, 2014).

## 2.8 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 alta resistência 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.

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 *et al.* (2007), onde o proporcionamento com relação água/aglomerante constantes e relações cimento/agregado de 1:3 e 1:5 foram testadas. 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.

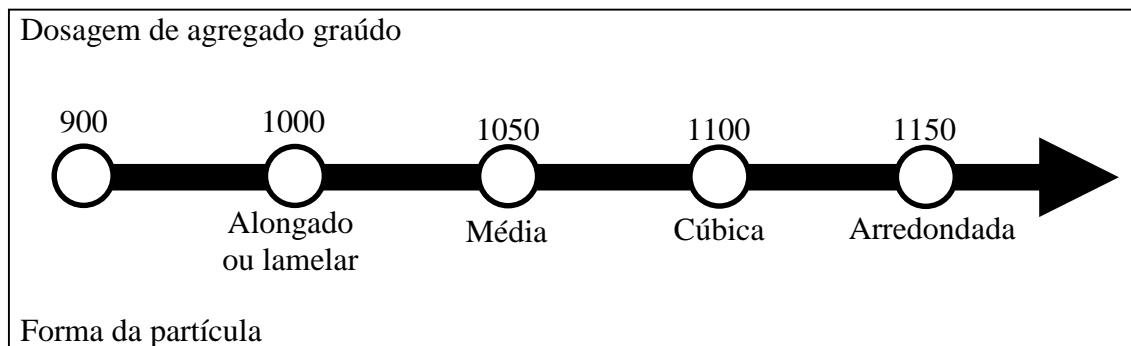


Figura 5 – Teor de agregado graúdo (Aïtcin, 2000).

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, 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. Dittmer e Beushausen (2014) também investigaram a influência do teor de agregado graúdo na resistência à compressão e também na influência na resistência a tração normal e na resistência a retração restringida.

### 3 MÉTODOS DE DOSAGEM PARA CAR

O termo dosagem na tecnologia do concreto tem um significado bastante abrangente. Atividades de seleção de materiais e também proporcionamento dos mesmos são entendidos como partes integrantes do que se denomina dosagem do traço de concreto. Para Neville (1997), há basicamente dois aspectos bastantes diferentes compreendidos por esta denominação. O primeiro é a dosagem entendida num sentido amplo, compreendendo assim as atividades de especificações dos materiais tendo em vista um determinado desempenho. O segundo aspecto é a dosagem entendida num sentido mais restrito, como a fixação de proporções dos materiais que deverão ser misturados, o traço propriamente.

Atualmente também os métodos de dosagem podem enquadrar-se em três linhas que correspondem aos métodos analíticos, aos experimentais e aos semi experimentais. Do ponto de vista da sua aplicação, os métodos analíticos apresentam o inconveniente do desconhecimento que se tem em virtude dos numerosos parâmetros que geralmente intervêm, o que leva à realização de um trabalho adicional para sua evolução. Os métodos semi experimentais, por um lado apresentam uma maior flexibilidade em sua aplicação, por outro lado apresentam em parte a mesma limitação que os anteriores.

Os concretos de alta resistência devem suas características, tanto no estado fresco como no estado endurecido, entre outros fatores, à incorporação de adições minerais e de superplastificante aos componentes tradicionais do concreto. Isto implica uma modificação significativa do comportamento dos concretos de alta resistência, fundamentalmente no estado fresco, em relação ao concreto convencional, não sendo aplicável a extrapolação direta dos métodos clássicos de dosagem aos concretos de alta resistência. A seguir, serão apresentados os três métodos de dosagem para concretos de alta resistência mais consagrados, discutindo seus princípios e suas limitações.

#### 3.1 MÉTODO TORALLES-CARBONARI (1996)

O método proposto por Toralles-Carbonari (1996) consiste num método experimental, baseado na otimização separada da composição da pasta e do esqueleto granular frente às características requeridas no concreto, tanto as relativas a seu comportamento no estado fresco como no estado endurecido.



O método é dividido em três etapas diferentes: o estudo da pasta, a composição do esqueleto granular e a combinação da pasta com o esqueleto granular. Cada uma das etapas é fundamentada em diferentes hipóteses. São elas:

- a fluidez da pasta governa as propriedades reológicas do concreto;
- existe um teor máximo de superplastificante, que é função do seu ponto de saturação determinado com o ensaio do cone Marsh;
- o esqueleto granular ótimo é o que apresenta o menor volume de vazios;
- o conteúdo ótimo de pasta depende dos requisitos de desempenho.

### 3.1.1 Determinação da relação água/cimento – Estudo da pasta

A relação água/cimento deve ser a mais baixa possível, capaz de garantir resistência e trabalhabilidade. O limite inferior para a relação água/cimento é determinado pela demanda de água que corresponde a uma pasta de consistência normal (ABNT NM 43, 2002) de uma mistura dos componentes considerados. O limite superior está associado ao ponto de saturação do superplastificante. O ponto de saturação é dado pela relação superplastificante/cimento (sp/c) a partir da qual não há mudanças significativas na fluidez da pasta.

A Figura 6 mostra o limite superior e inferior de uma dosagem. Segundo Toralles-Carbonari (1996), ao adotar uma relação água/cimento no limite inferior implica em produzir um concreto de consistência entre seca e plástica; já se adotar uma relação água/cimento no limite superior implica num concreto trabalhável, podendo ou não ter consistência fluida.

A Figura 6 demonstra também que diferentes concentrações de cimento na pasta levam a distintos pontos de saturação. Ou seja, cada relação água/cimento apresenta um ponto de saturação.

No método desenvolvido por Toralles-Carbonari (1996) a resistência da dosagem é definida pela relação água/cimento. A autora destaca no seu trabalho a importância de outros parâmetros como a dimensão máxima e a mineralogia do agregado na resistência à compressão, contudo estes parâmetros são vistos pela autora como fatores limitantes da resistência, mas não como fatores que exercem influência sobre a mesma.

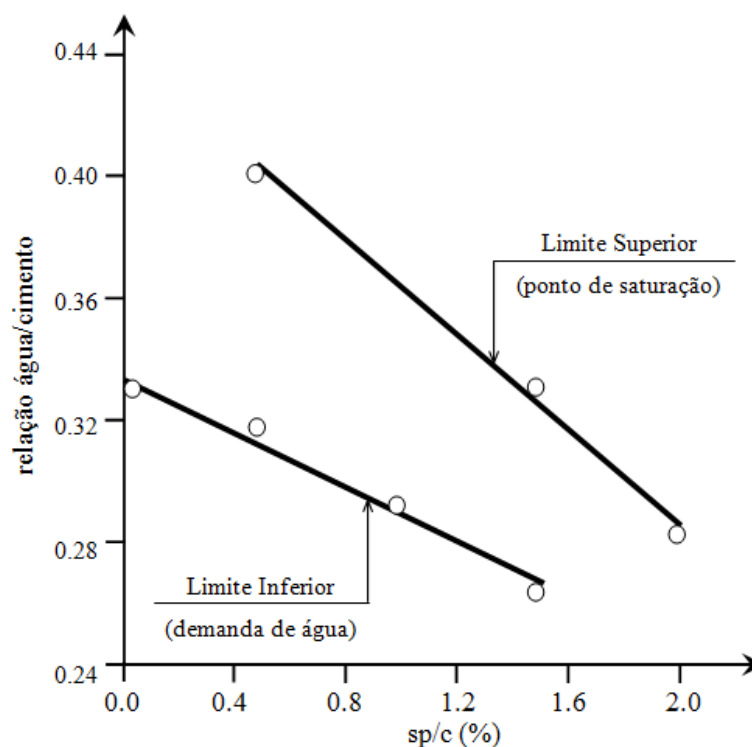


Figura 6 – Limite inferior e superior para determinação da relação água/cimento (Fonte: Toralles-Carbonari, 1996).

### 3.1.2 Determinação da relação adição mineral/cimento – Estudo da pasta

Segundo Toralles-Carbonari (1996), a escolha da adição mineral depende, entre outros fatores, das características requeridas no concreto, principalmente quanto à trabalhabilidade e quanto à resistência. A autora chama atenção ao fato de que adições minerais como a sílica ativa, por exemplo, apresentam comportamentos distintos no estado fresco e no estado endurecido. Enquanto a resistência à compressão aumenta para teores de adição de sílica ativa até 25%, para teores de 15 % a trabalhabilidade já é bastante prejudicada. No caso da sílica ativa, Toralles-Carbonari recomenda o teor de 10% de adição como ponto ótimo, tendo em vista a trabalhabilidade e a resistência à compressão conjuntamente.

### 3.1.3 Determinação da relação superplastificante/cimento – Estudo da pasta

A determinação da relação superplastificante/cimento se realiza com base no ponto de saturação do superplastificante. Assim se obtém a máxima dosagem de superplastificante a se utilizar na mistura. Toralles-Carbonari (1996) realizou ensaios experimentais e demonstra, em seu trabalho, como o apresentado na Figura 7, que o aumento da relação superplastificante/cimento tanto na pasta quanto no concreto aumentam o abatimento e o espalhamento, respectivamente,

até o ponto de saturação do aditivo. A partir destes resultados experimentais assumiu que as tendências obtidas nos ensaios com pasta são indicativas da trabalhabilidade do concreto e que, por conseguinte, a dosagem do superplastificante para o concreto pode ser realizada com base na fluidez da pasta.

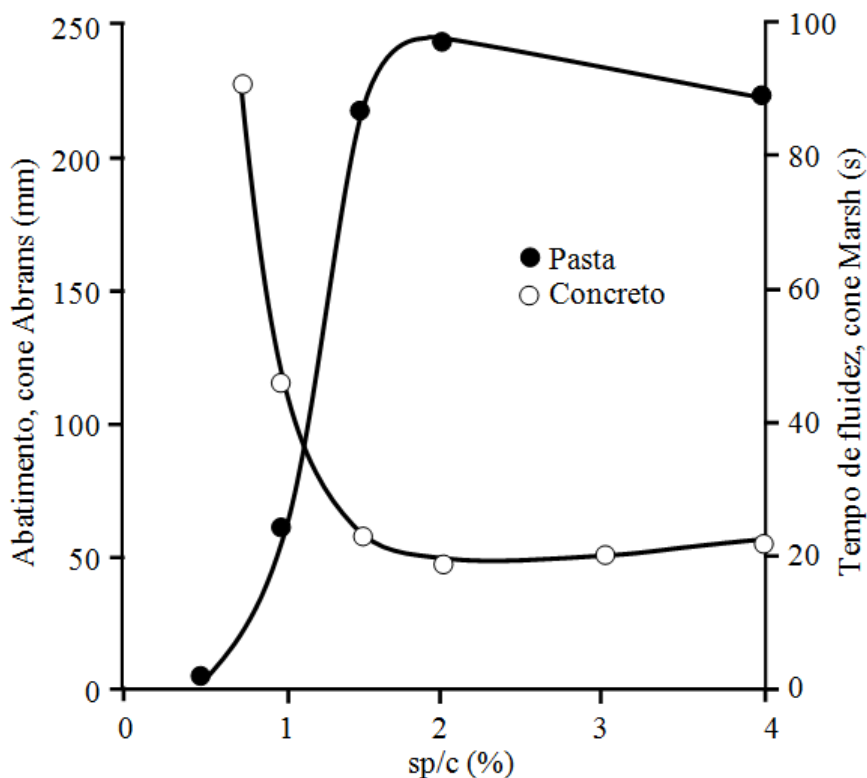


Figura 7 – Comparação entre a consistência do concreto pelo cone de Abrams e o tempo de fluidez da pasta pelo cone de Marsh (Fonte: Toralles-Carbonari, 1996).

O ensaio de cone Marsh é o procedimento adotado pelo método de Toralles-Carbonari (1996) para se quantificar a fluidez de pastas. A adição de aditivo superplastificante à pasta de consistência normal promove o aumento da sua fluidez, este aumento é medido pelo tempo de escoamento. O tempo de escoamento é inversamente proporcional ao percentual de superplastificante. O ponto de saturação do aditivo é definido como teor de aditivo superplastificante a partir do qual não é significativa a variação no tempo de escoamento da pasta medida no cone Marsh.

### 3.1.4 Estudo do esqueleto granular

A otimização granular dos agregados está baseada na busca da combinação de agregados que resulte no mínimo de vazios. Para isso se trabalha com um único ensaio de compactação dos agregados secos e ensaios de caracterização necessários na determinação do volume de vazios.

Os ensaios complementares são a determinação das massas específicas dos agregados, e os coeficientes de absorção das partículas.

O ensaio de compactação dos agregados secos baseia-se na norma ASTM C29/C29M. (1991). No Brasil pode-se recorrer à NBR7810 (ABNT, 1983) como parâmetro de ensaio. Para a realização do ensaio, diferentes combinações de agregado miúdo e graúdo são misturadas. Cada mistura deve ser homogeneizada numa bandeja nas diferentes proporções, e colocada em um molde metálico de 5 litros, sendo este preenchido em três camadas, compactados com 25 golpes cada.

Para cada proporção de agregado miúdo e graúdo se determina então a massa unitária. Tem-se assim uma massa aparente unitária compactada para cada mistura. A partir do peso unitário compactado da mistura e da massa específica da composição da mistura se determina o volume de vazios do esqueleto granular formado por cada combinação de agregados.

A hipótese utilizada para se otimizar o esqueleto granular é a de que o esqueleto granular ideal é aquele que apresenta o mínimo volume de vazios. A Figura 8 ilustra um estudo comparativo realizado por Toralles-Carbonari (1996). A autora destaca que o esqueleto granular com menor volume de vazios é o que necessita de menor volume de pasta, e que complementarmente é importante estudar também a influência do fator agregado miúdo/graúdo nas propriedades do concreto, como na trabalhabilidade e na resistência.

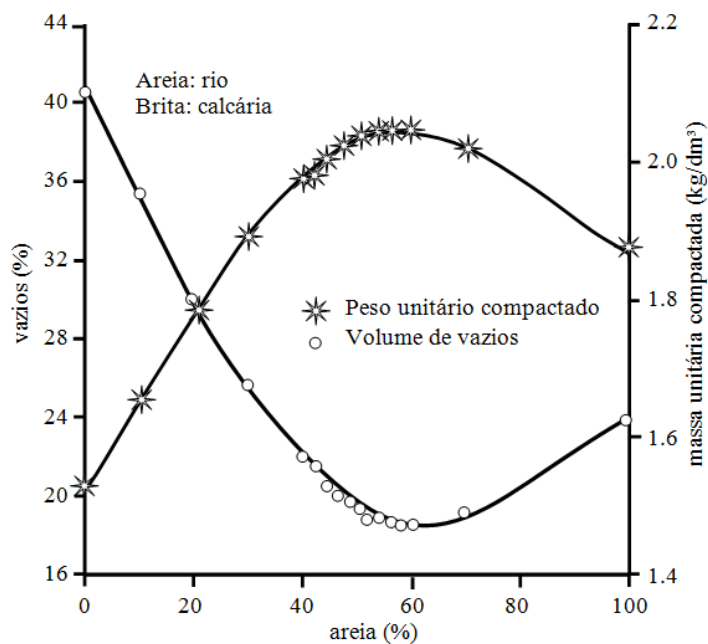


Figura 8 – Compacidade esqueleto granular (Fonte: Toralles-Carbonari, 1996).

### 3.1.5 Determinação da combinação entre pasta e esqueleto granular

Toralles-Carbonari (1996) demonstrou experimentalmente a influência do conteúdo de pasta sobre a trabalhabilidade e a resistência à compressão. O comportamento geral da influência do volume de pasta pode ser visualizado na Figura 9. Identifica-se que um excesso de pasta pode ocasionar uma diminuição da resistência. Por outro lado, um déficit no teor de pasta prejudica o concreto tanto do estado fresco, diminuindo a trabalhabilidade, quanto no estado endurecido, diminuindo a resistência.

A autora sugere em seu estudo que se parta de um valor imediatamente superior ao volume de vazios do esqueleto granular, adotando-se valores de excesso de pasta de 2%, 4%, 6% e 10%. A partir de determinações experimentais determina-se o consumo mínimo de pasta capaz de assegurar o desempenho esperado ao concreto. Neste sentido entende-se como desempenho a resistência à compressão e a trabalhabilidade medida pelo abatimento do tronco Abrams.

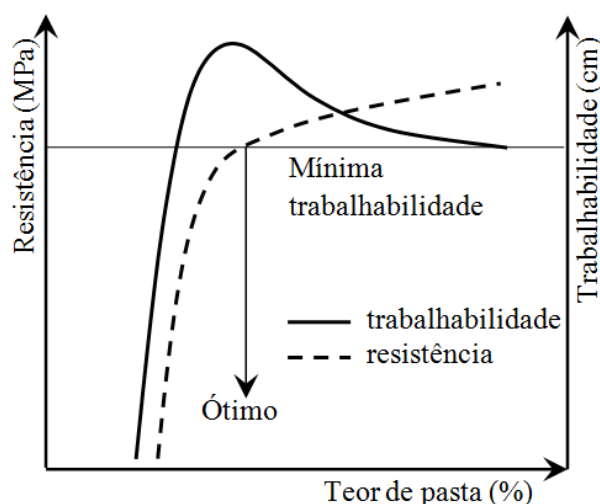


Figura 9 – Curvas idealizadas do conteúdo de pasta frente à trabalhabilidade e à resistência (Fonte: Toralles-Carbonari, 1996).

### 3.1.6 Fluxograma do método de dosagem proposto

Como ilustra a Figura 10, o estudo de dosagem parte do estudo da pasta, definindo-se a relação água/cimento, o teor de superplastificante e a percentual de adição. O estudo da pasta tem caráter qualitativo e tem por objetivo identificar as combinações mais adequadas de cimento com aditivos e adições. O peso unitário é determinado, pois será utilizado no cálculo da combinação pasta-esqueleto granular.

Paralelamente ao estudo da pasta o esqueleto granular também é determinado. O estudo do esqueleto granular tem caráter quantitativo e tem por objetivo identificar qual a proporção de agregado miúdo e graúdo será empregada no concreto.

Posteriormente a definição da composição da pasta e do esqueleto granular é encontrado qual o excesso de pasta além do volume de vazios do esqueleto granular será adotado na dosagem. Definido o teor de excesso de pasta se tem todos os elementos necessários para realização da dosagem.

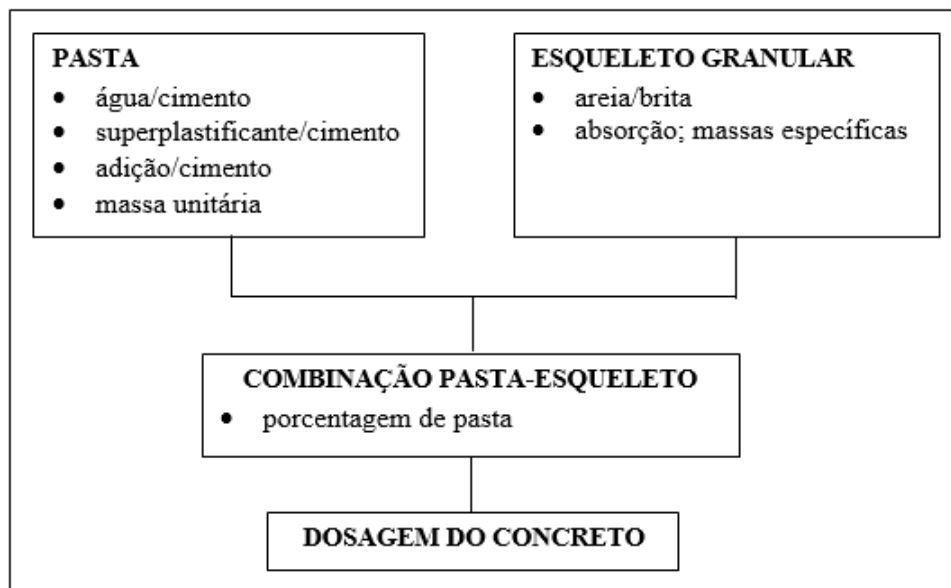


Figura 10 – Etapas do método de dosagem para concreto de alta resistência (Fonte: Toralles-Carbonari, 1996).

### 3.1.7 Comentários sobre o método

O método proposto por Toralles-Carbonari (1996) aborda aspectos importantes do comportamento do concreto de alta resistência. O conceito de ponto de saturação, por exemplo, é bastante interessante tendo em vista o custo do aditivo superplastificante na composição do concreto.

Por outro lado, o método proposto se fundamenta em algumas hipóteses não confirmadas. A primeira delas é a de que a fluidez da pasta governa as propriedades reológicas do concreto de alta resistência. No entanto a própria Toralles-Carbonari (1996) constata experimentalmente, no seu trabalho, que a trabalhabilidade cresce com o aumento do percentual de areia no esqueleto granular.

Outra hipótese assumida é a de que o esqueleto granular ótimo é o que apresenta o menor volume de vazios. Essa hipótese é assumida independentemente da viscosidade da pasta. Ou seja, independentemente do tempo de escoamento da pasta, medido no ensaio do cone Marsh, o esqueleto granular escolhido será o que apresenta o menor volume de vazios. Esta hipótese não foi comprovada por nenhum estudo experimental no trabalho pela autora.

Toralles-Carbonari (1996) define que o teor de superplastificante, para uma mesma relação água/cimento, deve ser escolhido observando-se o limite inferior, definido pela consistência normal da pasta e o limite superior, definido pelo ponto de saturação do aditivo. Contudo nenhuma consideração foi feita a respeito da importância dessa variação de viscosidade na determinação final do teor de pasta no concreto. É pertinente se questionar, por exemplo, a existência de um ponto ótimo entre estes dois limites tendo em vista o esqueleto granular. No método, no entanto, a pasta é otimizada qualitativamente e de forma independente do esqueleto granular.

### 3.2 MÉTODO DE FRANÇOIS DE LARRARD (1999)

De Larrard (1999) não propôs simplesmente um método de dosagem. Ele propôs uma abordagem científica fundamentada numa série de equações de comportamento relacionando diferentes parâmetros da mistura com as propriedades do concreto. De Larrard (1999) propõe um visão holística para a dosagem do concreto.

A abordagem é definida sob três aspectos diferentes. O primeiro aspecto estudado está relacionado à densidade de empacotamento granular das misturas. O autor estudou a influência das diversas características dos agregados na compactidade e na densidade das misturas particuladas. Das características elegeu a dimensão máxima característica e a forma do grão como as variáveis determinantes da compactidade granular. Para a mensuração da influência da dimensão máxima característica e da forma das partículas na resistência do concreto, desenvolveu o conceito de Máxima Espessura de Pasta (MPT), que é definida pela Equação 11.

$$MPT = D \left( \sqrt[3]{\frac{g^*}{g}} - 1 \right) \quad \text{Equação 11}$$

Onde: D é a dimensão máxima característica da mistura granular

$g$  é o volume de agregado por unidade de volume de concreto

$g^*$  é a densidade de empacotamento dos agregados

A densidade de empacotamento dos agregados ( $g^*$ ) é uma determinação experimental. Grande esforço foi despendido para se elaborar um protocolo que pudesse representar esta característica. O estudo experimental que mensura a densidade de empacotamento desenvolvido por De Larrard (1999) é chamado de Modelo de Empacotamento Compressivo. O ensaio experimental consiste na aplicação de uma pressão constante (10 kPa) e uma vibração (68 Hz) em um volume padrão de material (3,0 kg para agregado miúdo e 7,5 kg para agregado graúdo) dentro de um pistão (diâmetro 160 mm e altura 300 mm) por um tempo pré-determinado (3 min). Aplicação deste modelo foi realizada por Silva (2004) e Formagini, (2005).

O segundo aspecto estudado por De Larrard (1999) é a influência da resistência da matriz (definida como a pasta de cimento mais todas as partículas com dimensão menor do que 80 micrometros) na resistência do concreto. O autor adota como modelo básico de previsão da resistência a equação criada por Féret (1892 *apud* De Larrard, (1999)) que relaciona a resistência à compressão com os volumes de cimento, de água e de ar contidos na pasta. O autor propõe o modelo de previsão da resistência à compressão da pasta de cimento Portland como definido pela Equação 12.

$$f_{cp} = 11,4 \times R_{c28} \left( \frac{v_c}{v_c + v_w + v_a} \right)^{2.85} \quad \text{Equação 12}$$

Onde:  $f_{cp}$  é a resistência à compressão da pasta de cimento

$R_{c28}$  é a resistência à compressão padrão do cimento aos 28 dias

$v_c$  é o volume de cimento por unidade de volume de pasta no estado fresco

$v_w$  é o volume de água por unidade de volume de pasta no estado fresco

$v_a$  é o volume de ar aprisionado por volume de pasta no estado fresco

De Larrard (1999) não adota a equação de Abrams para relacionar a resistência à compressão com a relação água cimento. A resistência da matriz é definida então pela resistência da pasta de cimento e também pela disposição da própria matriz em relação aos agregados. O parâmetro



físico escolhido para representar essa disposição dos agregados é a máxima espessura de pasta. A resistência à compressão da matriz é definida pela Equação 13.

$$f_{cm} = f_{cp} \times MPT^{-0.13} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:  $f_{cm}$  é a resistência à compressão da matriz

$f_{cp}$  é a resistência à compressão da pasta de cimento

$MPT$  é a máxima espessura de pasta

A resistência da matriz é diretamente proporcional à resistência à compressão da pasta de cimento e inversamente proporcional à máxima espessura de pasta. Agregados com dimensão menor e esqueletos granulares mais densos, segundo o modelo de De Larrard (1999), melhoram a resistência da matriz.

O terceiro aspecto considerado pelo autor é a reologia do concreto. Ele estudou a influência dos diversos parâmetros de dosagem na viscosidade do concreto, e propôs um modelo geral que mensura a viscosidade em função das características do concreto, Equação 14.

$$\eta_a = \frac{19,8}{(1 - v_c/v_a)^{1,08}} \times \frac{1}{(1 - g/g^*)} \quad \text{Equação 14}$$

Onde:  $\eta_a$  é a viscosidade aparente do concreto

$v_a$  é o volume de água retido num volume unitário de pasta de cimento fresco

$v_c$  é o volume de cimento num volume unitário de pasta de cimento fresco

$g$  é o volume de agregado por unidade de volume de concreto

$g^*$  é a densidade de empacotamento do agregado utilizado no concreto

Dados estes modelos de comportamento propõe-se uma solução para o problema de dosagem. O ponto de partida da solução do problema básico de dosagem proposto é a equação de equilíbrio do volume, que implica que o volume total é igual à unidade conforme indicado pela Equação 15.

$$W + C + FA + CA = W + C + g = 1 \quad \text{Equação 15}$$

Onde:  $W$  é o volume de água da mistura

$C$  é o volume de aglomerante

$FA$  é o volume de agregado miúdo

$CA$  é o volume de agregado graúdo

$g$  é o volume de agregado

O consumo de cimento é definido em função de três variáveis. A primeira é o esqueleto granular com a máxima densidade granular, tendo em vista o custo do cimento ser maior do que o custo dos agregados. A segunda variável é a resistência do traço dosado. E a terceira variável é a viscosidade. O consumo de cimento da mistura então é dado pela Equação 16.

$$C = \frac{1 - g_{max}^* \times \psi_2^{-1} \left\{ \frac{\eta_a}{\psi_1 [0, \varphi^{-1}(f_c)]} \right\}}{1 + \varphi^{-1}(f_c)} \quad \text{Equação 16}$$

Onde:  $C$  é o volume de cimento da mistura

$g_{max}^*$  é a máxima densidade de empacotamento dos agregados

$\psi_1$  contribuição da pasta de cimento na viscosidade aparente

$\psi_2$  contribuição do agregado para a viscosidade aparente

$\eta_a$  viscosidade aparente do concreto fresco, usado como um índice de trabalhabilidade

$\varphi^{-1}(f_c)$  função da relação água/cimento com a resistência à compressão do concreto

Assim o consumo de cimento será inversamente proporcional à densidade de empacotamento do agregado e inversamente proporcional à relação água/cimento, que por sua vez é dada em função da resistência à compressão. Diferentemente de outros métodos, este método considera que o consumo de cimento é influenciado pela viscosidade aparente. Isso é feito através da correção do volume de agregado. Dois fatores são considerados na viscosidade do concreto, o primeiro é a influência da viscosidade da pasta de cimento ( $\psi_1$ ) na viscosidade aparente,

definida em função da relação água cimento ( $\varphi^{-1}(f_c)$ ). O segundo fator considerado na viscosidade é a contribuição do agregado ( $\psi_2$ ) na viscosidade aparente.

O consumo de água é deduzido a partir do produto da função da relação água/cimento, da resistência à compressão, e do consumo de cimento, definido pela Equação 17.

$$W = \varphi^{-1}(f_c) \times C \quad \text{Equação 17}$$

Onde:  $W$  é o volume de água da mistura

$C$  é o volume de cimento da mistura

$\varphi^{-1}(f_c)$  relação água/cimento função da resistência à compressão do concreto

O consumo de agregado é definido a partir da equação da viscosidade aparente do concreto, partindo-se da máxima densidade de agregado ( $g_{max}^*$ ). O volume de agregado miúdo é definido na forma da Equação 18.

$$FA = \frac{g_{max}^*}{(1+x)} \times \psi_2^{-1} \times \left[ \frac{\eta_a}{\psi_1[0, \varphi^{-1}(f_c)]} \right] \quad \text{Equação 18}$$

Onde:  $g_{max}^*$  é a máxima densidade de empacotamento dos agregados

$x$  é a relação ótima entre agregado graúdo/miúdo (que leva a densidade de empacotamento ótima).

$\varphi^{-1}(f_c)$  função da relação água/cimento com a resistência à compressão do concreto

$\psi_1$  contribuição da pasta de cimento na viscosidade aparente

$\psi_2$  contribuição do agregado para a viscosidade aparente

$\eta_a$  viscosidade aparente do concreto fresco, usado como um índice de trabalhabilidade

O consumo de agregado graúdo, por sua vez, é definido a partir do consumo de agregado miúdo, sendo dado pela Equação 19.

$$CA = x \times FA \quad \text{Equação 19}$$

Onde:  $CA$  é o volume de agregado graúdo

$FA$  é o volume de agregado miúdo

$x$  é a relação ótima entre agregado graúdo/miúdo (que leva a densidade de empacotamento ótima).

A solução da dosagem assim é dada pela resolução do sistema de equações proposto. Para tanto são necessárias determinações experimentais da máxima densidade de empacotamento ( $g_{max}^*$ ), da contribuição do agregado na viscosidade aparente ( $\psi_2$ ) e da contribuição da pasta de cimento na viscosidade aparente ( $\psi_1$ ).

### 3.2.1 Comentários sobre o método

O método proposto por De Larrard (1999) leva a um sistema de equações. O autor desenvolveu um software chamado de *Betonlab* que auxilia a resolução deste sistema de equações. No entanto para o mesmo funcionar é necessária a determinação dos parâmetros relativos à caracterização de todos os materiais. Uma aplicação completa do método foi realizada por Silva (2004), são 39 procedimentos entre cálculos e determinações experimentais necessários para aplicação do método. De Larrard (1999) destaca que o resultado obtido depende da precisão das medidas experimentais realizadas para definir a resolução do sistema de equações.

### 3.3 MÉTODO DE AÏTCIN (2000)

O método segue a mesma abordagem da internacionalmente conhecida norma ACI 211.1 (1991). É a combinação de resultados empíricos e de cálculos matemáticos baseados no princípio do volume absoluto. O método proposto tem como premissa não somente o proporcionamento, mas principalmente o caráter orientativo no sentido de se escolher os materiais mais adequados ao concreto de alta resistência. Tem caráter empírico, foi desenvolvido a partir de 25 anos de experiência do autor em laboratório e em obras desenvolvidas principalmente no Canadá.

### 3.3.1 Determinação da resistência à compressão

No método proposto por Aïtcin (2000) a resistência à compressão é definida única e exclusivamente através da adoção da relação água / aglomerante. O Autor admite que existam diferentes materiais cimentícios suplementares. Assim, a definição da relação água/aglomerante empregada na dosagem deve ser definida com base em experiências anteriores. Se a eficiência dos diferentes materiais cimentícios não for conhecida, o método apresenta uma curva com valores médios de resistência como estimativa inicial. A Figura 11, apresentada por Aïtcin (2000), representa uma larga faixa de valores de relação água/aglomerante para uma dada resistência.

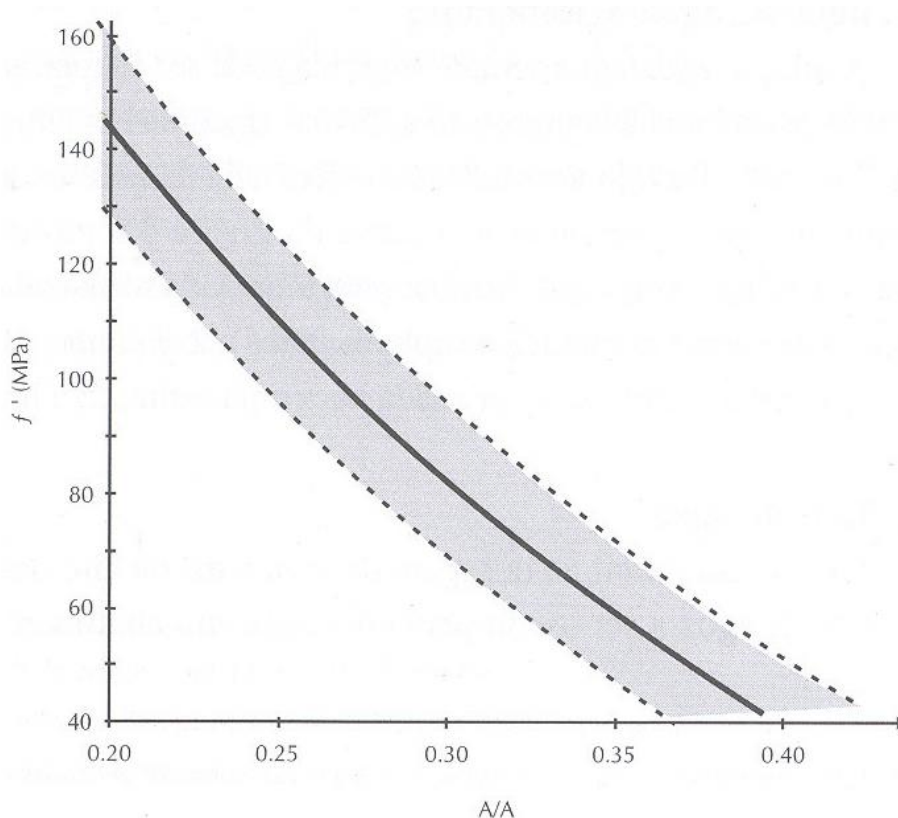


Figura 11 – Relações propostas entre a relação água/aglomerante e a resistência à compressão (Fonte: Aïtcin, 2000).

Aïtcin (2000) discute a importância de diversos aspectos relativos à dosagem do concreto de alta resistência. São destacados os aspectos relativos à resistência da pasta do cimento hidratada, como a porosidade, o tamanho dos grãos dos produtos de hidratação, a resistência da zona de transição, a importância da compatibilidade entre o aglomerante e os aditivos empregados, entre outros. Todos estes fatores são direta ou indiretamente relacionados à relação água/aglomerante e assim a resistência de dosagem é relacionada a este parâmetro.

Pouco destaque é dado às propriedades dos agregados e sua influência na resistência. Neste método as características dos agregados não são consideradas fatores variáveis na resistência do concreto de alta resistência de forma direta. O autor destaca como característica interessante que o agregado miúdo selecionado apresente módulo de finura de 2,7 a 3,0. Quanto ao agregado graúdo é destacada a importância de se empregar agregados oriundos de rochas resistentes. A importância da forma também é citada e a seleção do tamanho máximo do agregado graúdo também é apontada como um limitador da resistência. Contudo nenhum destes fatores é adotado como determinante da resistência, ou seja, não são considerados na dosagem na definição da resistência.

### 3.3.2 Determinação do teor de água

Posteriormente à definição da resistência de dosagem, faz-se a definição do teor de água necessário para ter-se um abatimento de 200 mm uma hora depois da mistura. Segundo Aïtcin (2000), esse abatimento pode ser conseguido misturando um concreto com um baixo teor de água e um alto teor de superplastificante ou com um teor de água mais alto e um teor menor de superplastificante. A melhor opção sob o ponto de vista econômico depende do custo do aditivo e do cimento empregados.

A quantidade de água demandada para se conseguir um concreto de alta resistência com abatimento de 200 mm varia muito, principalmente pelo fato de que a composição das fases e a solubilidade dos materiais cimentantes variam muito. Segundo o autor, a melhor maneira de se encontrar a combinação ideal de água de mistura e dosagem de superplastificante é avaliando a compatibilidade das possíveis combinações, porém isso pode ser bastante trabalhoso dependendo do número de adições e aditivos avaliados. Como alternativa é apresentada uma abordagem simplificada, baseada no conceito de ponto de saturação, apresentada na Figura 12. Sugere-se começar com o teor de água de 145 l/m<sup>3</sup> quando o ponto de saturação não é conhecido.

Ponto de saturação	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	Percentual de sólidos
Dosagem de água	120 a 125	125 a 135	135 a 145	145 a 155	155 a 165	l/m <sup>3</sup>

Figura 12 – Determinação da dosagem mínima de água (Fonte: Aïtcin, 2000).

### 3.3.3 Determinação do teor de superplastificante

A dosagem do superplastificante pode ser deduzida da dosagem no ponto de saturação apresentado na Figura 12. Não sendo conhecido o ponto de saturação, Aïtcin (2000) sugere o teor de 1,0%.

### 3.3.4 Determinação do teor de agregado graúdo

No método do ACI 211.1 (1991), o volume de agregado graúdo é definido em função da dimensão máxima característica e do módulo de finura do agregado miúdo. O método do ACI 211.1 (1991) não faz qualquer consideração à forma da partícula. Segundo Neville (1997) a forma do agregado graúdo é indiretamente considerada no método do ACI, pois o consumo de agregado é o produto do volume de agregado graúdo pela massa unitária compactada. Os agregados lamelares apresentam menor massa unitária compactada quando comparados com os agregados cúbicos.

Diferentemente do método ACI211.1 (1991), Aïtcin (2000) propõe diferentes consumos de agregado graúdo em função da forma típica das partículas. Assim, concretos feitos com partículas cuja forma típica é arredondada poderiam ter teores mais elevados de agregado graúdo, e concreto empregando agregados lamelares teriam um consumo menor de agregado graúdo. A Figura 13 é apresentada por Aïtcin como referência de consumo de agregado graúdo.

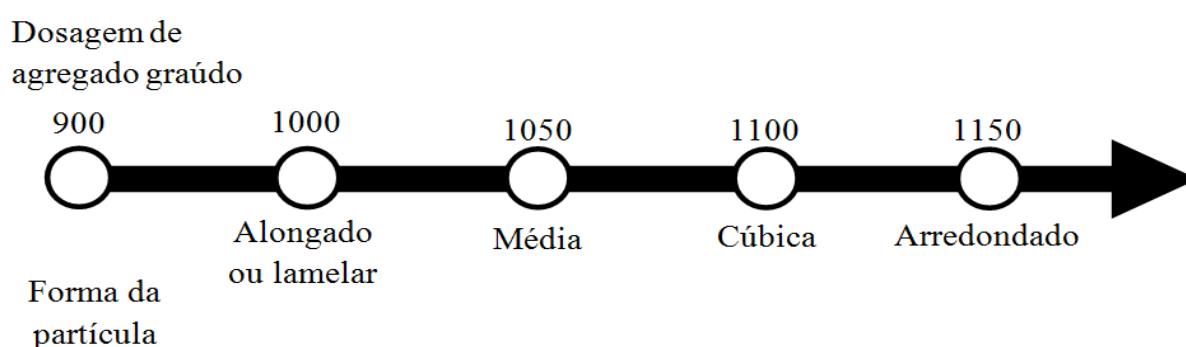


Figura 13 – Teor de agregado graúdo (Fonte: Aïtcin, 2000).

Essa definição pode, no entanto, ser questionada em função, por exemplo, de que há agregados com a forma semelhante, mas com densidades diferentes. Assim dois agregados com forma cúbica apresentariam a mesma dosagem em quilos por metro cúbico de concreto, contudo se

um for mais denso que outro ocupará menos volume no metro cúbico, aumentando a proporção dos demais componentes (argamassa).

### 3.3.5 Determinação do teor de ar

Aïtcin (2000) sugere 1,5% como uma estimativa inicial para o teor de ar aprisionado. Valores mais precisos podem ser obtidos com resultados experimentais. Experimentalmente é difícil conseguir teores de ar aprisionado menores do que 1%, podendo este teor chegar a 3%.

### 3.3.6 Fluxograma do método de dosagem proposto

Como ilustra a Figura 14, definida a relação água/aglomerante a partir da resistência à compressão requerida, o teor de água a partir do ponto de saturação do aditivo, a quantidade de agregado graúdo a partir da sua forma e estimada a quantidade de ar incorporado, se tem todos os elementos necessários para realização da dosagem.

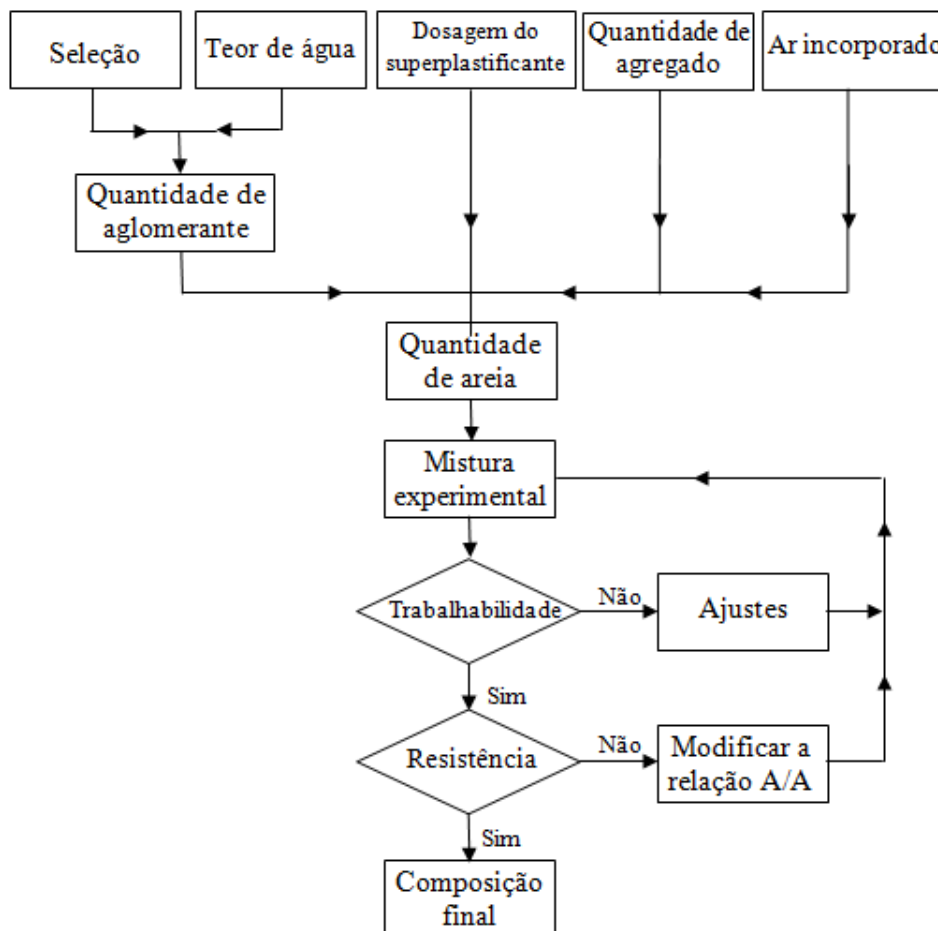


Figura 14 – Fluxograma do método de dosagem (Fonte: Aïtcin, 2000).



O consumo de água e o consumo de agregado graúdo são definidos diretamente no método. O consumo de aglomerante é dado pelo cociente do consumo de água pela relação água/aglomerante. O teor de ar incorporado também é definido diretamente no método. A definição do consumo de agregado miúdo é feita pelo método do volume absoluto tal qual é feito no método do ACI 211.1 (1991).

Após a definição dos consumos de cada material empregado na dosagem deve ser feita uma mistura experimental, que tem por objetivo avaliar a trabalhabilidade do concreto no estado fresco. A verificação é feita através do abatimento e ajustes devem ser realizados caso a quantidade de aditivo superplastificante não seja suficiente para obter-se o abatimento de 200 mm. Também é verificada com a mistura experimental a resistência à compressão estimada. Caso a mesma não seja atingida, a relação água/aglomerante deve ser alterada até se obter êxito. Em se tendo as resistências esperadas, é definida a composição final do traço.

### 3.3.7 Comentários sobre o método

Tal qual a aplicação do método do ACI 211.1, (1991), a aplicação do método proposto por Aïtcin, (2000) é bastante simples. Todos os parâmetros utilizados na dosagem se constituem de ensaios de caracterização dos agregados e aglomerantes facilmente determinados em laboratório. Estes ensaios são normalizados no Brasil. O método em si apresenta uma estrutura linear de tomada de decisão. Somente a definição experimental da trabalhabilidade e a verificação da resistência à compressão se constituem de processos interativos, podendo assim ser necessário se fazer mais de uma tentativa.

O caráter empírico do método proposto por Aïtcin (2000) legou-se algumas limitações. Um exemplo é a curva que relaciona a resistência à compressão à relação água cimento, apresentada no método como referência. A Figura 15 ilustra a comparação de dados experimentais compilados dos trabalhos de Toralles-Carbonari (1996) desenvolvido na Espanha, e Alves (2000); Mendes (2002); Tutikian (2007); Rohden (2011); Oliveira (2012) desenvolvido no Brasil, com o as curvas de referência apresentada por Aïtcin (2000).

Outro aspecto do método que merece atenção é a definição do teor de agregado graúdo. O consumo de agregado graúdo é definido em função da forma típica das partículas. Contudo não é feita nenhuma consideração sobre como deve ser avaliada a forma para se classificar o agregado. Poderia se questionar, por exemplo, qual índice de forma uma amostra de agregado

deveria apresentar para que sua forma fosse considerada cúbica. Essa avaliação, no entanto, é feita de forma qualitativa.

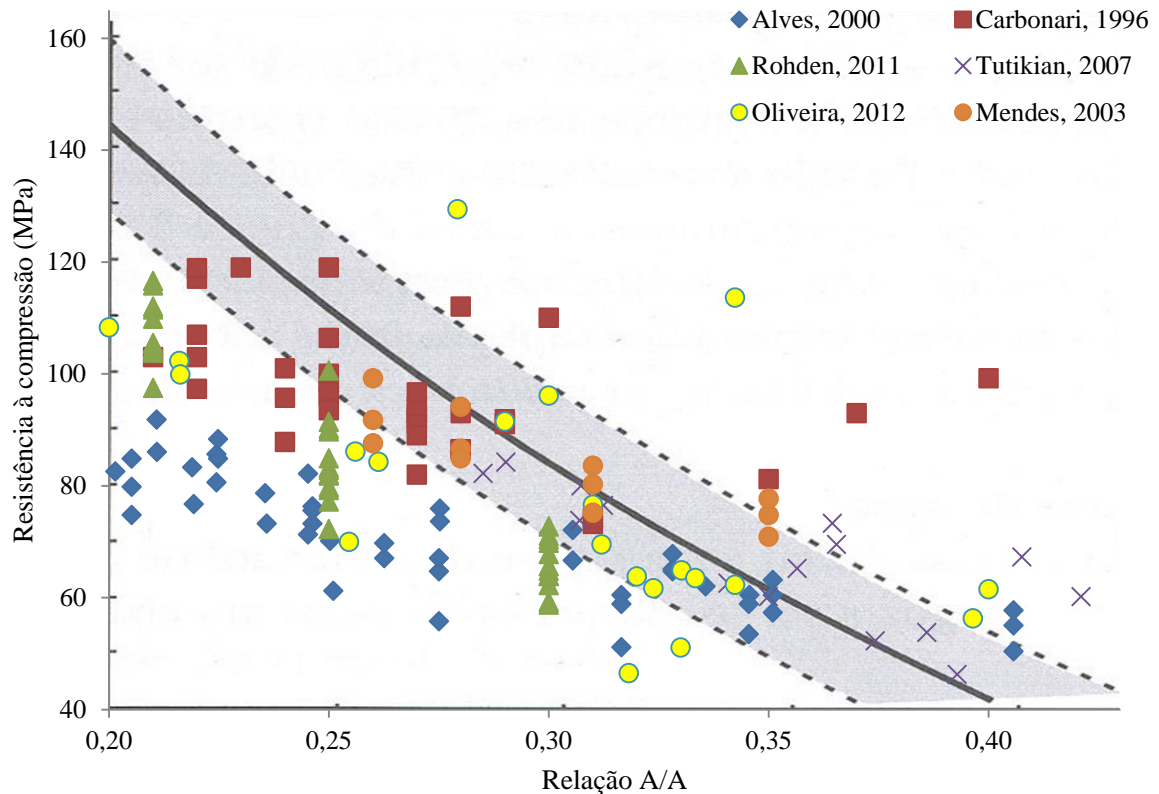


Figura 15 – Comparativo entre a Figura 11 e dados experimentais de outros trabalhos brasileiros.

A Figura 15 ilustra que a gama de resistência para uma mesma relação água/aglomerante é bastante maior do que a referência dada por Aïtcin (2000).

De maneira geral o método proposto por Aïtcin (2000) é de fácil aplicação, apresenta um processo de tomada de decisão simples, o resultado final do processo, no entanto, é bastante dependente do operador. Isto se deve às definições tomadas a partir de critérios qualitativos, como a determinação do teor de agregado graúdo, do teor de aditivo superplastificante e do consumo de água.

### 3.4 COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE DOSAGEM – ESTUDOS EXPERIMENTAIS

Alves (2000) produziu concretos de alta resistência em Porto Alegre/RS com diferentes métodos de dosagem, de forma que eles pudessem ser avaliados e comparados do ponto de vista técnico e econômico. Foram empregados três métodos de dosagem para concreto de alta

resistência: o método proposto por Metha e Aïtcin (1990), o método proposto por Aïtcin (2000) e o método proposto por Toralles-Carbonari (1996). Também foi utilizado o método de dosagem do IPT na dosagem de concretos convencionais.

No estudo o Método IPT abrangeu uma faixa de resistência de 45 MPa a 80 MPa, o Método Mehta/Aïtcin abrangeu uma faixa de 65 MPa a 90 MPa, enquanto que o Método Toralles Toralles-Carbonari abrangeu o intervalo de 60 MPa a 80 MPa e o Método Aïtcin de 55 MPa a 85 MPa. Segundo Alves (2000), no que diz respeito ao consumo de cimento por metro cúbico de concreto, está claro que o Método Aïtcin é o que apresenta os menores consumos, seguido pelo Método Mehta/Aïtcin, que apresenta o segundo menor consumo deste material. O Método Toralles-Carbonari apresentou o maior consumo de cimento por metro cúbico de concreto para a faixa entre 60 MPa e 65 MPa, sendo superado pelo Método IPT na faixa que vai de 70 MPa a 80 MPa. A Figura 16 ilustra o consumo de cimento por metro cúbico de concreto, no intervalo de 45 MPa a 90 MPa, para os quatro métodos de dosagem estudados.

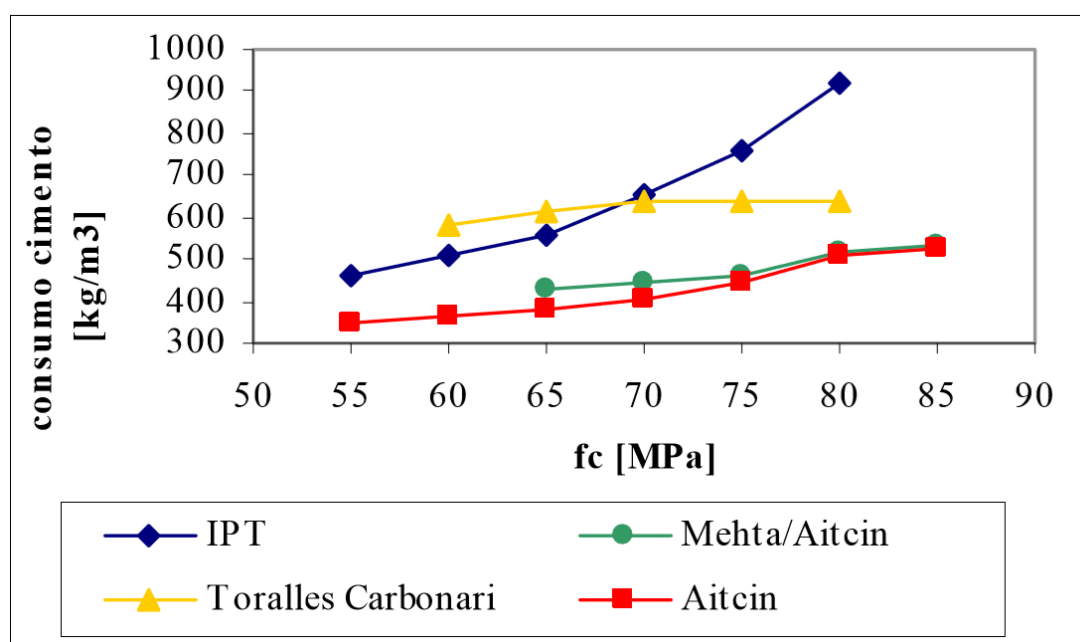


Figura 16 – Consumo de cimento por faixa de resistência à compressão (Fonte: ALVES, 2000).

O consumo de cimento fornece uma estimativa do custo do metro cúbico do concreto, uma vez que seu custo é bem maior do que o de outros materiais utilizados, tais como areia e brita, de forma que há uma tendência de achar-se que o método que apresenta o maior consumo de cimento é também o de custo mais elevado. No concreto de alta resistência, no entanto, a adição da sílica ativa e de superplastificante às misturas de concreto também deve ser considerada (ALVES, 2000). A Figura 17 apresenta o custo do metro cúbico por faixa de resistência.

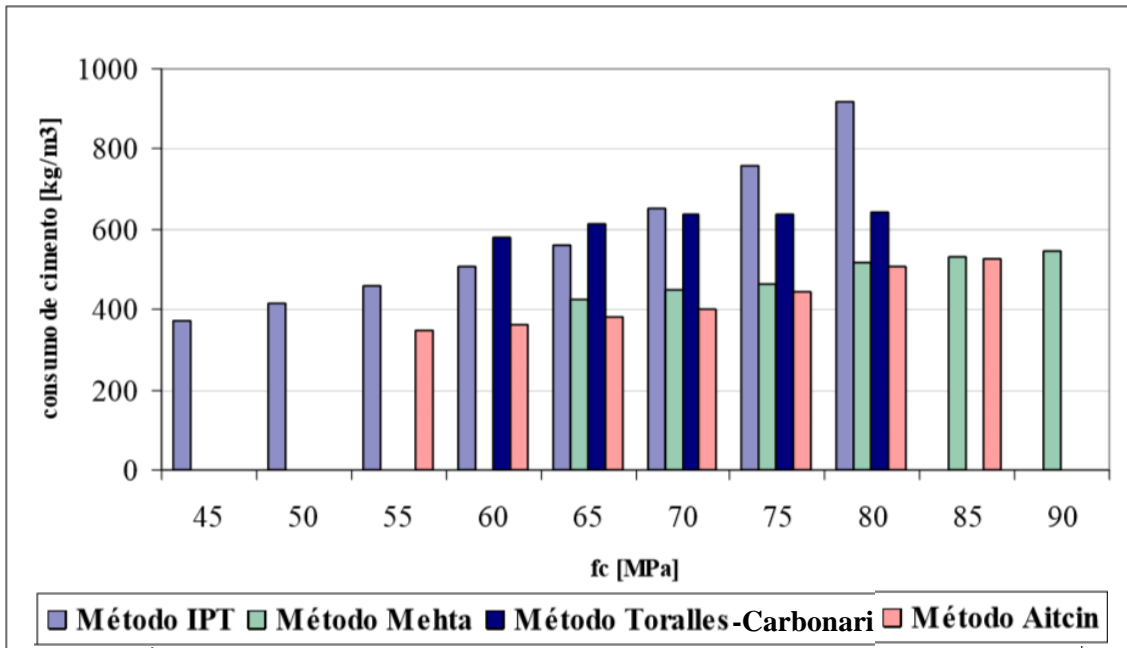


Figura 17 – Custo do metro cúbico de concreto por faixas de resistência (Fonte: ALVES, 2000).

Embora o método Aitcin tenha apresentado os menores consumos de cimento por metro cúbico de concreto, ele nem sempre representa a maior economia. Na faixa de resistência que vai de 65 MPa a 75 MPa, o método Mehta apresenta-se como o mais econômico. Entretanto, a partir de 80 MPa, o Método Aitcin passa a ser o de menor custo. O método IPT é tido como antieconômico para os níveis de resistência estudados. O Método Toraltes-Carbonari, apesar de não representar os maiores custos, apresenta custos bastante elevados se comparado com os Métodos Mehta/Aitcin e Aitcin (Alves, 2000).

Pinto (2003) desenvolveu um estudo comparativo em Goiânia/GO com três métodos de dosagem de concreto de alta resistência. Foram empregados os métodos de Aitcin, o método de Mehta e Aitcin e também o Método de Furnas. O método de Furnas é utilizado, normalmente, na dosagem de concreto massa e convencional; e foi baseado nas recomendações feitas por Carlson em 1975, para a construção da Barragem Itaipu, e melhor desenvolvido pelo Centro Tecnológico de Engenharia Civil de Furnas de Goiânia (BITTENCOURT, 2001).

A Figura 18 apresenta o consumo de aglomerante por metro cúbico de concreto para as diferentes resistências à compressão em cada um dos métodos de dosagem utilizados.

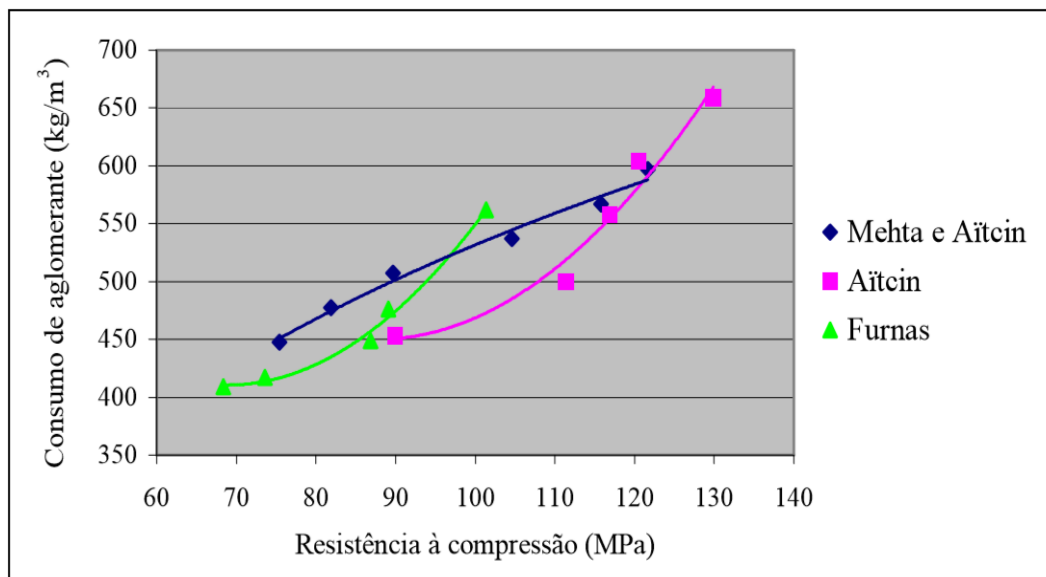


Figura 18 – Consumo de cimento e sílica ativa para cada nível de resistência à compressão (Fonte: PINTO, 2003).

Na Figura 18 pode-se observar que o método Furnas apresentou o menor consumo de cimento para os menores valores de resistência (até aproximadamente 85 MPa), e o Método Aïtcin demonstrou maior eficiência nos valores superiores. Já o Método Mehta/Aïtcin obteve os maiores consumos para quase todos os traços produzidos. Para efeito de comparação, tomando-se o valor de resistência de 90 MPa obtêm-se os consumos de 405,66, 426,98 e 462,60 kg/m<sup>3</sup> de cimento, para um traço do Método Aïtcin, Método Furnas e Método Mehta/Aïtcin, respectivamente (PINTO, 2003).

Pinto (2003) também comparou os custos de cada um dos traços de concreto estudados. A Figura 19 apresenta o custo dos traços por metro cúbico de concreto. Pode-se verificar que os concretos produzidos pelo Método Mehta/Aïtcin obtiveram o menor custo para todas as resistências, embora tenham apresentado os maiores consumos de aglomerantes. Esta diferença pode ser justificada pelo menor teor de sílica ativa utilizada (7,38 % de substituição em massa, sendo 10% nos outros métodos), que é um material aproximadamente 6 vezes mais caro que o cimento; e a utilização de porcentagens menores de aditivo superplastificante para uma mesma resistência.

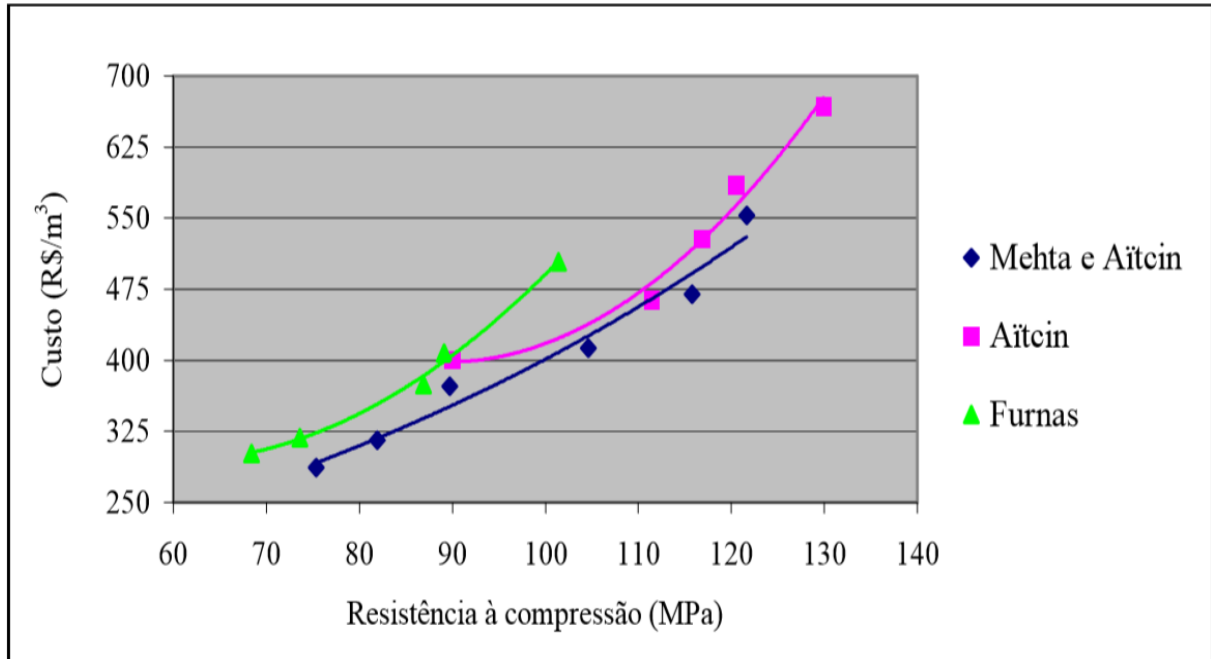


Figura 19 – Custo final (R\$/m<sup>3</sup>) em função da resistência à compressão (Fonte: PINTO, 2003).

### 3.5 CONCEITOS RELACIONADOS À REOLOGIA DE PASTAS DE CIMENTO PORTLAND

O termo reologia é originado da palavra grega *rhein* que significa “escorrer”. O conceito de reologia como estudo da deformação e do escoamento da matéria foi proposto pelo químico Eugene Cook Bingham, no ano de 1929. A reologia tem por finalidade predizer a força necessária para causar uma dada deformação ou predizer a deformação resultante da aplicação de um dado sistema de forças em um corpo. Na prática a reologia é aplicada no estudo de materiais cujas propriedades do escoamento são mais complexas do que as de um fluido simples (líquido) ou as de um sólido elástico (CASTRO *et al.*, 2011).

Um material é considerado um líquido quando sob ação de um sistema de forças, mesmo que pequeno, tem-se o escoamento do mesmo. Além disso a relaxação do sistema de forças não resultará no retorno do corpo ao seu estado não deformado. Já para o corpo ser considerado sólido elástico a aplicação de qualquer sistema de forças resulta em uma deformação e não em escoamento. Com a relaxação do sistema de força, o corpo retorna para o seu estado original não deformado (MANRICH e PESSAN, 1987 *apud* CASTRO, 2007).

Um fenômeno importante ligado ao escoamento é a existência de um limite de escoamento. Alguns materiais que escoam sob uma determinada tensão de cisalhamento não apresentaram esse comportamento se a tensão for reduzida a um valor abaixo do limite de escoamento. O

limite de escoamento nunca é encontrado em um líquido monofásico. Sua ocorrência está sempre associada às emulsões e às pastas semifluidas onde uma ou mais fases estão dispersas, assim como partículas ou bolhas em uma fase contínua. A medida que a concentração da fase dispersa é reduzida, o limite de escoamento também é reduzido (CASTRO *et al.*, 2011).

A ocorrência do limite de escoamento implica na caracterização do material tanto como um sólido quanto como um líquido dependendo do nível de tensão aplicada. Diz-se então que o material apresenta um comportamento transitório entre o sólido, cuja característica é a deformação elástica, e o líquido definido através da viscosidade, em diferentes níveis de tensão. Por esse motivo os materiais que apresentam limite de escoamento são chamados de viscoelásticos.

Haja vista a transitoriedade entre o comportamento elástico e viscoso para diferentes níveis de tensão aplicada, as medidas viscoelásticas são melhor desenvolvidas em estudos que envolvam a aceleração ou a desaceleração de uma tensão ou de uma deformação aplicada sobre o material estudado. Busca-se no estudo do comportamento viscoelástico determinar a relação entre a tensão, a deformação e o tempo (VAN WAZER *et al.* apud CASTRO, 2007).

As duas grandezas que definem o comportamento dos materiais viscoelásticos são a viscosidade e a tensão de escoamento. A tensão de escoamento corresponde à tensão mínima para o início do escoamento e a viscosidade é a constante de proporcionalidade que relaciona a taxa de deformação com a tensão aplicada. A Tabela 4 faz referência à formulação básica utilizada na determinação da viscosidade.

Tabela 4 – Formulação básica utilizada na determinação da viscosidade.

Tensão de Cisalhamento N/m <sup>2</sup>	Taxa de Cisalhamento 1/s	Viscosidade Pa
$\tau = \text{Força}/\text{Área}$	$y = dv/dy$	$\mu = \tau / y$

(Fonte: Adaptado de Giroto, 2012)

A aplicação da tensão de cisalhamento conduz o líquido para um perfil de escoamento. Neste a velocidade é máxima na camada superior (conforme Figura 20) e vai diminuindo à medida que atravessa o material até chegar a zero na placa estacionária. O gradiente de velocidade na amostra é chamado de taxa de cisalhamento e é definido como um diferencial da velocidade pela distância ( $dv/dy$ ).

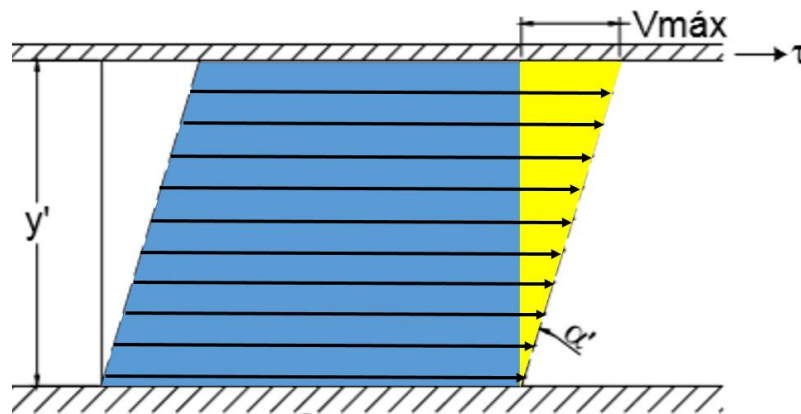


Figura 20 – Aplicação de tensão de cisalhamento em um fluido confinado entre uma placa estacionária e uma placa em movimento (adaptado de SCRAMM, 2006).

Diferentes arranjos podem surgir das relações entre tensão e deformação que caracterizam reologicamente um material. A partir deste comportamento os fluidos podem ser classificados através de diferentes modelos reológicos (BRETAS e D'ÁVILA, 2000; PEDRAJAS, *et al.*, 2014; TALERO, *et al.*, 2013). A Figura 21 apresenta alguns dos modelos reológicos relatados na bibliografia.

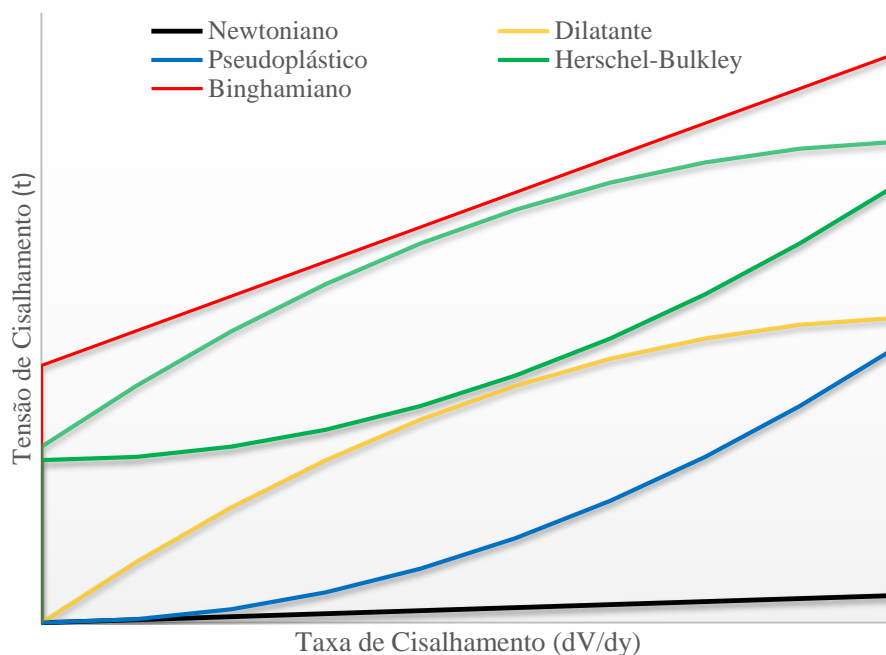


Figura 21 – Modelos de comportamento reológico.

Fluidos que apresentam uma relação constante entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento, independentemente da deformação e do tempo, são denominados fluidos newtonianos. A curva de escoamento de um fluido newtoniano é uma linha reta que passa através da origem e tem uma inclinação cujo inverso é igual ao coeficiente de viscosidade.



Fluídos cuja razão entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento (denominada também de viscosidade aparente) diminui progressivamente com o aumento da taxa de cisalhamento são denominados como pseudoplásticos.

Já os fluídos cuja viscosidade aparente aumenta progressivamente com o aumento da taxa de cisalhamento são denominados como dilatantes.

Nos materiais que apresentam comportamento viscoelástico, diferentemente do que se observa nos fluídos newtonianos, pseudoplásticos e dilatantes, há presença de tensão inicial. O material comporta-se como um sólido até que uma tensão mínima seja excedida. O modelo binghamiano, por exemplo, é caracterizado por uma tensão inicial e posteriormente por uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento.

No modelo de Herschel-Bulkley há ocorrência de tensão de escoamento e a razão entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento (denominada também de viscosidade aparente) diminui ou aumenta progressivamente com o aumento da taxa de cisalhamento.

Os modelos mais utilizados para descrever o comportamento de pastas de cimento são o modelo Binghamiano e o modelo de Herschel-Bulkley (ROUSSEL e LE ROY, 2005).

Acoplada à reologia tem-se a reometria que trata das técnicas, procedimentos e uso de equipamentos que permitem verificar e aferir o comportamento reológico (BARBOSA *et al.*, 2011). As técnicas de caracterização reológica têm como princípio básico submeter os fluidos a esforços ou deformações controladas. Os métodos reológicos podem ser classificados como ensaios monoponto, que caracterizam os fluidos em uma única condição de solicitação, e ensaios multiponto, que submetem os sistemas a diferentes solicitações. No cenário atual para ensaios multiponto, destacam-se a reometria rotacional e o *Squeeze-flow* como as técnicas de multiponto mais indicadas na caracterização reológica (GIROTTO *et al.*, 2014). A Tabela 5 mostra de maneira qualitativa a influência do teor de diferentes constituintes da mistura nos parâmetros reológicos da mesma.

Tabela 5 – Influência do aumento da proporção dos materiais constituintes da mistura sobre a trabalhabilidade (adaptado de TATTERSALL, 1991; apud CASTRO, 2007).

Causa do aumento no teor de	Resultando na mudança da	
	Tensão de escoamento	Viscosidade plástica
Água	Diminui	Diminui
Superplastificante	Diminui	Nenhuma
Finos	Depende da mistura considerada	
Cimento	Depende da mistura considerada	

O trabalho desenvolvido no Brasil por Teixeira *et al.* (2014) corrobora com os resultados apresentados na referida tabela 5.

#### 4 PROGRAMA EXPERIMENTAL E RESULTADOS

Com o objetivo de aprofundar o conhecimento a cerca da influência do agregado graúdo na dosagem de concretos de alta resistência foram realizados alguns estudos conforme mostrado no Figura 22.

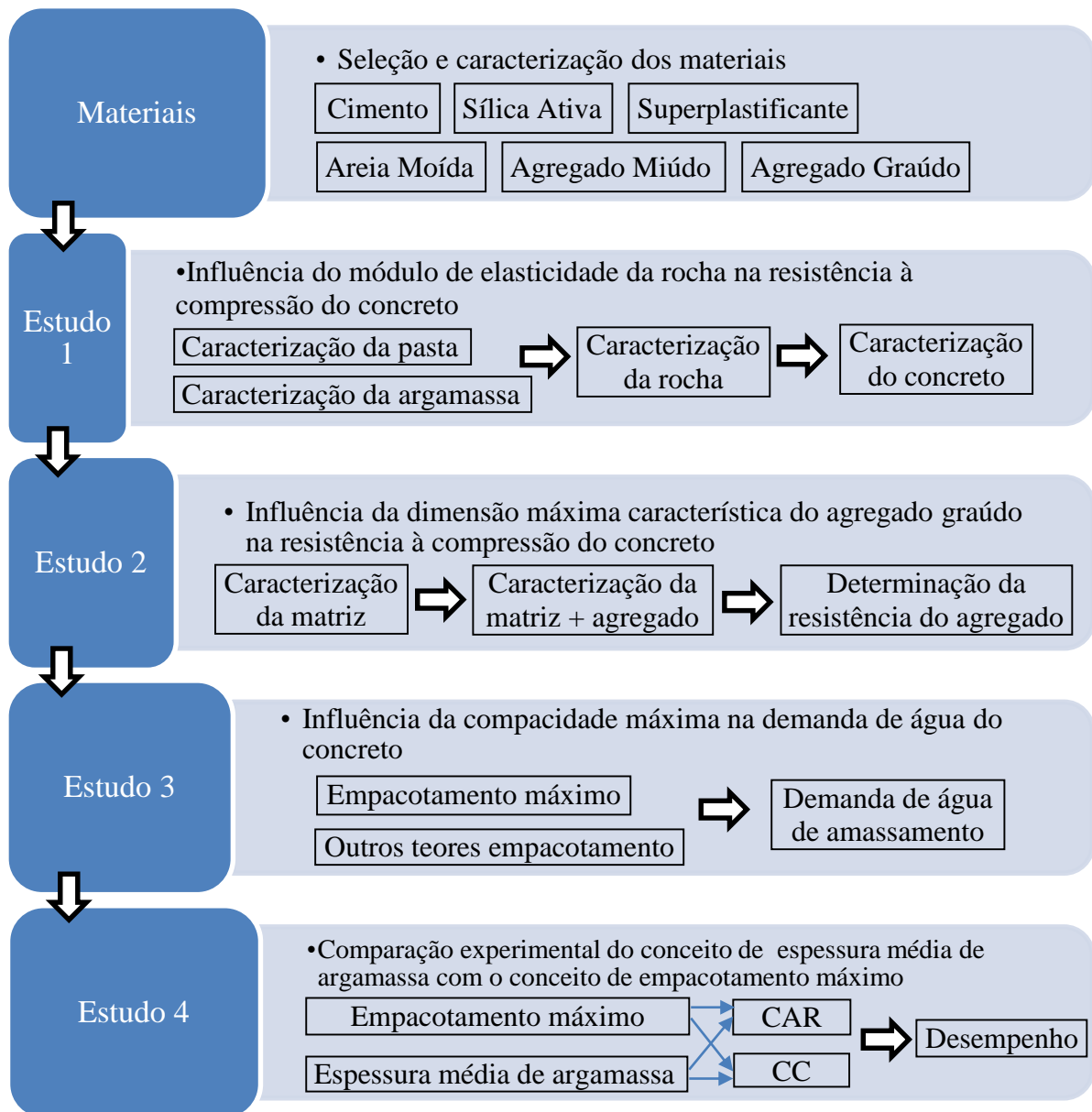


Figura 22 – Etapas do trabalho experimental.

Inicialmente realizou-se a caracterização dos materiais. O cimento, a sílica ativa, a areia moída, três areias com módulo de finura distintos, o superplastificante e o agregado graúdo empregado neste trabalho.

O estudo 1 busca contribuir com uma lacuna de conhecimento existente à cerca da influência do módulo de elasticidade da rocha na resistência à compressão do concreto de alta resistência. O estudo compõe-se da caracterização mecânica de três pastas e três argamassas com relações água/aglomerante de 0,17, 0,25 e 0,50, bem como, de três basaltos de diferentes origens. Estas pastas e argamassas são produzidas a partir dos traços de concreto de alta resistência estudados no trabalho de Rohden (2011) que empregou os mesmos basaltos caracterizados no presente trabalho. Após a caracterização das pastas, das argamassas e dos três basaltos os resultados são comparados com os concretos produzidos no trabalho de Rohden (2011).

No estudo 2 propõe-se uma nova metodologia para determinação da resistência à compressão do agregado graúdo com diferentes dimensões. O agregado graúdo é um dos limitadores da resistência à compressão do concreto de alta resistência, e a sua dimensão máxima característica é uma das características mais relevantes. No estudo são selecionadas três dimensões de partículas do agregado graúdo de basalto. As partículas tiveram sua forma caracterizada e foram dispersas em uma matriz de alta resistência para se determinar o gradiente de tensão existente entre as mesmas.

O estudo 3 discute a eficácia da aplicação do conceito de empacotamento máximo, adotado como a compacidade ótima para o agregado utilizado na dosagem do concreto de alta resistência. São dosados concretos com consumo de aglomerante constante, e esqueletos granulares com diferentes volumes de vazios.

No estudo 4, propõe-se um parâmetro alternativo ao empacotamento máximo para definição da composição granulométrica do agregado utilizado na produção de concreto de alta resistência. São dosados concretos de alta resistência e convencionais a partir do parâmetro proposto e do método proposto por Toralles-Carbonari (1996), sendo então os resultados comparados. É também realizada a caracterização reológica das pastas dos diferentes traços de concreto.

## 4.1 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

### 4.1.1 Materiais Ligantes

#### 4.1.1.1 Cimento

Para esta pesquisa optou-se por utilizar o cimento com menos adições, 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 um cimento Portland CP V ARI (cimento Portland de alta resistência inicial), cujas características químicas, físicas e mecânicas constam nas tabelas 6 e 7. Segundo as especificações da norma NBR 5733 (ABNT, 1991), o cimento utilizado respeita os limites com relação à proporção dos seus componentes químicos (Tabela 6), bem como em relação às suas exigências físicas e mecânicas (Tabela 7).

Tabela 6 – Características químicas do cimento Portland CP V ARI empregado<sup>10</sup>.

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 <sub>3</sub> ): - quando C <sub>3</sub> A do clínquer < 8%	3,11	< 3,5 %

Tabela 7 – Características físicas e mecânicas do cimento Portland CP V ARI empregado.

Características e propriedades	Umidade	Fabricante	Limites
		CP V ARI (NBR 5733, 1991)	
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 <sup>2</sup> /kg	446,7	>300
Resistência à compressão	1 dia	MPa	24,2
	3 dias	MPa	35,5
	7 dias	MPa	41,0
	28 dias	MPa	50,9
Massa específica determinada de acordo com NM 23 (ABNT, 2000) = 3,15 kg/dm <sup>3</sup>			

<sup>10</sup> Dados fornecidos pelo fabricante

A análise granulométrica a laser do cimento (Figura 23), feita no LACER – Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFRGS, forneceu um resultado de 11,41  $\mu\text{m}$  para o diâmetro médio das partículas de cimento.

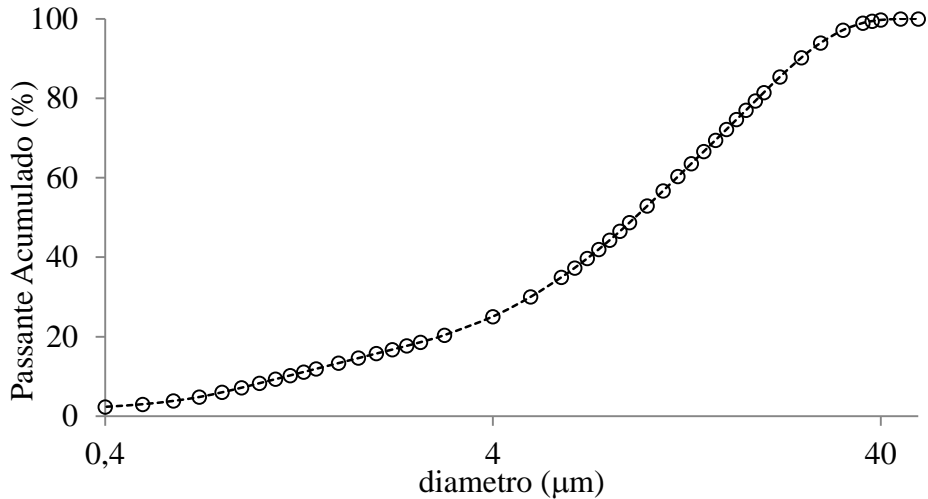


Figura 23 – Curva granulométrica do cimento Portland de alta resistência inicial utilizado.

A Tabela 8, apresenta um resumo da análise granulométrica com o percentual passante em algumas peneiras.

Tabela 8 – Composição granulométrica resumida do CPV ARI.

Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	% passante
1,17	10
9,30	50
24,83	90
11,41	Médio

#### 4.1.1.2 Sílica Ativa

O ensaio de granulometria a *laser* realizado no LACER – Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFRGS forneceu um resultado de 10,34  $\mu\text{m}$  para o diâmetro médio das partículas de sílica ativa, cuja curva está ilustrada na Figura 24.

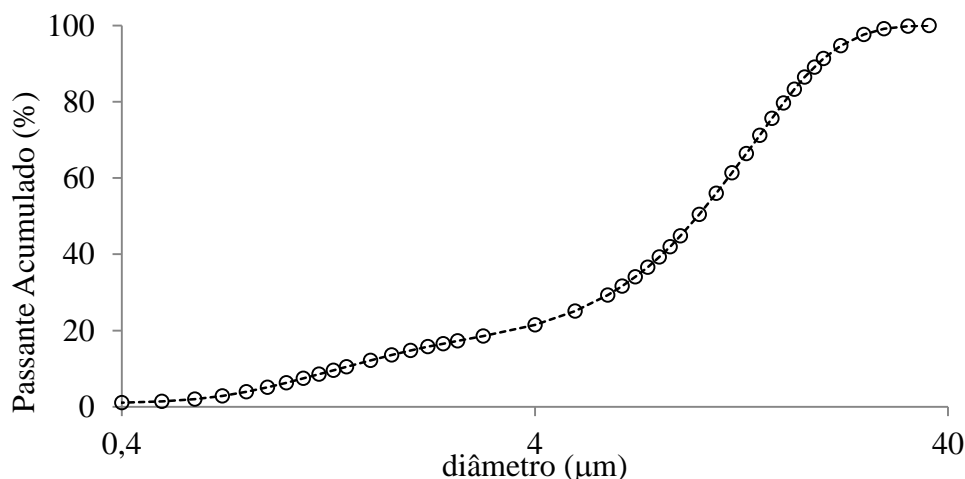


Figura 24 – Curva granulométrica da sílica ativa utilizada.

A Tabela 9 apresenta um resumo da análise granulométrica com o percentual passante em algumas peneiras.

Tabela 9 – Composição granulométrica resumida da sílica ativa.

Diâmetro (µm)	% passante
1,35	10
9,92	50
19,39	90
10,34	Médio

Observa-se que a análise granulométrica a laser foi realizada sem dispersante, após a dispersão propiciada pela presença do aditivo superplastificante presente no concreto o tamanho médio das partículas de sílica ativa é de 0,25 micrometros de acordo com Kulakowski (2002). A massa específica determinada de acordo com a NM 43 (ABNT, 2002) foi de 2,20 kg/dm<sup>3</sup>.

## 4.1.2 Agregados

### 4.1.2.1 Areia moída

A areia moída é comercializada para emprego na produção do vidro. O ensaio de granulometria a *laser* realizado no LACER – Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFRGS forneceu um resultado de 22,87 µm para o diâmetro médio das partículas da areia moída, cuja curva está ilustrada na Figura 25. A Tabela 10, apresenta um resumo da análise granulométrica com as peneiras equivalentes ao percentual passante acumulado de 10%, 50%, 90% e o diâmetro médio.

Tabela 10 – Composição granulométrica resumida da sílica moída.

Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	% passante
1,98	10
18,62	50
50,30	90
22,87	médio

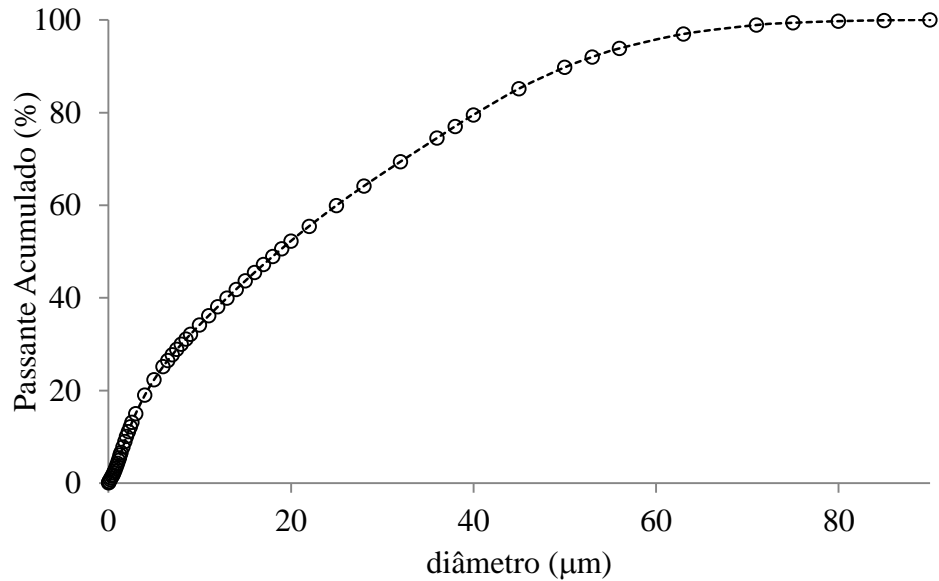


Figura 25 – Curva granulométrica da sílica moída utilizada.

Através do resultado do ensaio de granulometria da Figura 25 observa-se que as partículas de sílica moída são maiores do que as partículas de cimento, assim essas partículas contribuirão para um melhor preenchimento ou empacotamento granular do concreto, conferindo uma maior compacidade. A massa específica determinada de acordo com a NM 43 (ABNT, 2002) foi de  $2,61 \text{ kg/dm}^3$ .

#### 4.1.2.2 Agregado miúdo

Foram utilizados neste estudo três areias naturais quartzosas de diferentes granulometrias, oriundas do rio Jacuí, região de Porto Alegre. Foi realizado o ensaio de determinação da composição granulométrica do agregado seguindo-se os procedimentos preconizados na NM 248 (ABNT, 2003). As amostras foram denominadas como areia fina, areia média e areia grossa. A caracterização física da areia fina é apresentada na tabela 11. As tabelas 12 e 13 apresentam as características das areias média e grossa, respectivamente.



A Figura 26 apresenta as curvas granulométricas da areia grossa, média e fina. De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009) a curva granulométrica da areia fina encontra-se abaixo da zona utilizável inferior (ZUI). Assim este agregado só pode ser utilizado na produção de concreto se estudos prévios de dosagem atestem sua aplicabilidade ou então combinada com outra areia.

A curva granulométrica da areia média, como mostra a Figura 26, encontra-se entre a zona utilizável inferior (ZUI) e a zona ótima inferior (ZOI), atendendo aos limites estabelecidos na NBR 7211 (ABNT, 2009) quanto à distribuição granulométrica.

Tabela 11 – Caracterização física da areia fina.

Determinações	Método de ensaio	Resultados obtidos		
		Peneiras (mm)	% retida	% retida acumulada
Composição granulométrica	NM 248 (ABNT, 2003)	4,80	0	0
		2,40	0	0
		1,20	0	0
		0,60	0	0
		0,30	2	3
		0,15	46	49
		0,075	51	99
		Fundo	1	100
Dimensão máxima característica (mm)	NM 248 (ABNT, 2003)	0,30		
Módulo de finura	NM 248 (ABNT, 2003)	0,52		
Massa unitária (kg/dm <sup>3</sup> )	NM 52 (ABNT, 2009)	1,66		
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	NM 52 (ABNT, 2009)	2,60		

Tabela 12 – Caracterização física da areia média.

Determinações	Método de ensaio	Resultados obtidos		
		Peneiras (mm)	% Retida	% retida acumulada
Composição granulométrica	NM 248 (ABNT, 2003)	6,30	0	0
		4,80	2	2
		2,40	2	4
		1,20	3	7
		0,60	8	15
		0,30	42	57
		0,15	38	95
		0,075	6	100
	Fundo	1	100	
Dimensão máxima característica (mm)	NM 248 (ABNT, 2003)	2,40		
Módulo de finura	NM 248 (ABNT, 2003)	1,8		
Massa unitária (kg/dm <sup>3</sup> )	NM 52 (ABNT, 2009)	1,55		
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	NM 52 (ABNT, 2009)	2,61		

Já a curva granulométrica da areia grossa encontra-se próxima do limite superior da zona ótima (ZOS), atendendo aos limites estabelecidos para distribuição granulométrica pela norma NBR 7211 (ABNT, 2009).

Tabela 13 – Caracterização física da areia grossa.

Determinações	Método de ensaio	Resultados obtidos		
		Peneiras (mm)	% Retida	% retida acumulada
Composição granulométrica	NM 248 (ABNT, 2003)	6,30	0	0
		4,80	5	5
		2,40	8	13
		1,20	15	28
		0,60	30	58
		0,30	32	90
		0,15	8	98
		0,075	1	99
		Fundo	1	100
Dimensão máxima característica (mm)	NM 248 (ABNT, 2003)	4,80		
Módulo de finura	NM 248 (ABNT, 2003)	2,92		
Massa unitária (kg/dm <sup>3</sup> )	NM 52 (ABNT, 2009)	1,70		
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	NM 52 (ABNT, 2009)	2,63		

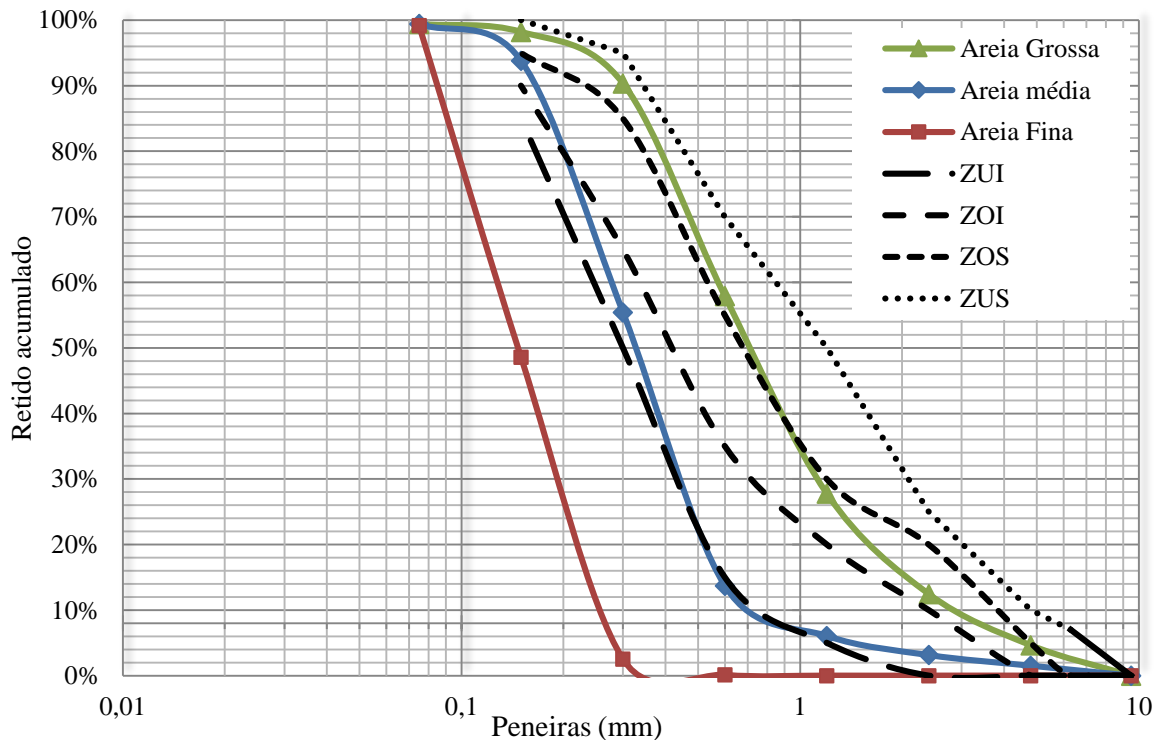


Figura 26 – Curva granulométrica dos agregados miúdos utilizados.

#### 4.1.2.3 Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado neste trabalho foi um basalto oriundo da cidade de Montenegro/RS. Utilizaram-se duas frações do material, denominados comercialmente como brita zero e brita 1.

##### 4.1.2.3.1 Massa específica

Foram realizados os ensaios de determinação de massa específica na condição saturada superfície seca, massa específica seca em estufa e de absorção de acordo com a NM 53 (ABNT, 2009). Estes últimos ensaios foram feitos para cada fração granulométrica separadamente e estão resumidos na Tabela 14.

Observa-se que tanto a massa específica na condição saturada superfície seca quanto a massa específica na condição aparente seca independem da fração granular. Já a absorção é diretamente proporcional a área específica do esqueleto granular.

Tabela 14 – Caracterização física do agregado graúdo.

Massa específica na condição saturado superfície seca	
Ø retido (mm)	(kg/dm <sup>3</sup> )
19	2,93
12,5	2,93
9,5	2,93
6,3	2,92
4,8	2,92
Massa específica na condição aparente seca	
Ø retido (mm)	(kg/dm <sup>3</sup> )
19	2,96
12,5	2,96
9,5	2,97
6,3	2,98
4,8	3,00
Absorção	
Ø retido (mm)	(%)
19	0,48
12,5	0,70
9,5	0,90
6,3	1,10
4,8	1,26

#### 4.1.2.3.2 Índice de forma

O ensaio de índice de forma foi realizado de acordo com a norma NBR 7809 (ABNT, 2006). 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. De cada amostra de agregado são ensaiadas 200 partículas. Assim determinou-se o índice de forma como sendo igual a 2,12 para o agregado brita zero (BZ) e igual a 2,00 para brita 1 (B1).

#### 4.1.2.3.3 Análise granulométrica

A Tabela 15 apresenta a análise granulométrica determinada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003) do agregado graúdo classificado comercialmente como brita zero (BZ). Na figura 27 está disposta a curva granulométrica deste agregado, que situa-se na zona granulométrica (ZG) 4,75-12,5. Desta maneira, a distribuição atende aos limites indicados pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

A Tabela 16 apresenta a análise granulométrica determinada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003) do agregado graúdo classificado comercialmente como brita 1 (B1). Na figura 27 está disposta a curva granulométrica deste agregado, que situa-se fora da zona granulométrica (ZG) 9,5-25. Desta maneira a distribuição não atende aos limites indicados pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

Tabela 15 – Caracterização física do agregado graúdo brita zero.

Determinações	Método de ensaio	Resultados obtidos		
		Peneiras (mm)	% retida	% retida acumulada
Composição granulométrica	NM 248 (ABNT, 2003)	25	0	0
		19	0	0
		12,5	2	2
		9,5	12	14
		6,3	50	64
		4,8	25	89
		2,4	11	100
		Fundo	0	100
Dimensão máxima característica (mm)	NM 248 (ABNT, 2003)	12,5		
Modulo de finura	NM 248 (ABNT, 2003)	6,03		

Tabela 16 – Caracterização física do agregado graúdo brita 1.

Determinações	Método de ensaio	Resultados obtidos		
		Peneiras (mm)	% Retida	% retida acumulada
Composição granulométrica	NM 248 (ABNT, 2003)	25	0	0,00
		19	18	18
		12,5	82	100
		9,5	0	100
		6,3	0	100
		4,8	0	100
		Fundo	0	100
Dimensão máxima característica (mm)	NM 248 (ABNT, 2003)	25		
Modulo de finura	NM 248 (ABNT, 2003)	7,18		

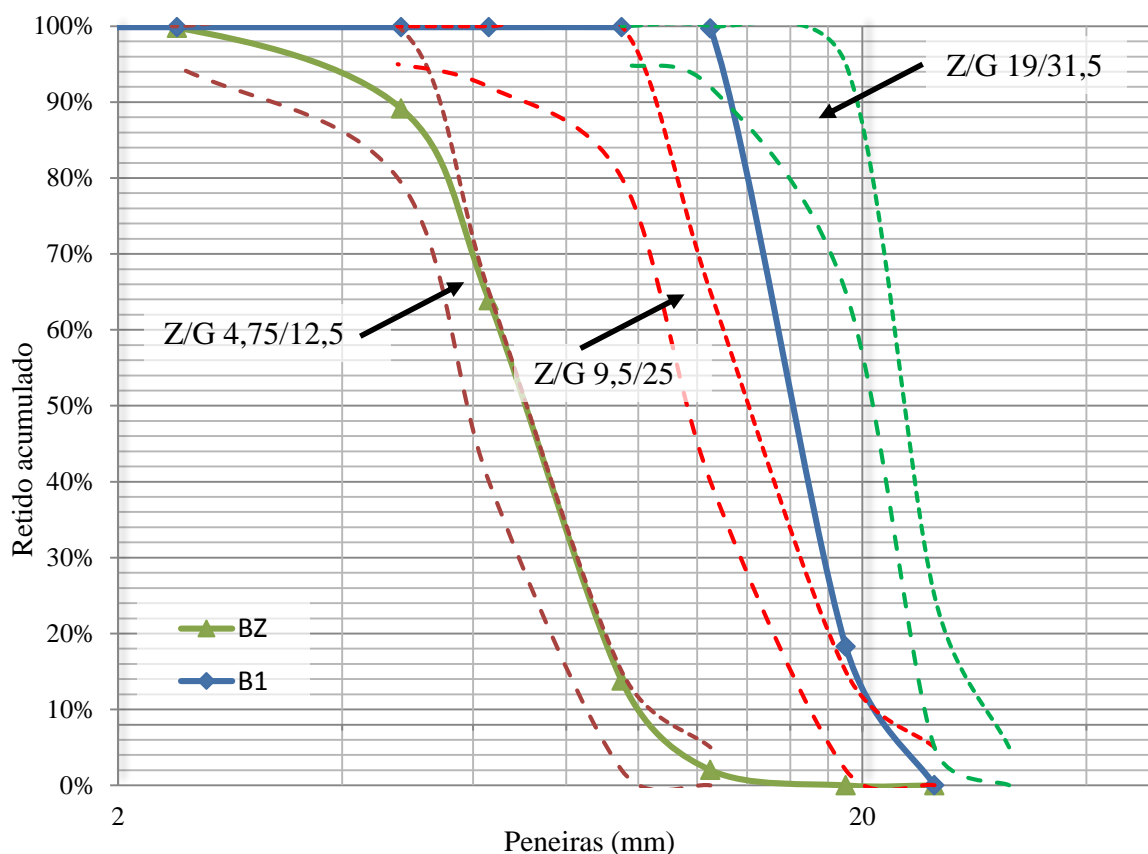


Figura 27 – Distribuição granulométrica.

#### 4.1.2.3.4 Resistência à compressão da rocha

Também se realizou, a partir de amostras de rocha coletadas na central de britagem, o ensaio de resistência à compressão da rocha. Os corpos de prova foram produzidos com formato cúbico, com dimensão de arestas entre 7 e 7,5 cm. Foi utilizada uma serra circular diamantada

na preparação dos corpos de prova, seguindo o método proposto pela norma NBR 12767 (ABNT, 1992).

Os corpos de prova foram ensaiados na condição seca e a taxa de aplicação de carga adotada no ensaio foi 0,45 MPa/s. Na Tabela 17 são apresentados os valores de resistência à compressão e o desvio padrão encontrados neste ensaio. Não foram encontrados planos de clivagem nas amostras ensaiadas.

Tabela 17 – Resistência à compressão da rocha utilizada como agregado graúdo.

Aresta 1 (mm)	Aresta 2 (mm)	Altura 3 (mm)	Força (kN)	Área da base (mm <sup>2</sup> )	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
72,04	72,13	72,09	1108,4	5196	213,3	218,6	4,9
72,08	72,09	72,07	1142,1	5196	219,8		
72,14	72,17	72,19	1159,9	5206	222,8		

### 4.1.3 Aditivo Superplastificante

Plastificantes são considerados essenciais para a trabalhabilidade do concreto fresco bem como para propriedades do concreto endurecido. Vários tipos de aditivos com diferentes capacidades dispersantes têm sido aplicados no proporcionamento de concretos de alta resistência nas últimas décadas sendo os policarboxilatos (também chamados de aditivos de 3<sup>o</sup> geração ou superplastificantes) os mais utilizados nos dias atuais (ZHANG e KONG, 2015). O aditivo utilizado no presente trabalho foi um superplastificante de 3<sup>a</sup> 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 a base química – policarboxilato; densidade – 1,067 à 1,107 g/cm<sup>3</sup>; pH – 5 à 7; e o teor de sólidos – 38 à 40%.

#### 4.1.3.1 Demanda de água

O ensaio de demanda de água tem por objetivo determinar a quantidade de água necessária para a obtenção da pasta de consistência normal de acordo com a norma NM 43 (ABNT, 2002). No presente trabalho realizou-se a determinação da demanda de água para os teores de 0%, 0,25%; 0,50% e 1,00% de aditivo superplastificante. A partir da demanda de água determinou-se a relação água/aglomerante equivalente a cada percentual de aditivo superplastificante. A curva que descreve a relação entre o percentual de aditivo e a relação/água aglomerante necessária

para obter uma pasta de consistência normal está apresentada na figura 33. Todos os ensaios foram realizados com massa de cimento de 500 gramas mais 50 gramas de sílica ativa.

#### 4.1.3.2 Cone Marsh

O ensaio de cone Marsh foi utilizado para determinar o ponto de saturação do aditivo superplastificante para diferentes relações água/aglomerante. No Brasil, a parte 2 da norma NBR 7681 (ABNT, 2013) apresenta o método de determinação do índice de fluidez e da vida útil de calda de cimento para injeção. O equipamento utilizado neste trabalho foi o descrito na referida norma.

Já os procedimentos de determinação do ponto de saturação do aditivo seguiram as recomendações da norma americana ASTM C939/2002. O ensaio para medir o tempo de fluidez e o ponto de saturação consiste da produção da pasta, da passagem da mistura pelo cone e da determinação do seu tempo de fluidez.

A pasta foi preparada para cada ensaio introduzindo-se 2000 gramas de cimento na cuba do misturador planetário junto com a quantidade de água da mistura. O misturador planetário utilizado apresenta as dimensões e velocidades descritas na norma NM 43 (ABNT, 2002). Também foi adicionado 1/3 do superplastificante. Em velocidade lenta as misturas foram homogeneizadas por 120 segundos, adicionou-se então 200 gramas de sílica ativa, mudando-se então a velocidade para rápida e mantendo-a por 240 segundos. Adicionou-se então o segundo terço de aditivo superplastificante que foi novamente misturado durante 120 segundos. Por último adicionou-se à mistura o terço restante do aditivo, misturando-se por mais 120 segundos.

Preparada a pasta, verte-se a mesma no cone, tomando a precaução de tapar a abertura inferior do aparato. Abre-se a abertura inferior e neste instante se inicia a determinação do tempo com auxílio de um cronômetro. A leitura final corresponde ao tempo para o qual 200 ml da pasta tenha passado através da abertura inferior. Utilizou-se uma proveta para se determinar o volume de 200 ml. Este procedimento também foi adotado no trabalho de Toralles-Carbonari (1996).

Neste trabalho se entende como ponto de saturação o percentual de superplastificante a partir do qual não há melhoras significativas na fluidez. Para tanto determinou-se o tempo de escoamento para teores variados de superplastificantes. A figura 28 apresenta a curva que

relaciona o tempo de escoamento da pasta com o percentual de aditivo superplastificante, sendo a relação água/aglomerante igual a 0,20.

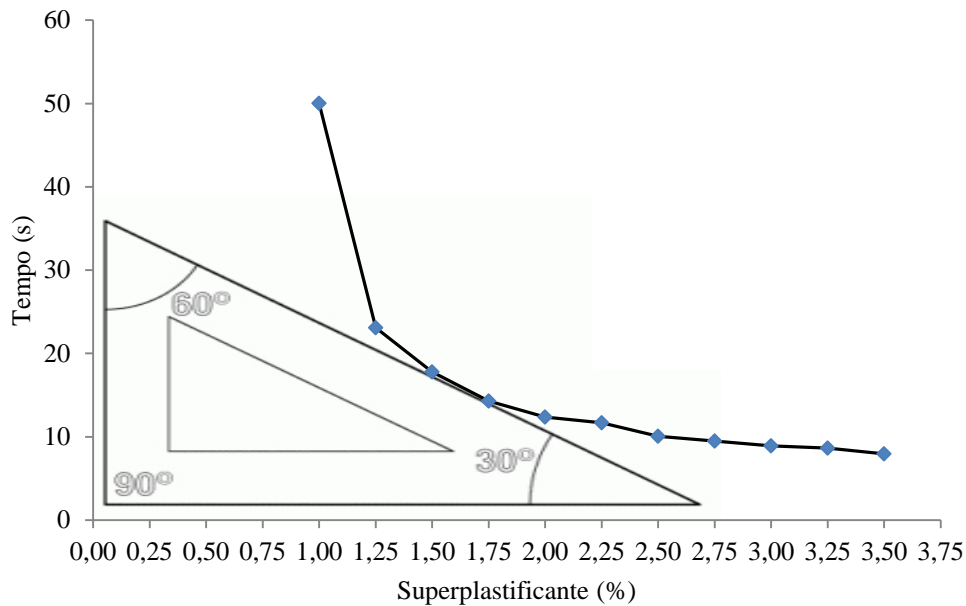


Figura 28 – Determinação gráfica do ponto de saturação do aditivo superplastificante para relação água/aglomerante 0,20.

O critério adotado para definir o ponto de saturação a partir da curva de comportamento do tempo de escoamento da pasta versus percentual de superplastificante foi a inclinação de 1:2 como indicado na figura 28. Para a relação água/aglomerante 0,20 o ponto de saturação foi definido como 1,75% de aditivo.

A figura 29 apresenta a curva de comportamento do tempo de escoamento da pasta versus percentual de superplastificante para a relação água/aglomerante 0,25, na qual o ponto de saturação foi definido graficamente como 1,25%. A figura 30, figura 31 e figura 32 apresentam as curvas de comportamento do tempo de escoamento da pasta versus percentual de superplastificante para as relações água/aglomerante 0,30; 0,35 e 0,40, respectivamente. O ponto de saturação foi definido como 0,75% para as relações água/aglomerante 0,30 e 0,35, e igual a 0,25 % para a relação água/aglomerante 0,40.



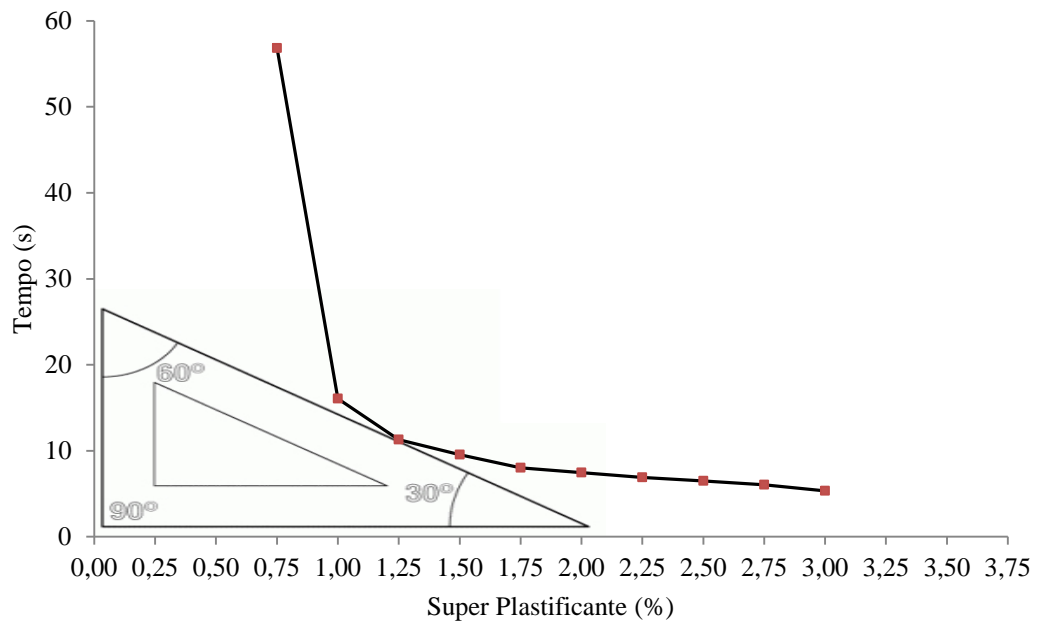


Figura 29 – Determinação gráfica do ponto de saturação do aditivo superplastificante para relação água/aglomerante 0,25.

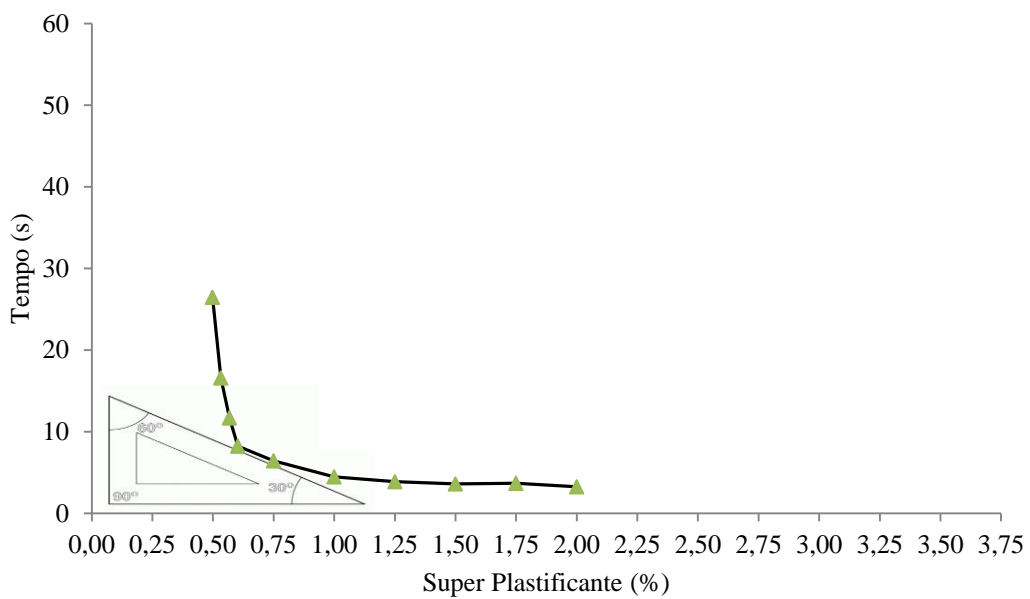


Figura 30 – Determinação gráfica do ponto de saturação do aditivo superplastificante para relação água/aglomerante 0,30.

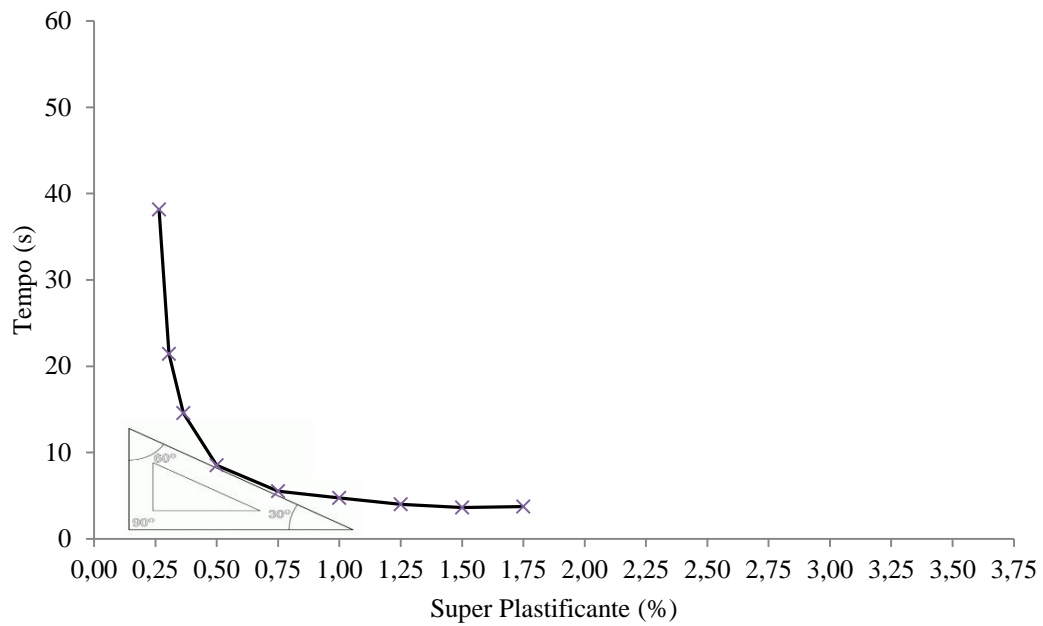


Figura 31 – Determinação gráfica do ponto de saturação do aditivo superplastificante para relação água aglomerante 0,35.

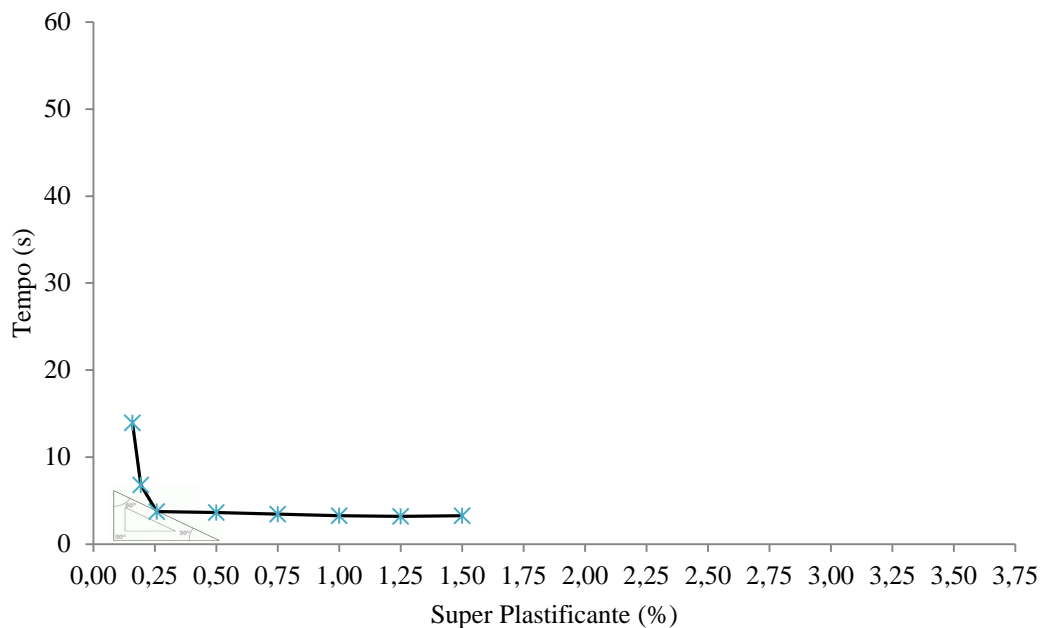


Figura 32 – Determinação gráfica do ponto de saturação do aditivo superplastificante para relação água aglomerante 0,40.

O gráfico apresentado na figura 33 relaciona o percentual de aditivo superplastificante com a relação água/aglomerante. O limite inferior (LI) desta relação é definido pela demanda de água e o limite superior (LS) é definido pelo ponto de saturação. A figura 33 assim mostra o domínio de utilização do aditivo superplastificante ou o percentual mínimo e máximo de aditivo superplastificante em função de cada relação água/aglomerante.

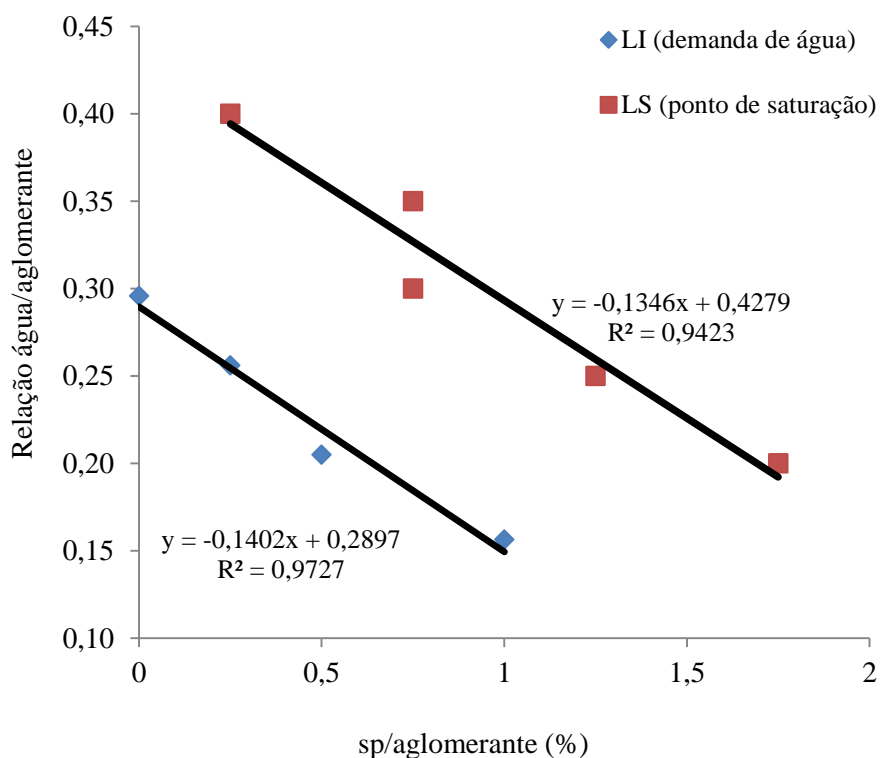


Figura 33 – Limite inferior e superior para determinação da relação água/aglomerante encontradas no presente trabalho em função do teor de superplastificante.

## 4.2 ESTUDO 1 - INFLUÊNCIA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DA ROCHA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO

### 4.2.1 Estudo 1 – Metodologia

Rohden (2011) estudou três diferentes tipos de basaltos com resistências à compressão de 130 MPa (B130), 150 MPa (B150) e 220 MPa (B220) e constatou a influência da resistência à compressão da rocha na resistência à compressão do concreto. Para concretos de alta resistência verificou uma diferença estatisticamente significativa na resistência dos concretos produzidos com os diferentes agregados.

Contrariamente ao que concluíram outros autores como Ke-Ru-Wu *et al.* (2001), os resultados experimentais do trabalho de Rohden (2011) não confirmam o princípio da resistência potencial do agregado. Diferentemente disto, observou-se um aumento da resistência à compressão do concreto diretamente proporcional à aproximação da resistência da rocha com a resistência do

concreto produzidos, respeitando-se a premissa de que o agregado sempre apresenta resistência superior à resistência do concreto produzido.

A Equação 20 representa o modelo de comportamento definido por Rohden (2011) para a resistência à compressão do concreto em função da resistência da rocha utilizada como agregado. O coeficiente de determinação do modelo apresenta um  $r^2=0,9707$ .

$$f_c = \frac{308}{1.000^{a/a}} + \frac{78,4}{\phi_{max}^{0,125}} - 11,8 \times \log(f_{cr}) \quad \text{Equação 20}$$

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

$a/a$  - relação água/aglomerante

$\phi_{max}$  - dimensão máxima do agregado graúdo

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

A figura 34 apresenta os dados gerados a partir do modelo apresentado na Equação 20.

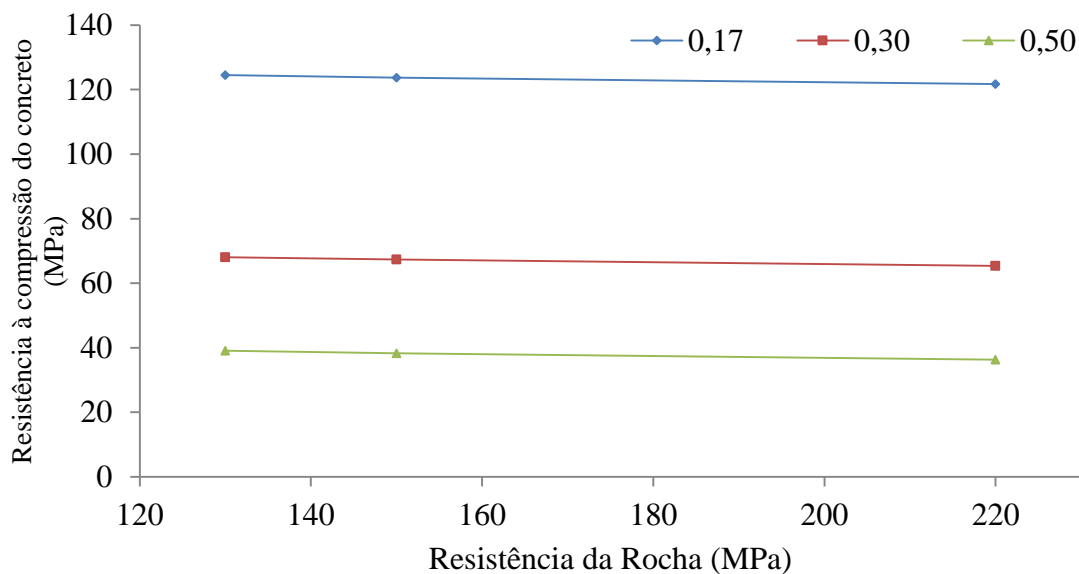


Figura 34 – Efeito da resistência à compressão da rocha na resistência à compressão do concreto para diferentes relações água/aglomerante, considerando a dimensão máxima característica do agregado igual a 19,0 mm.

A figura 34 mostra a relação entre a resistência à compressão do concreto e a do agregado graúdo. Para o concreto de resistência à compressão o efeito da resistência do agregado graúdo na resistência à compressão do concreto não é significativa. No concreto de resistência normal, fissuras podem existir na zona de transição antes mesmo do concreto ser submetido a qualquer

carga externa. Sob carga, estas pequenas fissuras microscópicas podem se interconectar, até que para carga máxima toda a estrutura interna falha completamente.

Para os concretos de maior resistência, nos quais a resistência da argamassa do concreto supera a resistência do agregado, as fissuras se estendem através do agregado, o que torna o agregado gráúdo um limitador da resistência à compressão do concreto, como já fora constatado em outros estudos (KE-RU-WU, *et al.*, 2001; DE LARRARD, F.; BELLOC, A., 1997). Para o concreto produzido com a rocha B130 e a menor relação água / aglomerante constatou-se este efeito (ROHDEN, 2011).

Contudo, respeitada esta condição baseado nos resultados mostrados na figura 34, pode-se afirmar que o aumento da resistência do agregado não é convertido no aumento da resistência do concreto. É importante destacar que, diferentemente do trabalho de Ke-Ru-Wu *et al.* (2001), no trabalho de Rohden (2011) o agregado de menor resistência à compressão apresentava resistência equivalente ao concreto de maior resistência.

No presente estudo foram realizados ensaios para aprofundar a investigação do efeito das propriedades do agregado gráúdo nas propriedades mecânicas do concreto. Para isso, foram extraídos corpos de prova de blocos das rochas que foram empregadas no estudo de Rohden (2011). Utilizou-se uma extratora do tipo serra copo diamantada. Os corpos de prova extraídos dos blocos de rocha apresentavam diâmetro de 50 mm. Após a extração os mesmos foram serrados em suas extremidades de forma que apresentassem comprimento de 100 mm. Os corpos de prova receberam então um polimento, já que esta técnica de tratamento superficial tem se mostrado como uma das mais eficientes entre as comumente utilizadas na área de controle tecnológico do concreto (CHIES *et al.*, 2014).

O ensaio para determinação do módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial da rocha foi realizado seguindo as recomendações da NBR 8522 (ABNT, 2008). Utilizou-se assim os mesmos procedimentos empregados na determinação do módulo de elasticidade do concreto.

Uma vez caracterizada a rocha os demais componentes do concreto foram estudados. Para isso, foram produzidas pastas e argamassas com os mesmos materiais utilizados no trabalho de Rohden (2011). A tabela 18 apresenta os traços de concreto, em volume absoluto, utilizados no

referido trabalho. As tabelas 19 e 20 apresentam os traços utilizados na produção das pastas e das argamassas produzidas no presente trabalho.

Foram produzidos oito corpos de prova de 50 x 100 mm para cada traço e com estes foram realizados os ensaios de resistência à compressão e de módulo de elasticidade de cada mistura, na idade de 28 dias. Todos os procedimentos de moldagem das pastas e argamassas seguiram as recomendações da NBR 7215 (ABNT, 1996).

Tabela 18 – 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

(Fonte: ROHDEN, 2011)

Tabela 19 – Traços das pastas em kg utilizados no estudo.

a/a	Água	Pasta	
		Cimento	Sílica Ativa
0,17	115,0	609,5	67,7
0,21	130,0	567,0	63,0
0,25	145,0	524,5	58,3
0,30	160,0	482,0	53,6
0,50	200,0	368,6	41,0

Tabela 20 – Traços de argamassa em kg utilizados no estudo.

a/a	Água	Argamassa		
		Cimento	Sílica Ativa	Areia
0,17	115,0	609,5	67,7	598
0,21	130,0	567,0	63,0	615
0,25	145,0	524,5	58,3	650
0,30	160,0	482,0	53,6	701
0,50	200,0	368,6	41,0	769

#### 4.2.1.1 Resistência à compressão

Para determinação da resistência à compressão os corpos de prova foram retificados e ensaiados na idade de 28 dias. Os procedimentos de cura e determinação da carga de ruptura seguiram as recomendações da NBR 7215 (ABNT, 1996). A velocidade de carregamento empregada no ensaio seguiu a recomendação da NBR 5739 (ABNT, 2007), sendo adotada a velocidade de carregamento de 0,45 MPa/s.

#### 4.2.1.2 Módulo de elasticidade

O ensaio para determinação do módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial da rocha foi realizado seguindo as recomendações da NBR 8522 (ABNT, 2008). Foram utilizados os mesmos procedimentos empregados na determinação do módulo de elasticidade do concreto.

O instrumento utilizado para medição das deformações foi um medidor mecânico com resolução de  $1 \pm 10^{-3}$  mm e erro relativo máximo inferior a 1%. Os pontos utilizados no cálculo do módulo de elasticidade foram a tensão e a deformação correspondente a 0,5 MPa e a tensão e a deformação correspondente a 30% da carga de ruptura.

#### 4.2.2 Resultados do Estudo 1 – Influência do módulo de elasticidade da rocha na resistência à compressão do concreto

A tabela 21 e a tabela 22 apresentam a resistência à compressão da pasta e da argamassa, respectivamente, produzidas com as mesmas proporções e materiais utilizados nos concretos estudados por Rohden (2011). Os resultados apresentam coeficiente de variação elevado, especialmente para pasta de relação água/aglomerante mais baixa. Isto se deve às dificuldades na preparação dos corpos de prova de diâmetro de 50 mm. Devido ao valor elevado do coeficiente de variação, também são destacados nas referidas tabelas o valor da resistência potencial à compressão.

Tabela 21 – Resistência à compressão da pasta para diferentes relações água/aglomerante.

Relação a/a	Resistência à compressão (MPa)				Potencial (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	C.V. %
0,17	147,7	124,6	123,0	116,6	147,7	128,0	13,6	10,6%
0,21	108,5	110,1	124,9	123,2	124,9	116,7	8,6	7,4%
0,25	109,8	103,9	104,7	101,2	109,8	104,9	3,6	3,4%
0,30	84,0	81,2	90,0	81,2	90,0	83,1	2,4	2,8%
0,50	46,8	46,9	48,9	47,1	48,9	47,4	1,0	2,1%

Tabela 22 – Resistência à compressão da argamassa para diferentes relações água/aglomerante.

Relação a/a	Resistência à compressão (MPa)				Potencial (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	C.V. %
0,17	136,1	122,4	139,3	135,2	139,3	136,9	7,4	5,4%
0,21	108,8	102,0	107,6	119,0	119,0	109,3	7,1	6,5%
0,25	104,8	87,6	96,2	90,8	104,8	94,8	7,5	7,9%
0,30	86,1	82,6	83,9	82,8	86,1	84,8	3,5	4,1%
0,50	45,5	45,3	42,2	44,9	45,5	44,5	1,6	3,5%

A Figura 35 apresenta a comparação entre os valores de resistência potencial da pasta e da argamassa estudadas. O comportamento identificado mostra que há um decréscimo da resistência à compressão da argamassa em relação à da pasta de mesma relação água/aglomerante. Este comportamento era esperado tendo em vista que a presença da areia na argamassa implica na presença da zona de transição que limita a resistência à compressão.



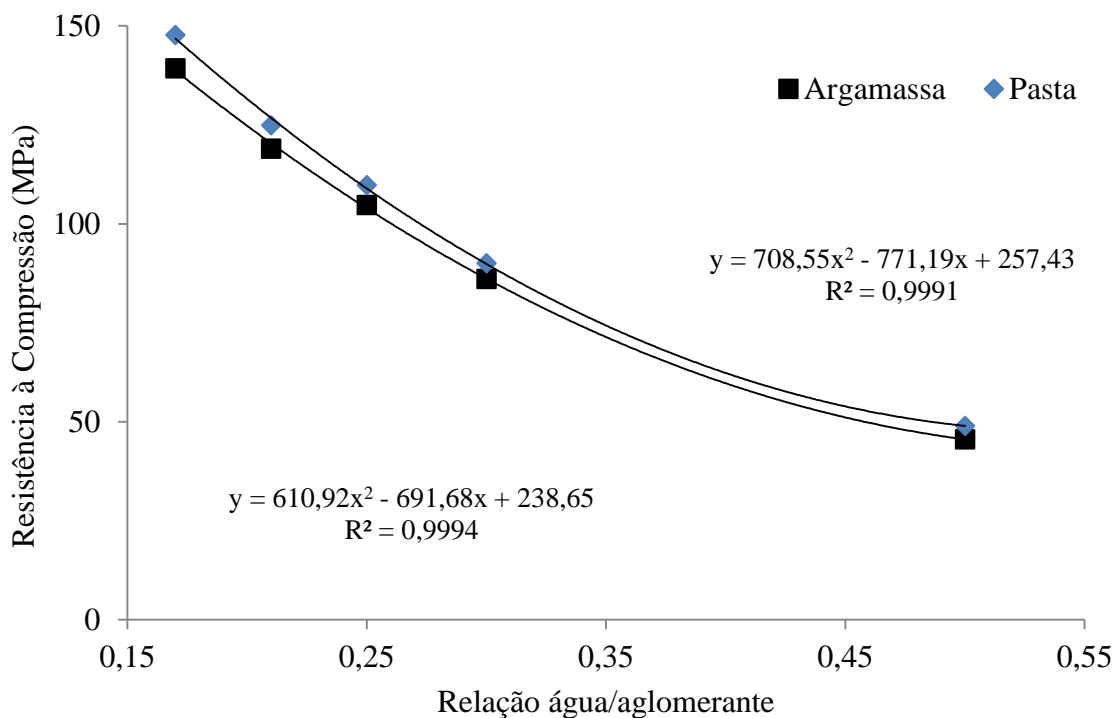


Figura 35 – Resistência à compressão potencial da pasta e da argamassa para diferentes relações água/aglomerante.

As Tabela 23 e Tabela 24 apresentam o módulo de elasticidade da pasta e das argamassas produzidas.

Tabela 23 – Módulo de elasticidade das pastas para diferentes relações água/aglomerante.

Relação a/a	Módulo de elasticidade (GPa)				Média (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Coeficiente de Variação (%)
0,17	36,71	31,11	30,42	33,18	32,9	2,83	8,60
0,21	28,58	27,74	28,82	32,05	29,3	1,89	6,45
0,25	26,03	23,13	22,88	23,96	24,0	1,43	5,96
0,30	18,23	19,16	19,72	19,67	19,2	0,69	3,59
0,50	13,01	10,55	11,50	12,04	11,8	1,03	8,73

Tabela 24 – Módulo de elasticidade das argamassas para diferentes relações água/aglomerante.

Relação a/a	Módulo de elasticidade (GPa)				Média (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Coeficiente de Variação (%)
0,17	44,52	43,81	43,07	45,33	44,2	0,97	2,19
0,21	38,14	37,38	37,17	40,62	38,3	1,59	4,15
0,25	38,94	36,31	37,28	36,69	37,3	1,16	3,11
0,30	33,97	31,90	32,06	33,38	32,8	1,01	3,08
0,50	22,48	22,73	24,88	25,31	23,8	1,45	6,09

A Figura 36 apresenta a comparação entre o módulo de elasticidade da pasta e de argamassa para diferentes relações água/aglomerante. As argamassas apresentam em média um módulo

de elasticidade 12 GPa maior do que as pastas de mesma relação água/aglomerante. O fato de o módulo de elasticidade da argamassa ser maior do que o módulo de elasticidade da pasta se deve a presença da areia quartzosa.

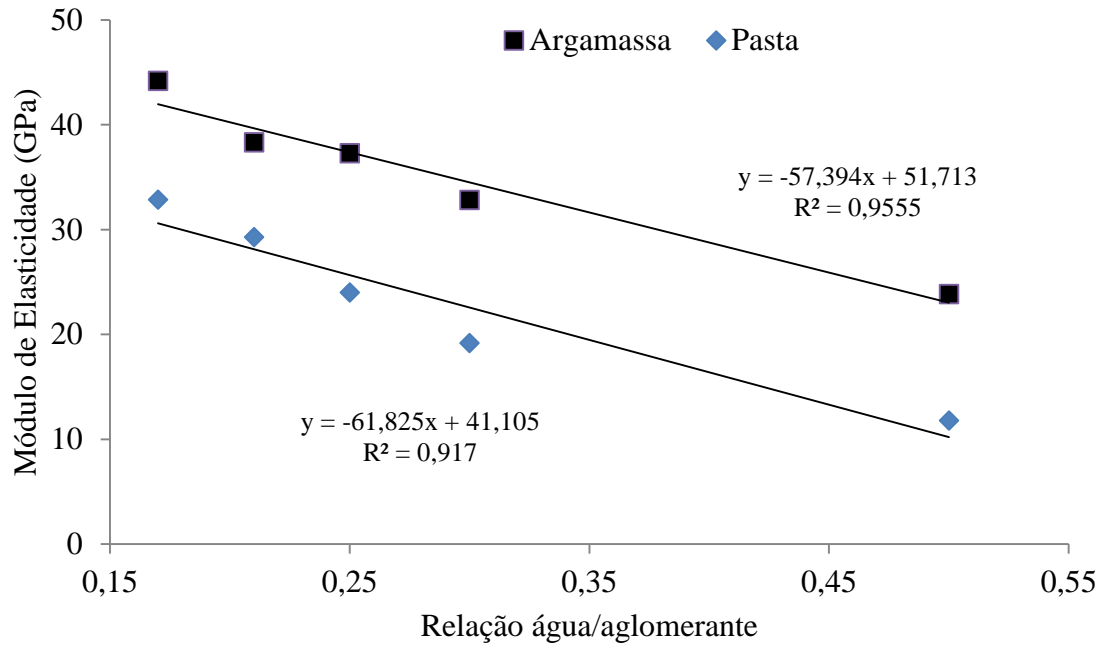


Figura 36 – Módulo de elasticidade da pasta e da argamassa para diferentes relações água/aglomerante.

A figura 37 apresenta o módulo de elasticidade das rochas estudadas no trabalho de Rohden (2011).

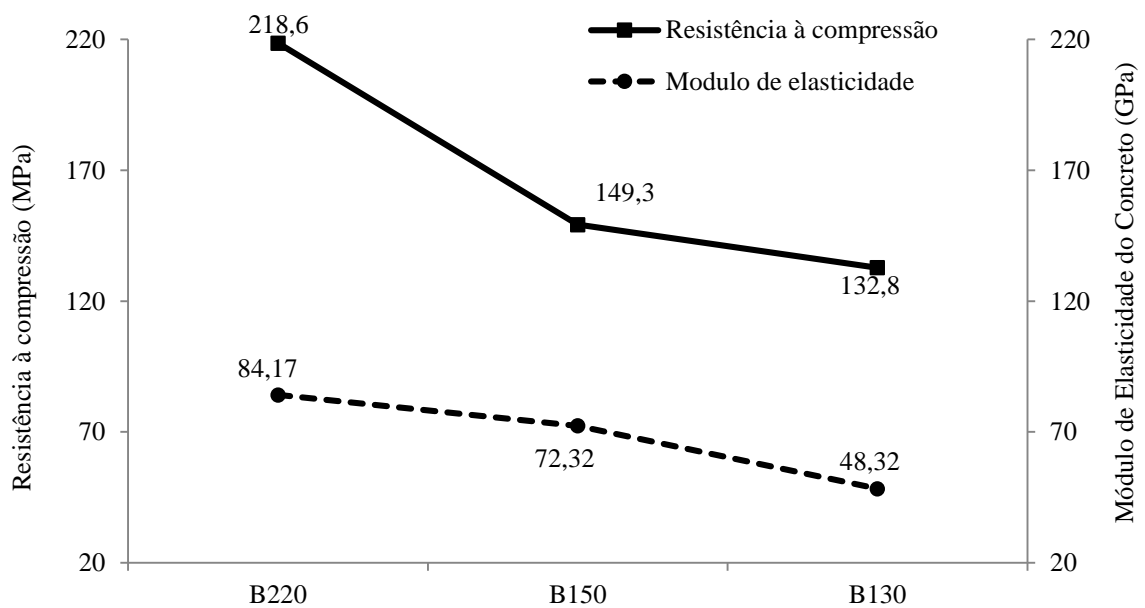


Figura 37 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade das rochas utilizadas como agregado graúdo.

Observa-se na figura 37 que o módulo de elasticidade acompanha a resistência à compressão da rocha, isto é, quanto maior a resistência da rocha maior o módulo de elasticidade da rocha. É importante destacar que todas as rochas apresentam a mesma litologia.

#### 4.2.2.1 Resistência à compressão do concreto

As figuras 38 a 42 apresentam a relação entre a resistência à compressão do concreto estimada segundo o modelo proposto por Rohden (2011), e a diferença existente entre o módulo de elasticidade da argamassa e o módulo de elasticidade da rocha, utilizada como agregado graúdo. A diferença de módulo de elasticidade da fase agregado graúdo e da fase argamassa durante o processo de carregamento, implica em deformações diferentes nas duas fases. A diferença de deformações por sua vez implica em tensões na interface argamassa/agregado graúdo. As tensões geradas por este efeito são proporcionais à diferença existente entre o módulo da fase agregado e da fase argamassa. Os resultados apresentados mostram que a resistência à compressão é tanto maior quanto menor a diferença entre o módulo de elasticidade da rocha e o da argamassa.

Zhou *et al.* (1995) produziram um conjunto de misturas de concreto de alta resistência 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. Os resultados apresentados por Zhou *et al.* (1995) 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 ao da argamassa.

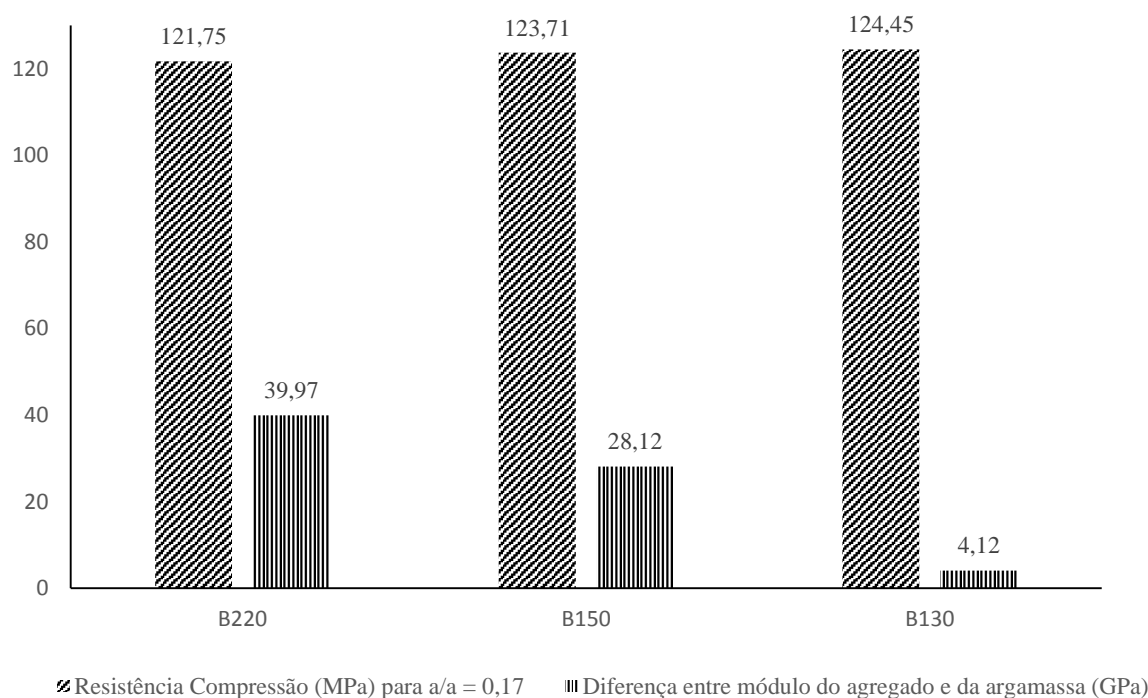


Figura 38 – Relação entre a diferença de módulo de elasticidade da fase agregado e da fase argamassa e a resistência à compressão dos concretos calculada a partir do modelo apresentado na equação 20 com relação água/aglomerante 0,17 e diferentes agregados.

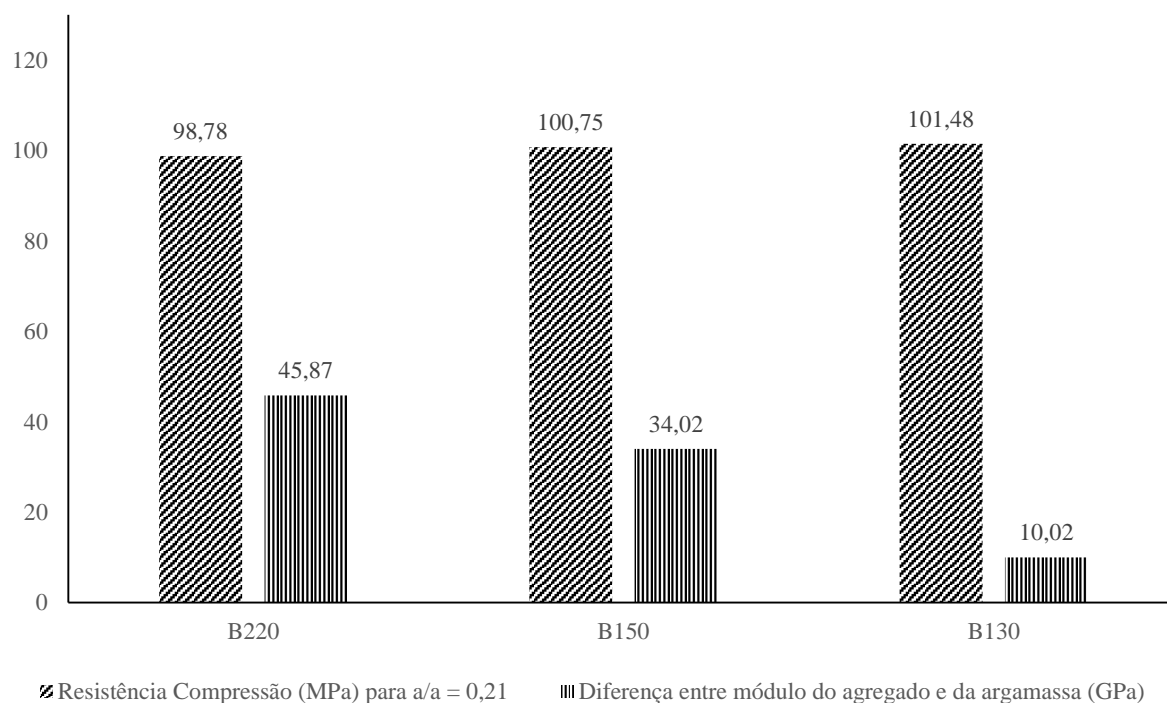


Figura 39 – Relação entre a diferença de módulo de elasticidade da fase agregado e da fase argamassa e a resistência à compressão dos concretos calculada a partir do modelo apresentado na equação 20 com relação água/aglomerante 0,21 e diferentes agregados.

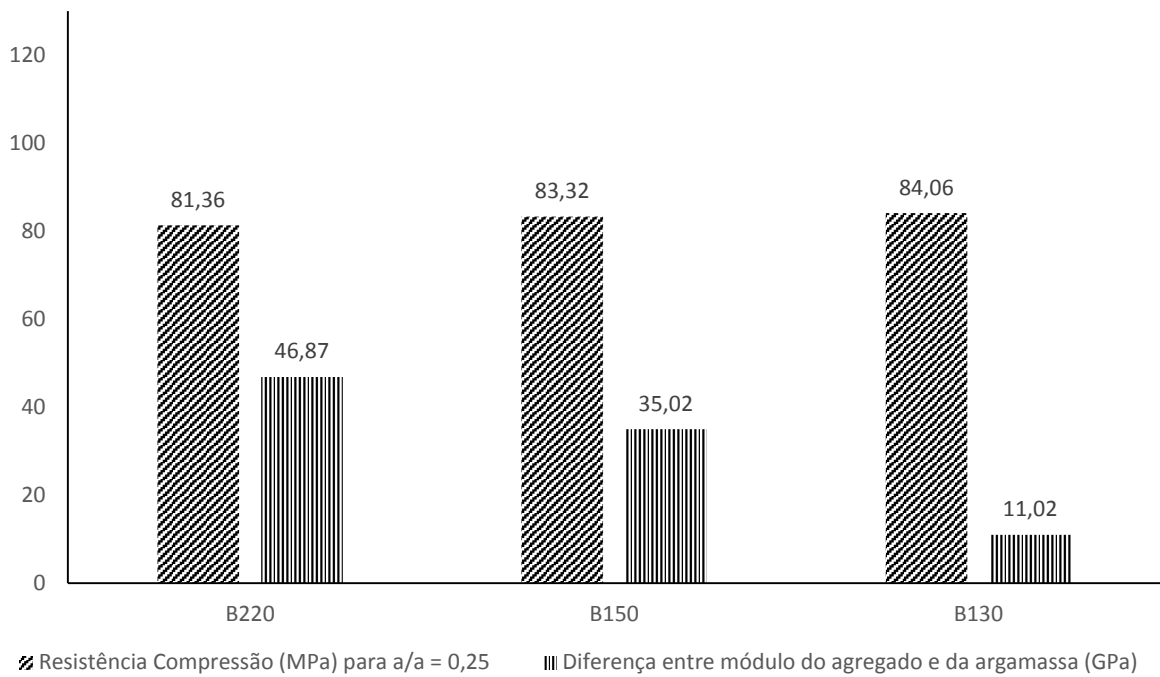


Figura 40 – Relação entre a diferença de módulo de elasticidade da fase agregado e da fase argamassa e a resistência à compressão dos concretos calculada a partir do modelo apresentado na equação 20 com relação água/aglomerante 0,25 e diferentes agregados.

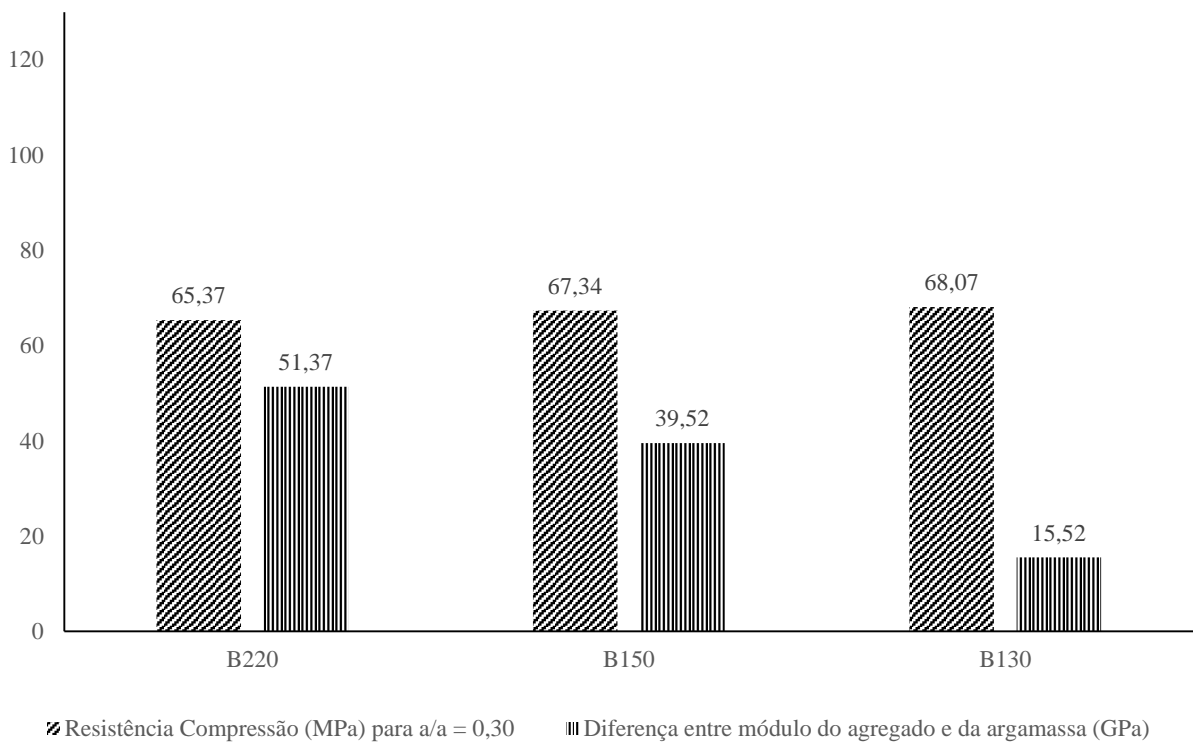


Figura 41 – Relação entre a diferença de módulo de elasticidade da fase agregado e da fase argamassa e a resistência à compressão calculada a partir do modelo apresentado na equação 20 dos concretos com relação água/aglomerante 0,30 e diferentes agregados.

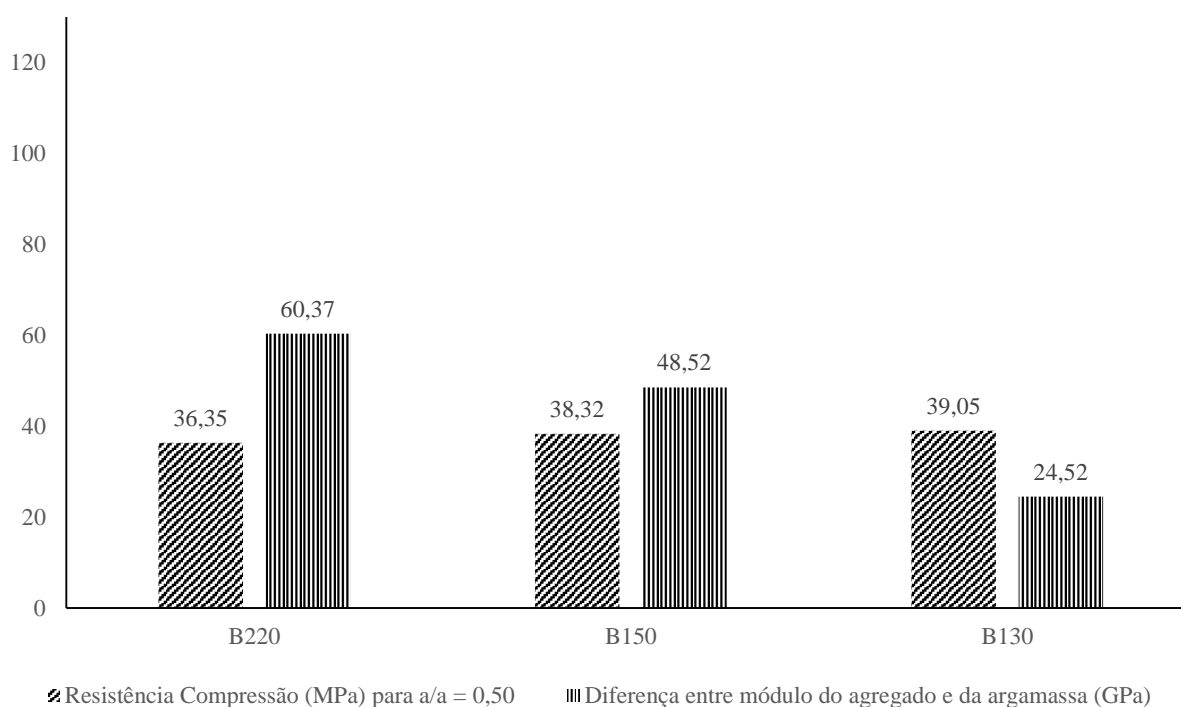


Figura 42 – Relação entre a diferença de módulo de elasticidade da fase agregado e da fase argamassa e a resistência à compressão dos concretos calculada a partir do modelo apresentado na equação 20 com relação água/aglomerante 0,50 e diferentes agregados.

Beushausen e Dittmer (2015) estudaram concretos produzidos com agregados graúdos de rocha granítica e andesítica. Segundo os autores, o concreto produzido com agregado andesite apresentou um módulo de elasticidade mais elevado quando comparado com agregado de granito. Contudo a resistência à compressão determinada foi maior para o concreto produzido com granito. Isto, segundo os autores, pode ser explicado pelo maior módulo de elasticidade do Andesite, resultando provavelmente em maior concentração de tensão na interface entre o agregado e a pasta deste agregado do que no concreto onde se utilizou o granito, portanto, resultando na falha.

#### 4.2.2.2 Módulo de Elasticidade do concreto

As Figura 43, Figura 44 e Figura 45 apresentam os resultados de módulo de elasticidade dos diferentes traços de concreto, bem como o resultado do módulo de elasticidade da rocha e da argamassa. O módulo de elasticidade do concreto, em todos os níveis de resistência, é influenciado pelo módulo de elasticidade do agregado graúdo. O módulo do concreto é uma ponderação entre o módulo de elasticidade da rocha e o módulo a argamassa.

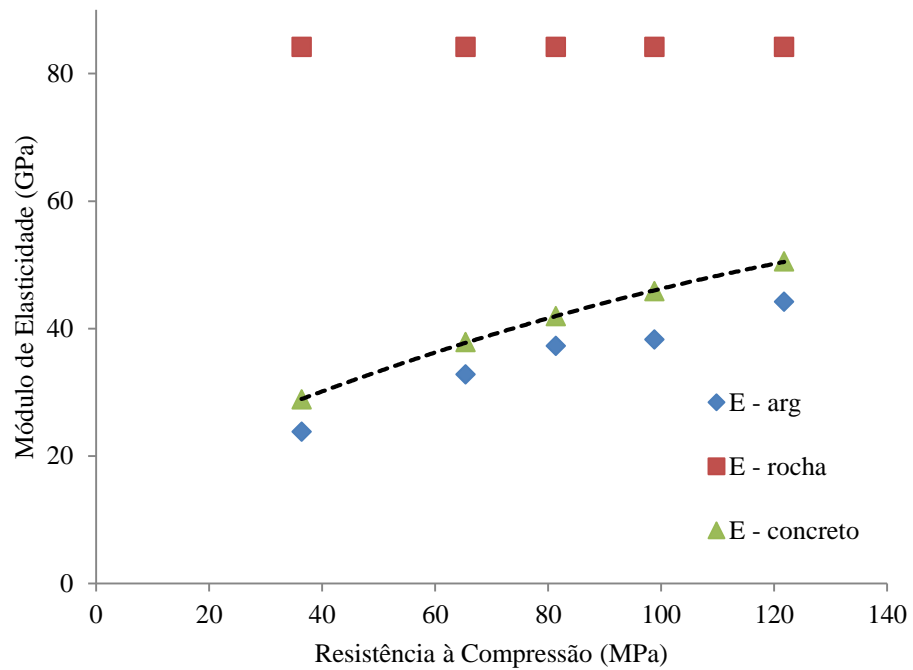


Figura 43 – Influência do módulo de elasticidade do agregado graúdo B220 no módulo de elasticidade do concreto.

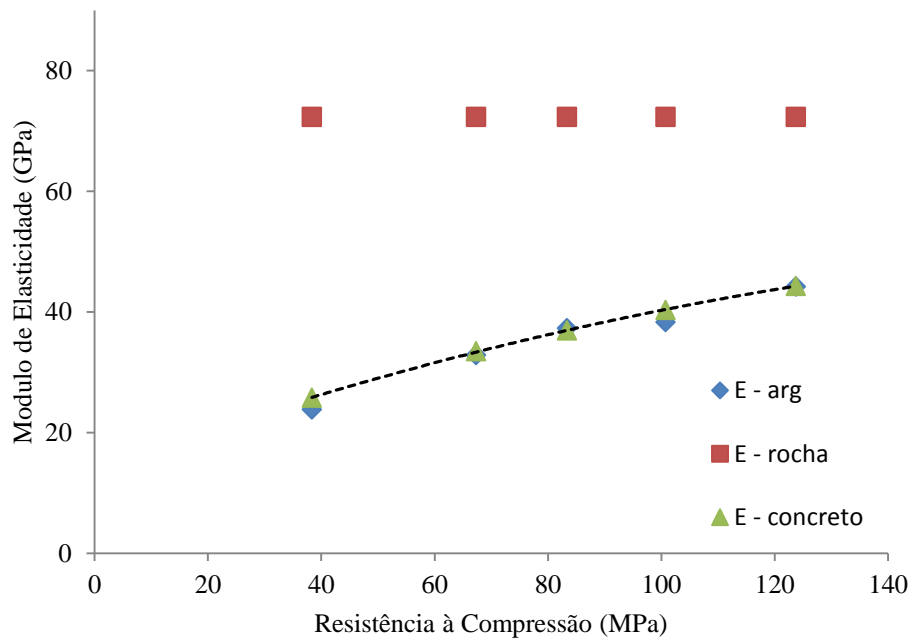


Figura 44 – Influência do módulo de elasticidade do agregado graúdo B150 no módulo de elasticidade do concreto.

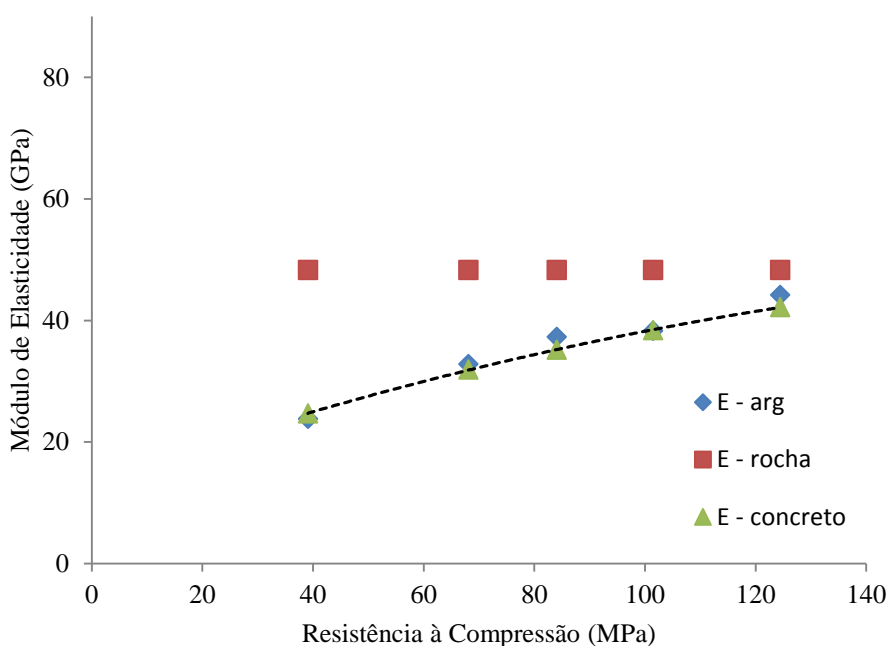


Figura 45 – Influência do módulo de elasticidade do agregado graúdo B130 no módulo de elasticidade do concreto.

Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002) utilizaram três diferentes tipos de agregados: basalto, granito e seixo rolado, comumente utilizado na Europa para produção de concreto de alta resistência. Os autores produziram seis traços de concreto com consumos de água de 123 e 167 litros, 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. 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 alta resistência seja feita com dados reais de concretos produzidos com agregado graúdo disponível na região, salientando que as propriedades estimadas por modelos de previsão como o Eurocode-2 são pouco precisas mesmo para pré-dimensionamento.



## 4.3 ESTUDO 2 – DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA VERSUS RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

### 4.3.1 Estudo 2 – Metodologia

A influência da dimensão máxima característica do agregado graúdo na resistência do concreto já foi destacada por diversos trabalhos (NEVILLE, 1997; AİTCIN, 2000; POMPEU, 2004; ROHDEN, 2011). Rohden (2011) propôs, como já exposto na Equação 20, um modelo que apresenta este efeito para o basalto. A Figura 46 apresenta a influência da dimensão máxima característica na resistência à compressão do concreto para diferentes relações água/aglomerante. A partir dos dados apresentados constata-se que ao se diminuir a dimensão máxima característica do agregado graúdo de 25,0 mm para 6,3 mm, a resistência aumenta em média 11%.

Esta constatação pode explicada de duas formas distintas. A primeira é através do modelo proposto por De Larrard (1999); o modelo da máxima espessura de pasta, apresentado na Equação 11 e na Equação 12. Segundo o modelo, a resistência da matiz é influenciada pela espessura de pasta, que fisicamente corresponde a maior distância entre os agregados e é calculada pela Equação 11. Posteriormente a resistência do concreto é determinada então em função da resistência da pasta de cimento e da máxima espessura de pasta, através da Equação 13.

Outra explicação é dada por autores como Neville (1997) e Aİtcin, (2000) que sugerem que a redução do tamanho das partículas através da britagem do agregado graúdo elimina os defeitos inerentes à rocha. Assim as partículas menores apresentariam menor número de falhas que as maiores.

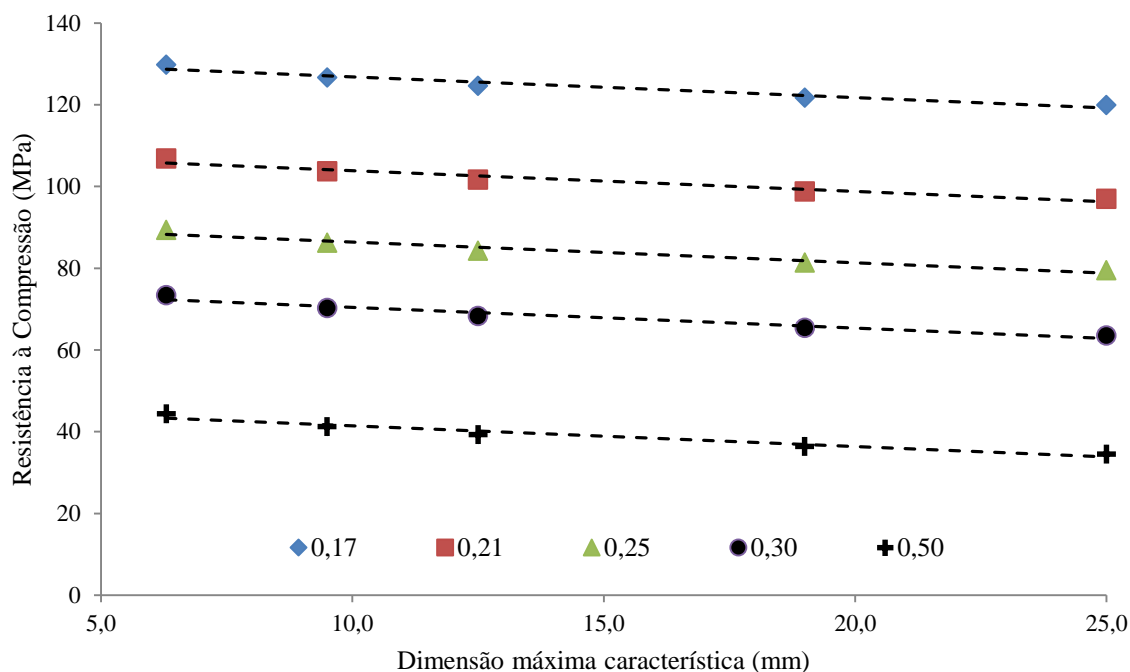


Figura 46 – Resistência à compressão do concreto com diferentes relações água/aglomerante e diferentes dimensões máximas característica produzidos com agregado de 220 MPa de resistência à compressão (Fonte: Rohden, 2011).

É importante destacar que embora diferentes, as teorias não são contrárias. No presente trabalho, avaliou-se a teoria de que a diminuição da dimensão máxima elimina defeitos inerentes à rocha. Para tanto propôs-se um ensaio para se verificar a influência do tamanho da partícula na resistência.

O corpo de prova proposto pela norma NBR 12767 (ABNT, 1992), para determinação da resistência à compressão da rocha, apresenta dimensão de aresta entre 7 e 7,5 cm. Essas dimensões são bastante maiores das que as do agregados utilizado em concreto. Outro aspecto a ser destacado é que o estado de tensões a que um corpo de prova cúbico confinado entre os pratos de uma prensa está submetido não retrata as condições do agregado.

O experimento proposto consiste na dispersão de partículas com diferentes tamanhos numa matriz padrão de elevada resistência. O objetivo do mesmo foi determinar a resistência do composto produzido com cada partícula. Tendo em vista que a resistência da matriz é conhecida, avaliou-se qual a resistência que os diferentes tamanhos de partícula apresentavam.

#### 4.3.1.1 Matriz padrão

Como matriz padrão buscou-se na literatura o material de base cimentício de maior resistência conhecida. A partir de estudos como os de Shi *et al.* (2015), Choe *et al.* (2015), Formaginni

(2005), Vanderlei (2004), Richard e Cheyrezy (1995) constatou-se que o material mais resistente e desenvolvido em diferentes laboratórios é o concreto de pós reativos. Adotou-se o mesmo no presente estudo como matriz padrão para avaliação da resistência à compressão do agregado graúdo.

Richard e Cheyrezy (1995) classificam os concretos de pós reativos em duas categorias principais: CPR 200 MPa e CPR 800 MPa. Da primeira fazem parte os concretos de pós reativos compostos basicamente por cimento, sílica ativa, aditivo superplastificante, sílica moída e areia, apresentando ou não a adição de fibras de aço. Também é imprescindível a cura térmica do material em temperatura de 90°C. Vanderlei (2004) realizou estudos demonstrando a influência do tempo de cura nas propriedades do concreto de pó reativo.

Na segunda categoria, o CPR 800 MPa, fazem parte os concretos de pós reativos compostos por cimento, sílica ativa, aditivo superplastificante, agregados metálicos e fibras de aço. Durante o processo de endurecimento o material recebe pré carregamento de 50 MPa para eliminação de falhas de moldagem. Também é realizado tratamento térmico com cura a vapor do material com temperaturas de 250 a 400°C. Henry *et al.* (2014) explicam o efeito das altas temperaturas na microestrutura do concreto.

Haja vista a elevada complexidade envolvida na formulação e produção do CPR 800 MPa, optou-se pela utilização no presente trabalho do CPR 200 MPa. A partir dos traços estudados por Vanderlei (2004), definiu-se o traço apresentado na Tabela 25.

Tabela 25 – Matriz utilizada no experimento – composição do concreto de pós reativos.

Material	kg/m <sup>3</sup>
Cimento CPV	970,2
Sílica Moída	685,4
Sílica Ativa	222,26
Superplastificante	52,01
Água	256,37
Ar aprisionado	2%
a/c =	0,26
a/a =	0,21
Cim/Sil =	0,23
% SP =	4,36

A matriz foi caracterizada através de ensaio de resistência à compressão e ensaio de módulo de elasticidade, utilizando corpos de prova de 50x100 mm.

### 4.3.1.2 Partículas

As partículas estudadas são frações provenientes do peneiramento do agregado graúdo descrito no item 4.1.8. Foram assim separadas 3 frações granulométricas. A Figura 47 ilustra as diferentes frações. A imagem da direita apresenta as partículas contidas por um aro de 200 mm de diâmetro. A imagem da esquerda apresenta a forma das partículas em tamanho real (escala 1:1).

A primeira fração é composta por partículas passantes na peneira de malha quadrada de 25,0 mm e retida na malha 19,0 mm. A segunda fração é composta por fração passante na peneira 12,5 mm e retido na peneira de 9,5 mm. A terceira fração é composta por fração passante na peneira 6,3 mm e retido peneira 4,8 mm.

Dois ensaios foram realizados para caracterizar a forma das partículas. O primeiro foi o índice de forma, conduzido de acordo com a norma NBR 7809 (ABNT, 2006). Cada fração granulométrica foi ensaiada separadamente. Assim foi determinado o índice de forma para cada fração de partícula. O índice de forma do agregado é a média da relação entre o comprimento e a espessura dos grãos de agregado. De cada amostra de agregado são ensaiadas 200 partículas. A Tabela 26 apresenta o índice de forma para cada fração de agregado graúdo. Observa-se que as partículas de dimensão 25 mm apresentam índice de forma menor do que as partículas de diâmetros menores.

Tabela 26 – Índice de forma do agregado graúdo.

∅ passante (mm)	∅ retido (mm)	Índice de forma
25,0	19	1,99
12,5	9,5	2,02
6,3	4,8	2,19

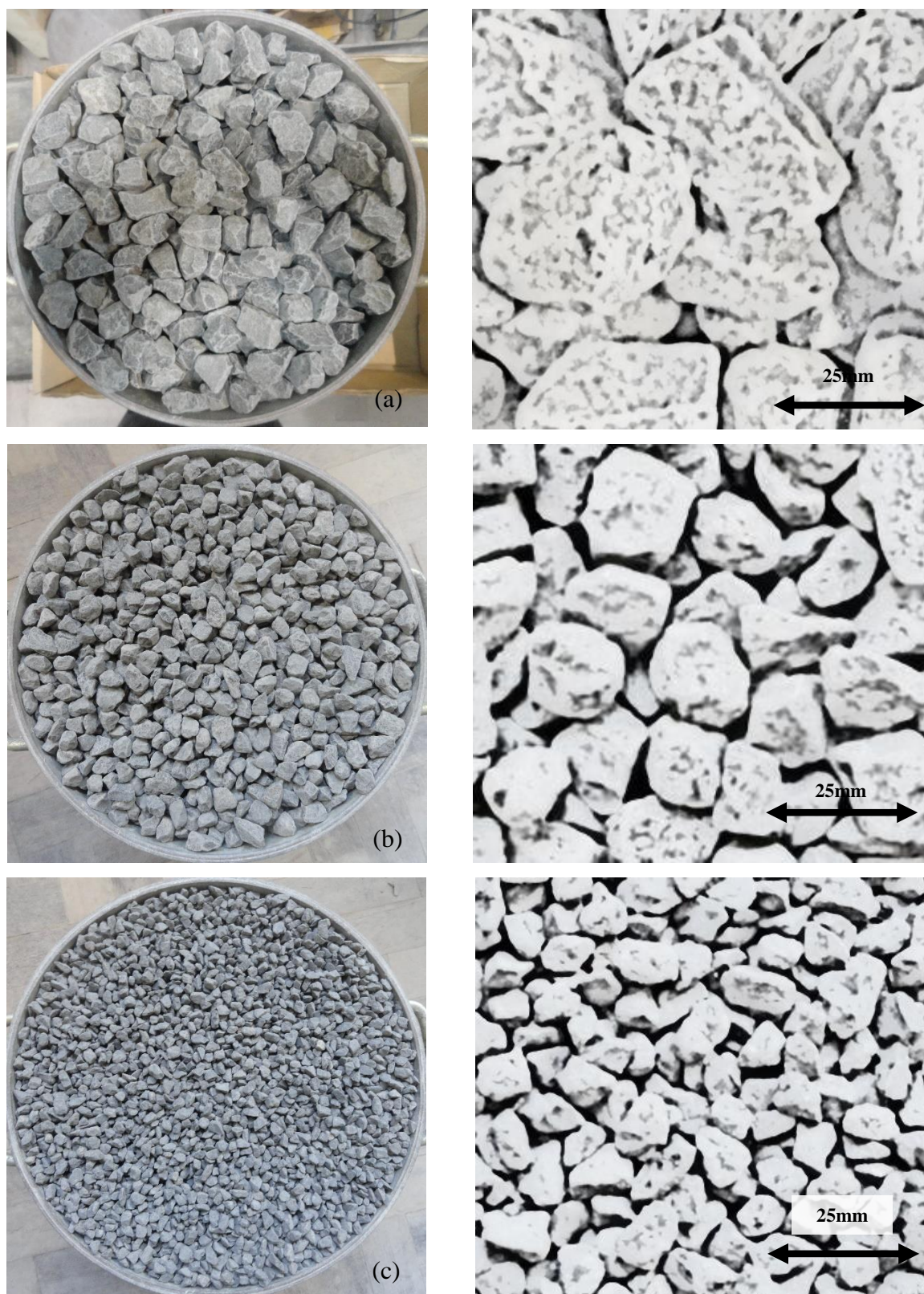


Figura 47 – Frações granulométricas utilizadas no experimento (a) 25 mm; (b) 12,5 mm; (c) 6,3.

O segundo ensaio foi a massa unitária do agregado. Foram avaliados dois protocolos de ensaio. O primeiro foi realizado seguindo as recomendações do “Método A” apresentado na NBR NM 45 (ABNT, 2006). Neste procedimento o agregado é lançado em três camadas, sendo o adensamento de cada camada realizado mediante 25 golpes da haste de adensamento, determinando-se assim a massa unitária compactada. O segundo protocolo utilizado foi realizado seguindo as recomendações do “Método C” também apresentado na NBR NM 45 (ABNT, 2006). Neste procedimento o agregado é lançado no recipiente sem ser adensado, determinando-se assim a massa unitária do agregado solto.

A Figura 48 apresenta a massa unitária determinada com os diferentes protocolos de ensaio. Observa-se que a massa das diferentes amostras é bastante semelhante. Nota-se, no entanto, a influência do índice de forma das partículas na massa unitária. Tendo em vista que o índice de forma das partículas não é igual, identifica-se que a massa unitária é inversamente proporcional ao índice de forma das partículas. A Figura 49 apresenta esta correlação.

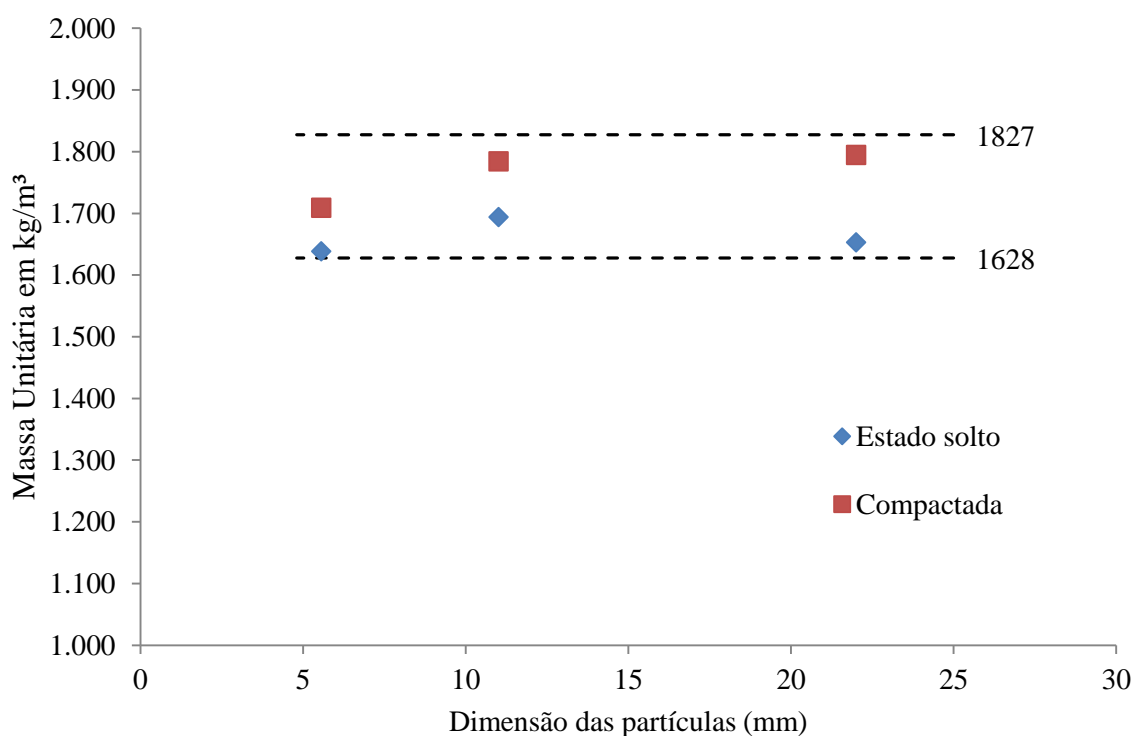


Figura 48 – Massa unitária determinada para os diferentes protocolos de lançamento.

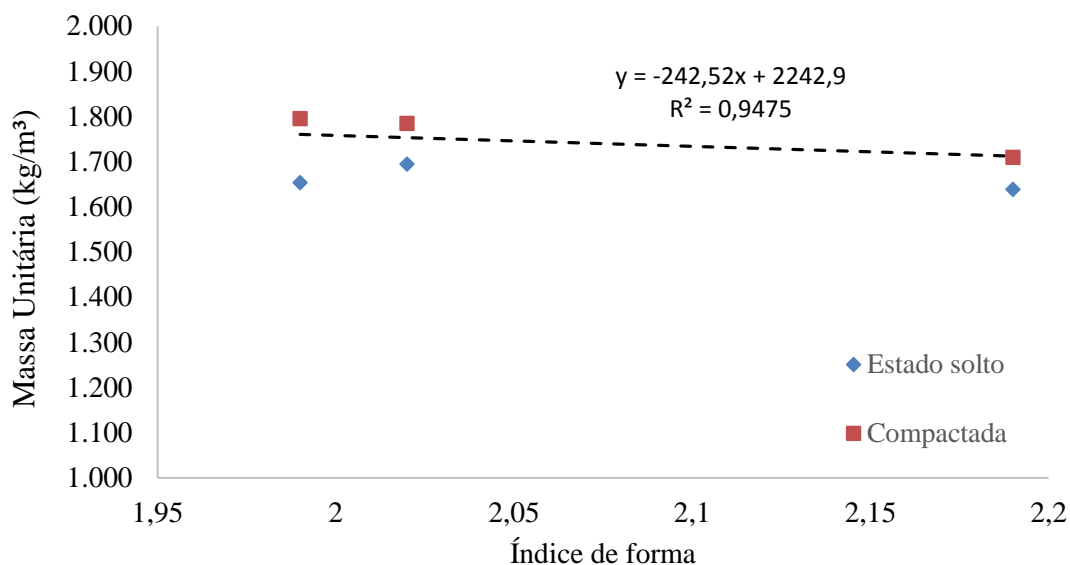


Figura 49 – Influência do índice de forma das partículas na massa unitária das partículas.

A partir das massas unitárias apresentadas na Figura 48 é possível, com emprego da Equação 1, calcular o volume de vazios do esqueleto granular de cada amostra. A figura 50 apresenta o volume de vazios para cada esqueleto granular. Segundo Formagini (2005), para partículas esféricas de tamanhos iguais empacotadas (estrutura Cubo Simples), a compactidade virtual é igual a 0,74, ou seja, apresentam um volume de vazios de 26%. O volume de vazios do esqueleto granular independe da dimensão das partículas quando estas apresentam a mesma dimensão. Assim, atribui-se a pequena variação verificada no volume de vazios encontrada para os diferentes tamanhos de partícula a também pequena variação no índice de forma destas partículas.

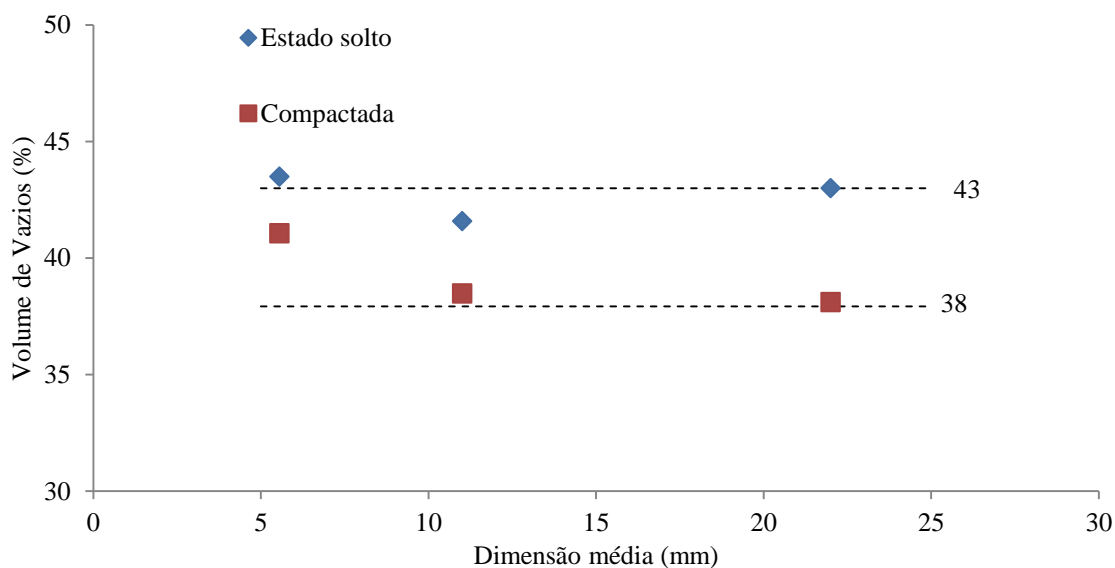


Figura 50 – Volume de vazios do esqueleto granular para diferentes protocolos de ensaio.



### 4.3.1.3 Moldagem dos corpos de prova

A moldagem dos corpos de prova foi realizada a partir da junção da matriz com as diferentes partículas. A matriz foi misturada em uma argamassadeira de bancada e foi lançada no interior do molde de um corpo de prova cilíndrico de 100x200 mm. O lançamento da matriz no molde se deu com a mesa vibratória ligada para permitir o adequado adensamento das partículas. Em seguida ao adensamento da matriz se realizou o lançamento das partículas de agregado graúdo. Para garantir o controle efetivo da composição de cada corpo de prova antes da moldagem, a massa de agregado graúdo correspondente a cada corpo de prova foi pesada separadamente. Tendo em vista que a massa e, por conseguinte, o volume de partículas graúdas era controlado, o volume restante para o preenchimento dos corpos de prova foi composto de matriz. A Tabela 27 apresenta a composição das misturas utilizadas no experimento.

Cada corpo de prova foi moldado separadamente. A Figura 51 apresenta a sequência da moldagem. Após o adensamento da matriz o agregado foi lançado em partes. O corpo de prova foi vibrado até o agregado ser totalmente incorporado pela matriz, fazia-se então o lançamento de mais uma parte do agregado repetindo-se o processo até que todo o agregado previamente pesado fosse incorporado a matriz no corpo de prova. Todo esse procedimento foi realizado vibrando-se o conjunto.

Tabela 27 – Materiais utilizados no ensaio de determinação da resistência à compressão do agregado graúdo.

Traço		Volume absoluto cm <sup>3</sup> /dm <sup>3</sup>	Massa (g/dm <sup>3</sup> )			
			4,8<Ø<6,3	9,5<Ø<12,5	19<Ø<25	
Matriz	Cimento CPV- ARI	49%	121,6	383,41		
	Sílica Ativa		39,4	87,84		
	Sílica Moída		181,0	473,10		
	Água		101,4	101,4		
	Superplastificante		23,2	23,2		
	Ar aprisionado		20,0	-		
Agregado Graúdo		51%	513,4	1489,0	1489,0	1489,0





Figura 51 – Sequência de moldagem dos corpos de prova: (a) lançamento do agregado sobre a matriz; (b) vibração do conjunto; (c) incorporação total do agregado pela matriz.

O tempo de moldagem de cada corpo de prova foi em média de 20 minutos. Observou-se que as partículas maiores, com dimensão de 25 mm, incorporam-se mais facilmente à matriz. Já as partículas menores, de 6,3 mm, apresentaram mais dificuldade para se incorporarem a matriz, demandando assim um tempo maior de vibração.

Foram moldados corpos de prova com três diferentes frações de grãos, fração 1: passante na peneira 25 mm e retido na peneira 19 mm; fração 2: passante na peneira 12,5 mm e retido na peneira 9,5 mm e fração 3: passante na peneira 6,3 mm e retido na peneira 4,8 mm. A Tabela 27 apresenta a composição das misturas. Observa-se que o volume de agregado utilizado foi de 51%. Assim, considerando-se o volume de vazios do esqueleto granular apresentado na figura 50, utilizou-se neste experimento um teor de excesso de pasta de 12%.

Na figura 52 são apresentadas diversas seções de um corpo de prova moldado com o processo apresentado na figura 51. Observa-se que há uma distribuição de matriz e agregado ao longo de todo corpo de prova.

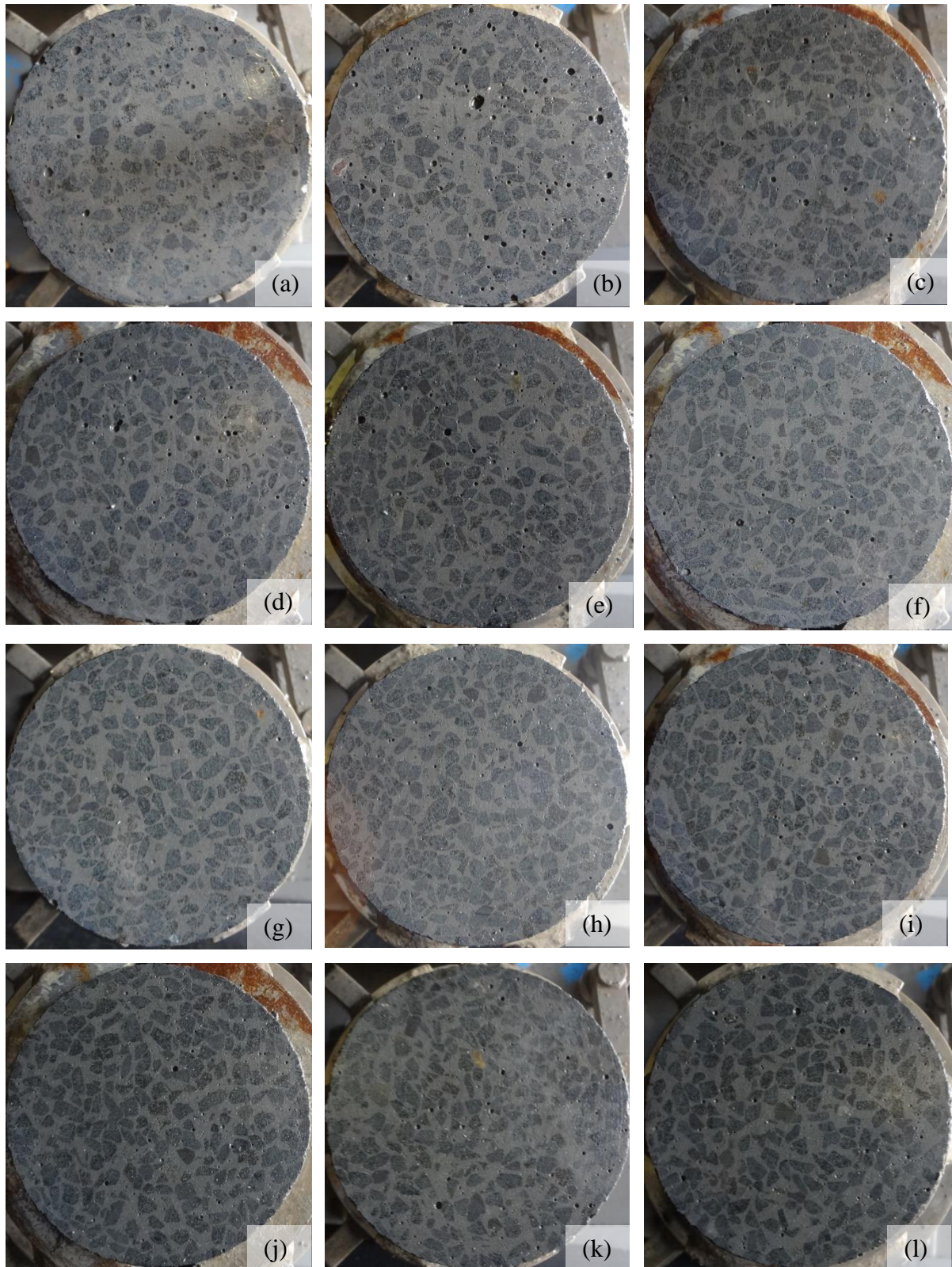


Figura 52 – Cortes mostrando a distribuição homogênea da matriz e do azegado ao longo da altura do corpo de prova: (a) 15 mm; (b) 30 mm; (c) 45 mm; (d) 60 mm; (e) 75 mm; (f) 90 mm; (g) 105 mm; (h) 120 mm; (i) 135 mm; (j) 150 mm; (k) 165 mm; (l) 180 mm; medidos do topo de corpo de prova.



Foram moldados três corpos de prova para cada uma das três frações granulométricas de agregado graúdo. Após a moldagem os corpos de prova permaneceram em repouso por 24 horas, foram desformados e levados à cura em banho térmico a 80°C por 26 dias. A cura térmica é necessária para que a matriz desenvolva sua resistência. Após este período os mesmos foram retificados e ensaiados à compressão na idade de 28 dias, seguindo-se as prescrições da NBR 5739 (ABNT, 2007). A Figura 53 mostra os corpos de prova retificados antes do ensaio. A velocidade de carregamento empregada no ensaio foi de 0,45 MPa/s.

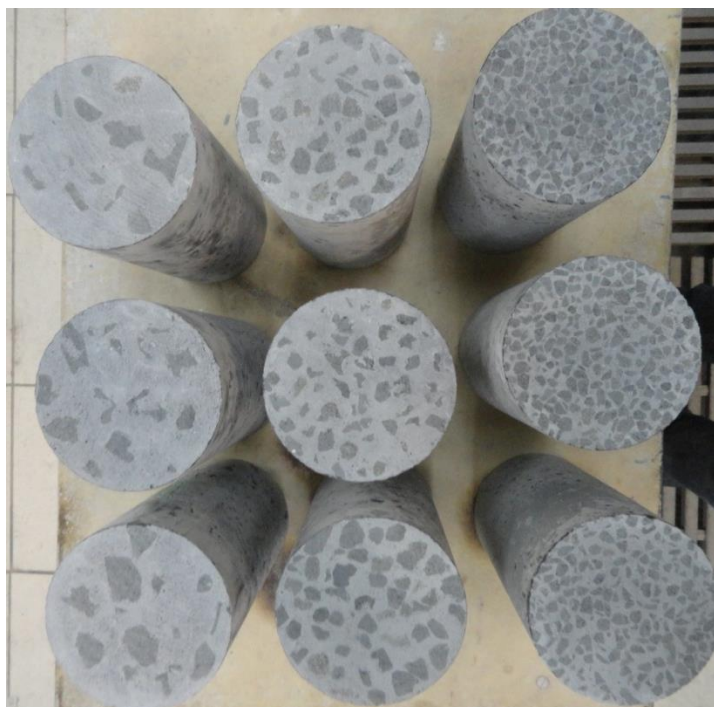


Figura 53 – Corpos de prova retificados antes do ensaio.

#### 4.3.2 Resultados do Estudo 2 – Dimensão máxima característica versus resistência à compressão

A Tabela 28 apresenta os resultados de resistência à compressão na idade de 28 dias do concreto de pó, reativo utilizado como matriz no experimento. Os resultados de resistência à compressão são compatíveis com os resultados obtidos por Vanderlei (2004).

Tabela 28 – Resistência à compressão da matriz.

Corpo de Prova	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
1	200,7	201,0	6,12	3,04%
2	207,3			
3	195,1			

A Tabela 29 apresenta resultados de resistência à compressão de corpos de prova de concreto moldados com agregados graúdos de diferentes tamanhos.

O experimento demonstrou que a resistência das partículas é inversamente proporcional ao seu diâmetro. Partindo-se do princípio de que o concreto rompe no seu elo mais fraco, assumiu-se que a resistência média obtida no ensaio é igual à resistência do agregado, haja vista que a resistência da matriz se apresenta superior à dos concretos, como mostra a Tabela 28.

Tabela 29 – Influência da dimensão do agregado na resistência à compressão do concreto.

Agregado Graúdo		Resistência (MPa)				Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de Variação (%)
Passante	Retido	CP1	CP2	CP3	Média		
25	19	123,0	121,6	133,3	<b>126,0</b>	6,40	5,08
12,5	9,5	174,6	156,9	182,1	<b>171,2</b>	12,94	7,56
6,3	4,8	191,7	192,1	190,0	<b>191,3</b>	1,16	0,60

O agregado de 25 mm apresenta resistência bastante inferior a resistência dos agregados de 12,5 mm e de 6,3 mm. As partículas de 25 mm de dimensão máxima apresentaram resistência à compressão 65 MPa menor do que as do agregado de 6,3 mm. Da mesma forma os grãos de 12,5 mm apresentaram resistência à compressão 45,3 MPa menor que o esqueleto granular formado por agregados de 6,3 mm. A Figura 54 representa graficamente os resultados experimentais dos diferentes concretos e da matriz utilizados.

A partir da equação de comportamento da resistência das partículas em função do seu diâmetro (Figura 54) pode-se dizer que para cada milímetro que aumenta a dimensão máxima do agregado, a resistência à compressão média da partícula diminui 3,5 MPa.

Como já destacado no item 2.4, a dimensão máxima característica do agregado representa um fator determinante na resistência à compressão dos concretos de alta resistência. A maior probabilidade de ocorrência de falhas na microestrutura dos agregados maiores é considerado por diversos pesquisadores (AÏTCIN, 2000; ALVES, 2000; ROHDEN, 2011) como a causadora deste comportamento.

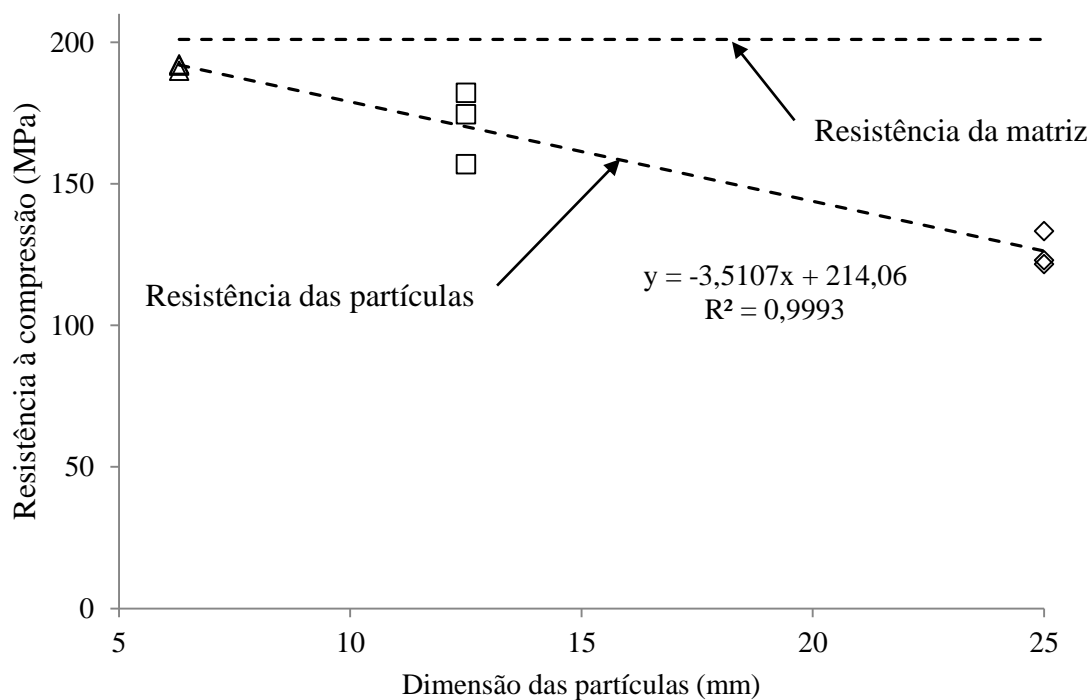


Figura 54 – Resistência à compressão de partículas com diferentes dimensões.

Apesar da sua importância no comportamento mecânico do concreto de alta resistência, a dimensão máxima característica não é adotada por nenhum método de dosagem como parâmetro de dosagem, sendo simplesmente identificada como um limitador da resistência. Dois fatores dificultam o emprego da dimensão máxima característica como parâmetro de dosagem. O primeiro é que cada tamanho de partícula apresenta uma resistência à compressão e os agregados graúdos apresentam diferentes frações granulométricas combinadas (curva granulométrica). E o segundo é que há que se considerar a influência do nível de tensão a que o concreto está submetido no momento da ruptura. A influência da dimensão máxima característica é maior para concretos de maior resistência à compressão.

#### 4.4 ESTUDO 3 – COMPACIDADE MÁXIMA VERSUS DEMANDA DE ÁGUA

##### 4.4.1 Estudo 3 – Metodologia

O método de dosagem proposto por Toralles-Carbonari (1996), estabelece que a otimização do esqueleto granular e da pasta deva ser realizada de forma independente. A otimização do esqueleto granular é feita através do estudo de diferentes composições de agregado, buscando-

se uma composição com o menor volume de vazios. Este princípio também foi adotado por outros autores (O'REILLY, 1998; TUTIKIAN, 2007).

Determinada a máxima densidade de empacotamento, o esqueleto granular é fixado. Isto é, fixa-se a proporção entre os diferentes tipos de agregados. A dosagem do concreto é determinada então variando-se o volume de pasta até se obter um determinado abatimento ou espalhamento conforme o concreto dosado.

O motivo de se definir a compacidade máxima do agregado como a ideal é que quanto menor o volume de vazios menor será o volume de pasta para preencher. A Figura 55 apresenta uma analogia dessa afirmação feita empregando-se a água. A referida figura apresenta dois volumes preenchidos com frações diferentes de agregado. No primeiro recipiente o agregado apresenta granulometria uniforme e o volume de água que preenche o volume de vazios é maior. No segundo recipiente o agregado apresenta granulometria contínua e o volume de água para preencher o volume de vazios é menor.

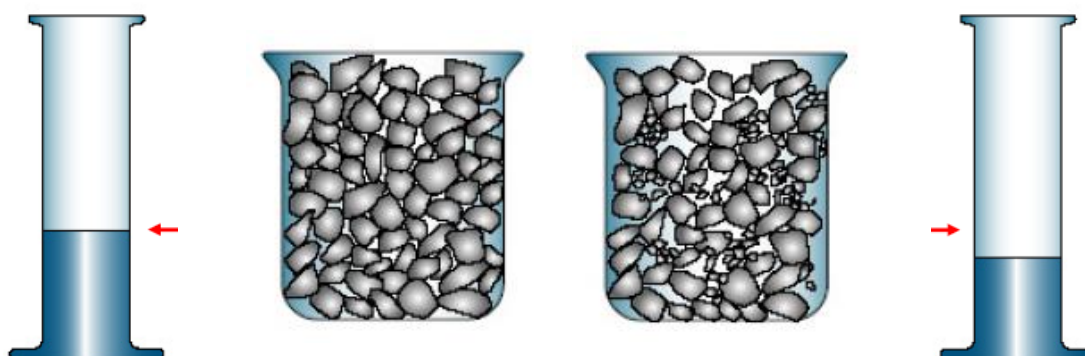


Figura 55 – Volume de vazios do esqueleto granular (Adaptado de Mehta & Monteiro (2008)).

Contudo, vários autores chamam atenção para o fato de que o volume de pasta necessário para o concreto é superior ao volume de vazios, sendo este volume além do volume de vazios denominado de “excesso de pasta”, conhecido em trabalhos em língua inglesa como *overfill* (Neville, 2014; Mehta e Aïtcin, 1990; De Larrard e Sedran, 1994; Toralles-Carbonari, 1996). Isto se deve ao fato de que no concreto os grãos de agregados não se encontram uns em contato com os outros como na figura 55. Numa dosagem, o teor de agregado graúdo é sempre inferior à massa unitária da composição granulométrica correspondente. Tutikian (2007), por exemplo, empregou em seu trabalho um esqueleto granular composto por brita 19 mm, brita 9,5 mm, areia regular e areia fina. Na composição do esqueleto granular feita experimentalmente, o volume de vazios mínimo determinado para a composição granular foi de 5,5 %, ou seja, as partículas apresentavam um fator de empacotamento de 94,5%, que corresponde a uma massa unitária de

2.578 kg/m<sup>3</sup> de agregado. Contudo ao realizar a dosagem de seus concretos o consumo de agregado por metro cúbico de concreto foi de 1.637 kg/m<sup>3</sup> a 1.866 kg<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>. Assim, o fator de empacotamento do agregado no concreto foi de 60,0% a 68,4%.

Outros aspectos importantes que devem ser considerados são as características da pasta de cimento. A pasta de cimento apresenta viscosidade que é influenciada diretamente pelo consumo de água da mistura (CASTRO, 2007). O aumento do fator de empacotamento granular acaba levando à utilização de percentuais elevados de partículas finas. Contudo, para que a pasta do concreto consiga envolver estas partículas finas, a sua viscosidade tem que ser suficientemente baixa. Uma forma de se conseguir baixar a viscosidade da pasta é aumentando-se o consumo de água por metro cúbico de concreto. A consequência direta dessa alternativa no CAR é a diminuição da resistência, considerando-se que o consumo de cimento não seja alterado.

Para demonstrar esta constatação realizou-se um experimento buscando avaliar a influência da demanda de água para diferentes compacidades. Para isso foram proporcionados sete esqueletos granulares compostos de combinações de agregado miúdo e graúdo, conforme Tabela 30. Como agregado graúdo utilizou-se a brita 1 e como agregado miúdo utilizou-se a areia média, ambos apresentam suas características descritas no item caracterização dos materiais do presente trabalho.

Para cada combinação de agregado graúdo/miúdo determinou-se a massa unitária compactada da mistura de acordo com a norma NBR NM 45 (ABNT, 2006). Neste procedimento o agregado é lançado em três camadas, sendo o adensamento de cada camada realizado mediante 25 golpes da haste de adensamento. Também foram determinadas as massas unitárias da brita 1 e da areia média.

Tabela 30 – Composições granulares estudadas.

Agregado	Esqueleto 1	Esqueleto 2	Esqueleto 3	Esqueleto 4	Esqueleto 5	Esqueleto 6	Esqueleto 7
Graúdo	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
Miúdo	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%

Após a determinação da massa unitária de cada esqueleto granular, moldaram-se concretos com os mesmos. Para tanto, o consumo de aglomerante e o teor de aditivo superplastificante foram mantidos constantes, nas proporções mostradas na Tabela 31. Mediu-se então o consumo de água demandado por cada mistura para que o concreto tivesse o abatimento de  $120 \pm 30$  mm, medido de acordo com a NM 67 (ABNT, 1996).

Tabela 31 – variáveis fixas dos traços de concreto estudados.

Componente	kg/m <sup>3</sup>
Cimento	440
Sílica Ativa	40
Superplastificante	4,8

Foram moldados 5 corpos de prova para cada uma das sete diferentes misturas. O ensaio de resistência à compressão uniaxial dos corpos de prova foi realizado, na idade de 28 dias, seguindo-se as prescrições da NBR 5739 (ABNT, 2007). A velocidade de carregamento foi de 0,45 MPa/s.

#### 4.4.2 Resultados do Estudo 3 – Compacidade máxima versus Demanda de água

A Tabela 32 apresenta os resultados do ensaio de massa unitária de diferentes composições de brita 1 e areia média. Determinou-se também a massa específica da mistura através da ponderação das massas específicas da brita 1 e da areia média de acordo com o percentual que cada agregado apresenta na mistura. A partir da massa unitária média e da massa específica da mistura calculou-se o volume de vazios da mistura, empregando a Equação 1.

Tabela 32 – Compacidade entre composições de brita 1 e areia média.

Esqueleto	% Brita 1	% Areia Média	Massa unitária da mistura (kg/m <sup>3</sup> )				Média (kg/m <sup>3</sup> )	Massa específica da mistura (kg/m <sup>3</sup> )	Volume de vazios (%)
			1,59	1,60	1,59	1,59			
E0	0	100	1,59	1,60	1,59	1,59	1,59	2,620	39,17
E1	20	80	1,77	1,76	1,77	1,79	1,78	2,678	33,72
E2	30	70	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86	2,707	31,35
E3	40	60	1,91	1,93	1,92	1,93	1,92	2,736	29,73
E4	50	50	2,01	2,00	2,01	2,01	2,00	2,765	27,51
E5	60	40	2,04	2,05	2,07	2,05	2,05	2,794	26,60
E6	70	30	2,03	2,04	2,05	2,04	2,04	2,823	27,77
E7	80	20	1,92	1,93	1,92	1,92	1,92	2,852	32,59
E8	100	0	1,65	1,67	1,65	1,66	1,66	2,91	42,98



A Figura 56 apresenta a variação do volume de vazios da mistura em função da variação da massa de areia média e brita 1. O volume de vazios diminui com aumento do teor de areia até um determinado ponto mínimo a partir do qual o volume de vazios passa a aumentar. Esse comportamento foi identificado em inúmeros trabalhos (TUTIKIAN, 2007, TORALLES-CARBONARI, 1996, DE LARRARD, 1999).

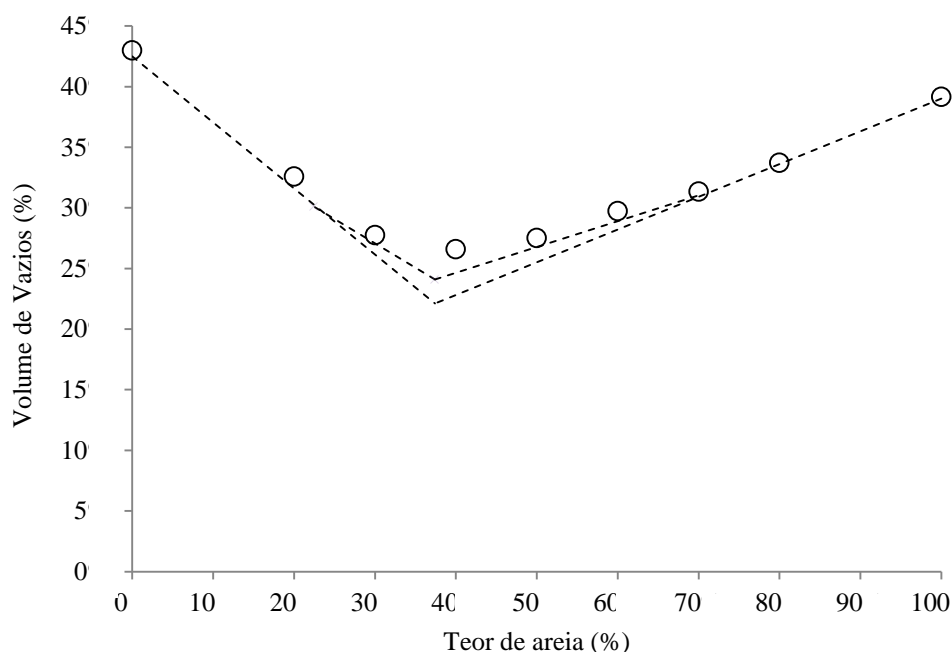


Figura 56 – Volume de vazios para diferentes composições de areia média e brita 1.

A Figura 57 apresenta as curvas granulométricas do esqueleto granular resultantes das composições de brita 1 e areia média. Observa-se que os esqueletos granulares E4, E5 e E6 apresentam os menores volumes de vazios. Todas as curvas resultantes da mistura de brita 1 e areia média apresentam uma descontinuidade entre as peneiras 1,2 mm e 12,5 mm.

Com os diferentes esqueletos granulares foram dosados concretos conforme descrito no item 5.2.3. Determinou-se então experimentalmente a quantidade de água necessária para se obter o abatimento de  $120 \pm 30$  mm. A Tabela 33 apresenta o consumo de água por metro cúbico de concreto determinada no ensaio.

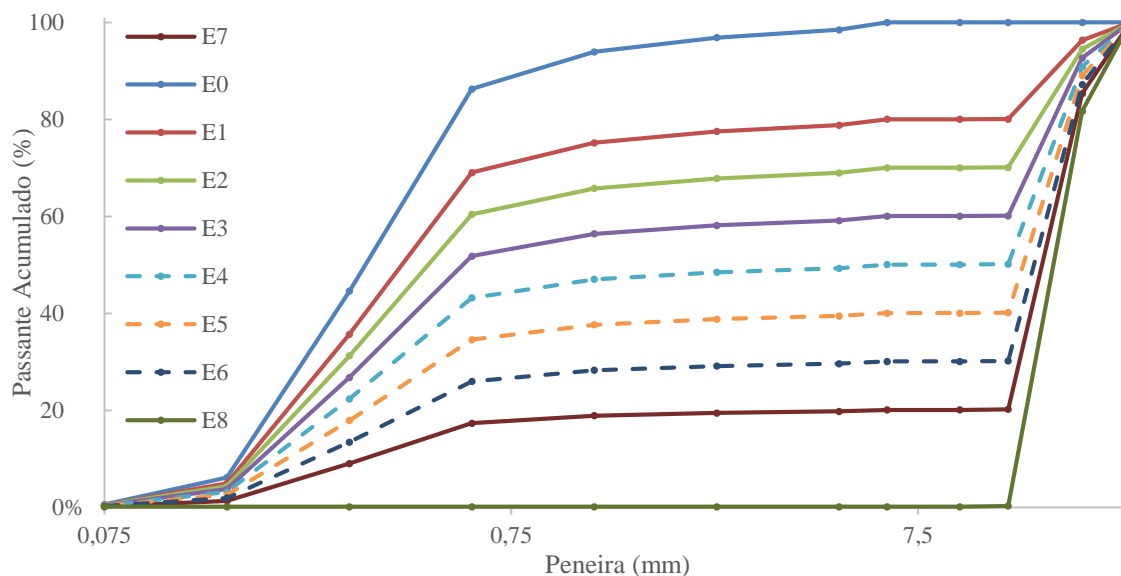


Figura 57 – Curva granular resultante das diferentes composições de brita 1 e areia média.

Tabela 33 – Consumo de água para diferentes esqueletos no proporcionamento de concreto com abatimento de 120 mm.

Traço	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Brita	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
Areia	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%
<b>Água/m<sup>3</sup></b>	<b>159,0</b>	<b>141,0</b>	<b>137,0</b>	<b>126,0</b>	<b>116,5</b>	<b>115,8</b>	<b>120,0</b>
Relação água/aglomerante	0,33	0,29	0,28	0,26	0,24	0,24	0,25

A Figura 58 apresenta a curva de comportamento do consumo de água para as diferentes composições de areia e brita.

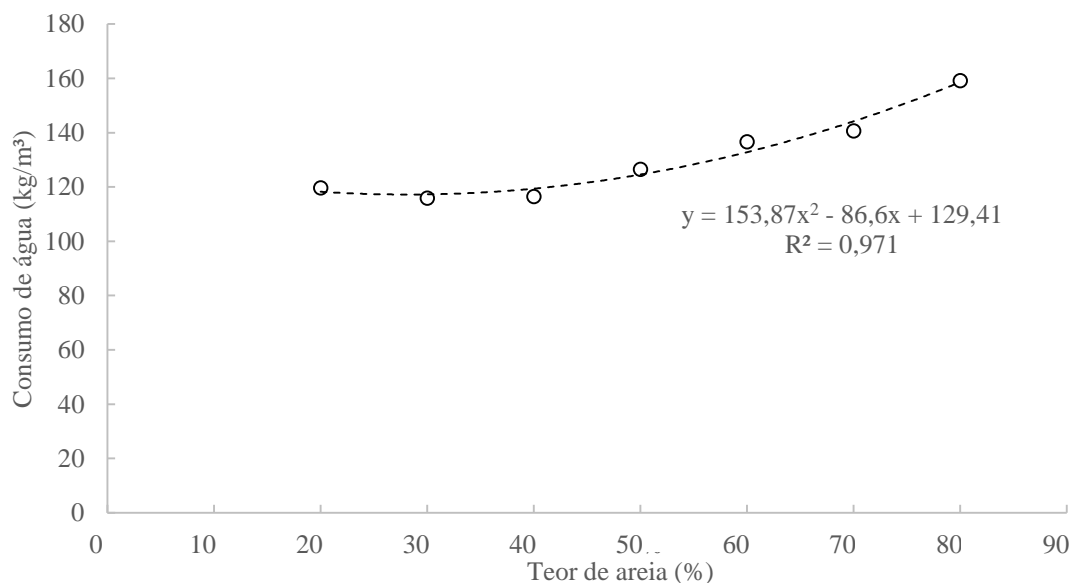


Figura 58 – Consumo de água para diferentes composições de areia média e brita 1.

Os corpos de prova moldados foram rompidos na idade de 28 dias e a Tabela 34 apresenta a resistência à compressão determinada para os traços de concreto estudados. Como já era esperado, os diferentes consumos de água alteraram a relação água/aglomerante e a resistência à compressão mostrou-se inversamente proporcional à relação a/c respeitando, assim a Lei de Abrams.

A Figura 59 apresenta a curva de correlação entre a resistência à compressão e a relação água/aglomerante. Também está plotado no referido gráfico uma barra de erros que representa o desvio padrão médio obtido no ensaio, que corresponde a 2,7 MPa.

Tabela 34 – Resistência à compressão dos diferentes traços de concreto aos 28 dias.

Traço	Resistência à compressão (MPa)					Média (MPa)	Desvio (MPa)	CV (%)
T1	68,6	64,5	63,0	61,8	62,3	64,1	2,8	4,30
T2	70,3	76,7	80,0	70,0	75,0	74,4	4,3	5,74
T3	84,7	82,6	84,9	85,8	81,6	83,9	1,7	2,06
T4	89,1	92,6	85,1	92,1	90,6	89,9	3,0	3,37
T5	106,2	105,6	104,5	104,4	106,3	105,4	0,9	0,87
T6	111,8	112,8	111,6	113,0	111,5	112,1	0,7	0,63
T7	107,8	102,6	109,9	116,6	104,5	108,5	5,5	5,04

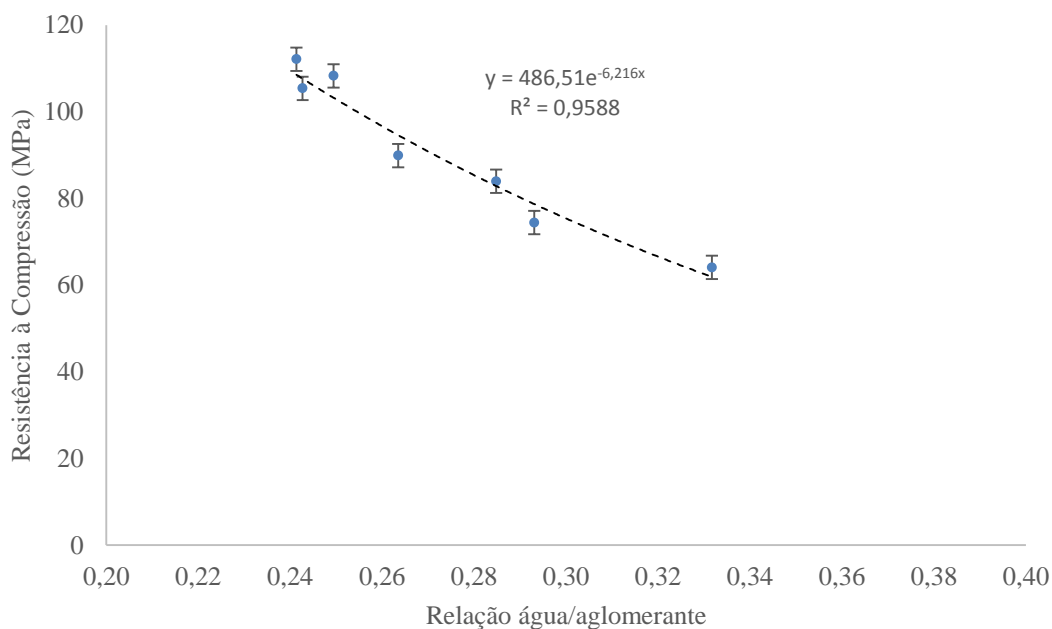


Figura 59 – Resistência à compressão em função da relação água/aglomerante.

A Figura 60 apresenta a curva de comportamento do volume de vazios das diferentes composições de areia média e brita 1. Uma equação do terceiro grau foi utilizada para representar o comportamento do volume de vazios em função do teor de areia, o coeficiente de correlação apresentou-se bastante próximo de 1.

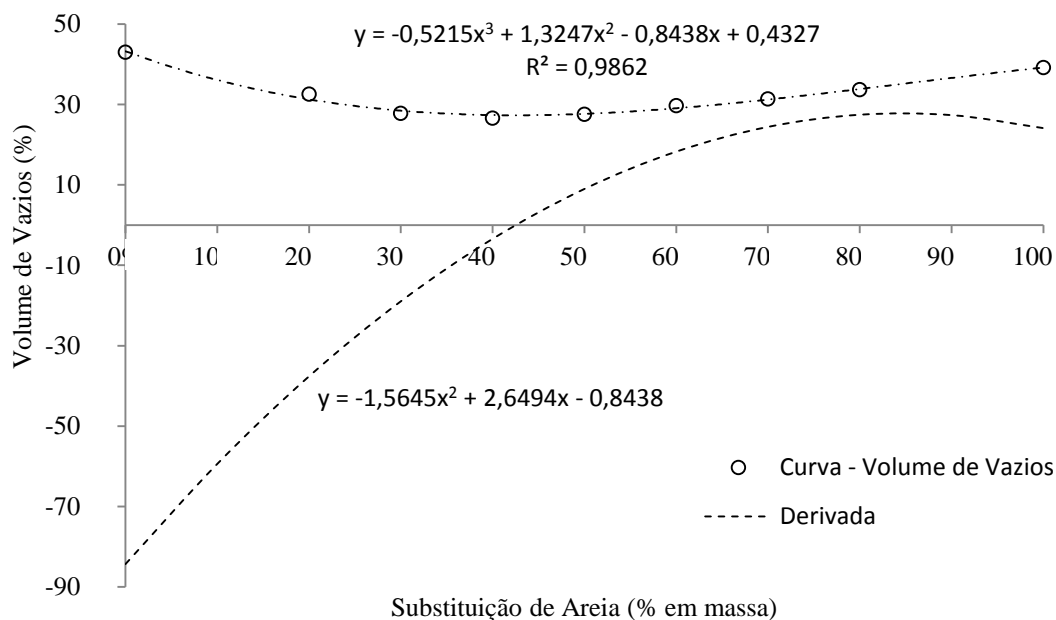


Figura 60 – Determinação da composição de brita 1 e areia média com menor volume de vazios.

Na Figura 60 também é apresentada a curva derivada da função que relaciona o volume de vazios ao teor de areia média. O menor volume de vazios corresponde ao ponto mínimo da referida função. Assim, o menor volume de vazios da mistura é determinado pela intersecção da derivada da função a zero. O menor volume de vazios foi determinado desta maneira como correspondendo ao teor de 42,60% de areia média.

Já a Figura 61 apresenta a função do consumo de água demandado na mistura do concreto, para o abatimento de 120 mm, em função do teor de areia média. A função utilizada para determinação do consumo de água foi uma parábola. Também foi apresentada a equação derivada da referida função. Da mesma forma que se determinou o teor de areia média correspondente ao menor volume de vazios, determinou-se o teor de areia média correspondente ao menor consumo de água das misturas. O teor de areia média correspondente ao menor consumo de água foi assim determinado como sendo igual a 28,14%.

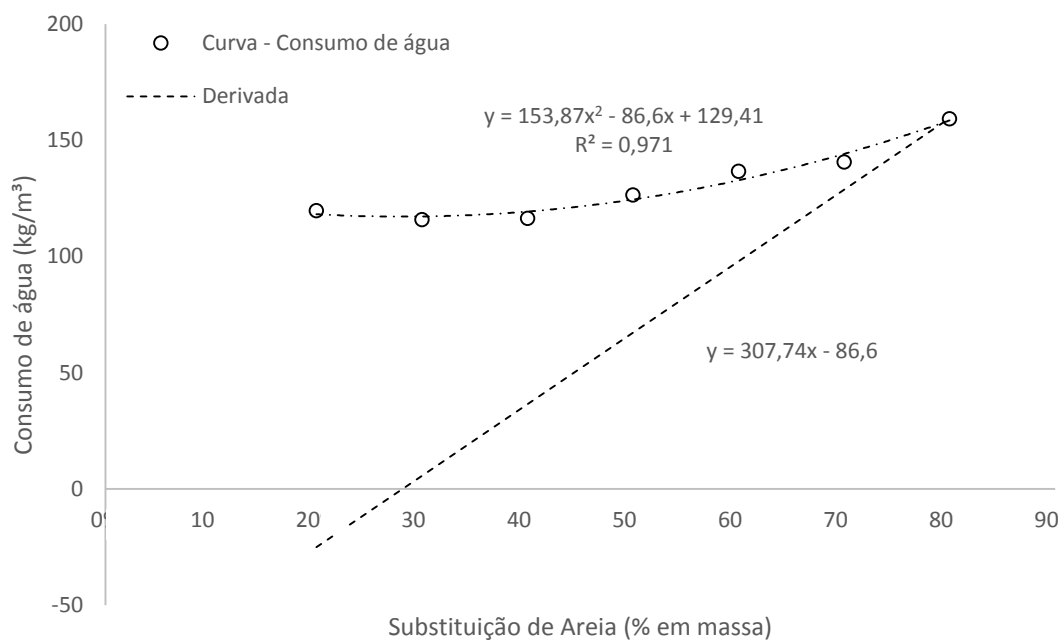


Figura 61 – Determinação da composição de brita 1 e areia média que demandou menor consumo de água para o concreto com abatimento de 120 mm.

Por fim, a Figura 62 apresenta o consumo de água e a resistência à compressão em função do teor de areia média. Como esperado, o menor consumo de água da mistura traduziu-se no aumento da resistência à compressão. Demonstrou-se que o menor volume de vazios não se refletiu no concreto mais econômico, tampouco no mais resistente. Ou seja, com o esqueleto granular com menor volume de vazios não se produziu o melhor traço de concreto.

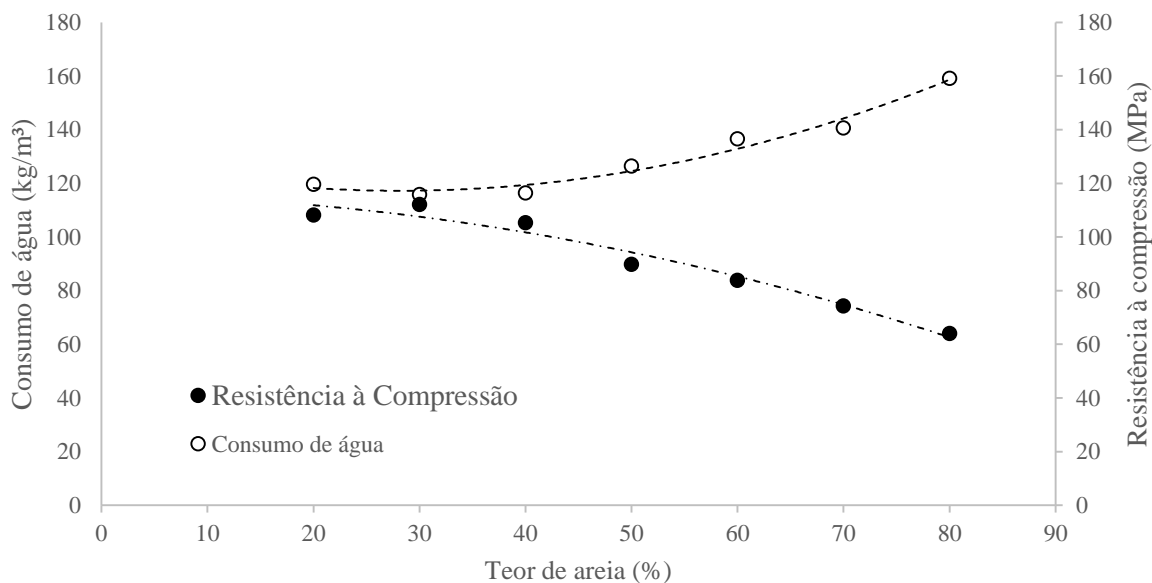


Figura 62 – Influência da demanda de água na resistência à compressão frente às diferentes proporções de areia média e brita 1.

Este comportamento pode ser explicado pelo fato de que com o aumento do teor de areia média e conseqüente diminuição do volume de vazios, há também o aumento da superfície específica do esqueleto granular do concreto. A Figura 63 apresenta a área superficial do esqueleto granular para cada traço de concreto estudado. A distância média entre os grãos de agregado, por sua vez, é minimizada. A figura 64 apresenta o cálculo da distância máxima existente entre as partículas de agregado que foi calculada através da equação 10. A função da pasta no concreto é envolver e aglomerar todas as partículas de agregado, isto é, todas as partículas do esqueleto granular.

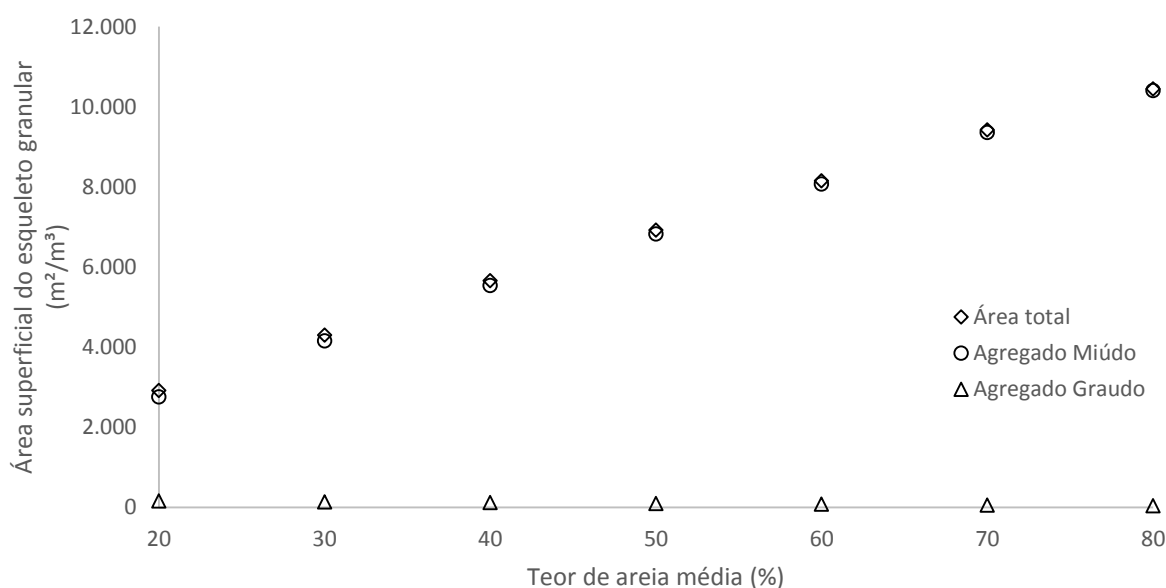


Figura 63 – Área superficial do esqueleto granular.

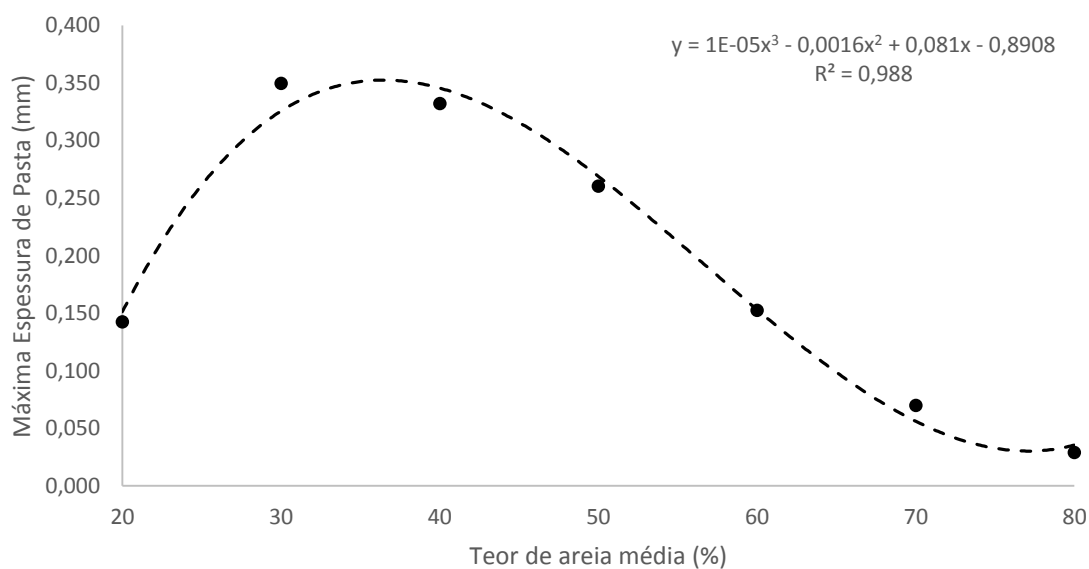


Figura 64 – Máxima espessura de pasta existente entre as partículas.

Duas situações podem acontecer. Se a composição da pasta for fixa, isto é, se a proporção de cimento, sílica ativa, água e aditivo superplastificante for mantida, o volume de pasta pode ser variado. Assim numa dosagem, variando-se o teor de pasta da mistura, determina-se o volume de pasta necessário para se obter a trabalhabilidade adequada; este fato foi observado na metodologia de Toralles-Carbonari (1996) por esse motivo é que se faziam ajustes no teor de pasta. Ao se aumentar o volume de pasta, a distância entre as partículas do esqueleto granular também é aumentada e a viscosidade da pasta é mantida constante.

A outra possibilidade é se manter o volume de agregado constante. Neste caso a pasta deve ter sua viscosidade alterada e ajustada para que seja capaz de envolver todos os agregados e proporcionar a trabalhabilidade adequada. Essa alternativa foi utilizada neste experimento. Segundo Castro (2007), um componente da pasta que altera sua viscosidade plástica é a água, ou seja, o aumento do consumo de água diminui a viscosidade plástica da pasta conforme pode ser observado na Figura 65 e Figura 66. Contudo, como já foi relatado, o aumento do consumo de água implica no aumento da relação água/aglomerante e a consequente diminuição da resistência à compressão do concreto.

A mistura que demanda menor consumo de água não é a que apresenta a maior compacidade, menor volume de vazios. Assim o princípio de se adotar como hipótese que o ótimo é o esqueleto granular com maior compacidade, como recomendam diversos autores, é falho. Cabe ainda destacar que no presente estudo foram combinados apenas dois agregados; caso se utilizem outras frações de agregado miúdo ou mesmo de agregado graúdo de menor dimensão máxima característica o efeito tenderia a ser maximizado.

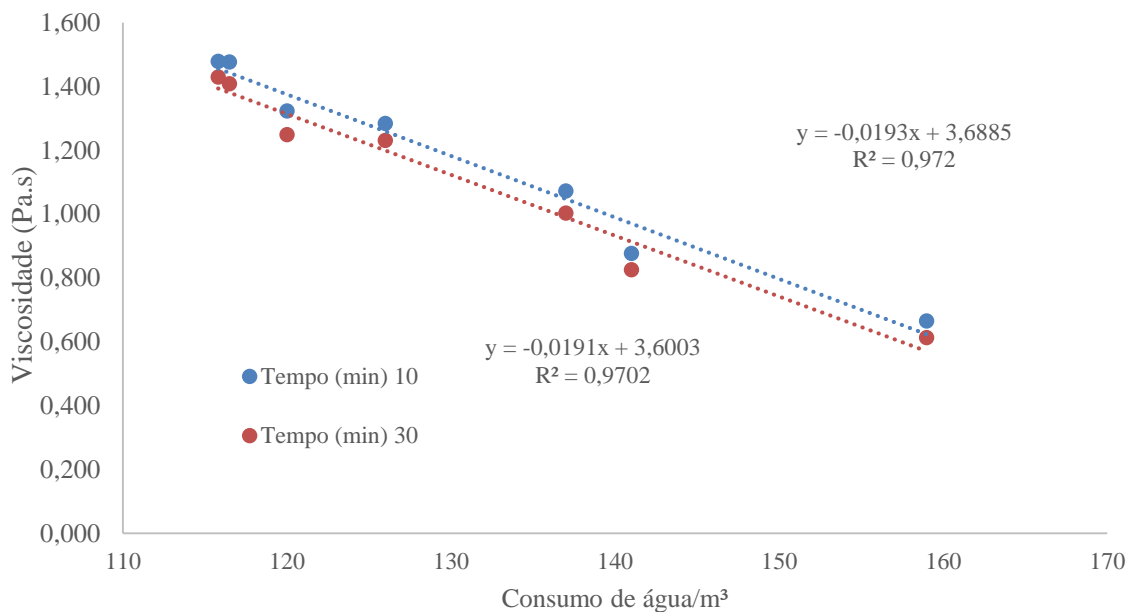


Figura 65 – Viscosidade da pasta dos concretos estudados para taxa de cisalhamento de 50 a 150 (1/s) em função do consumo de água.

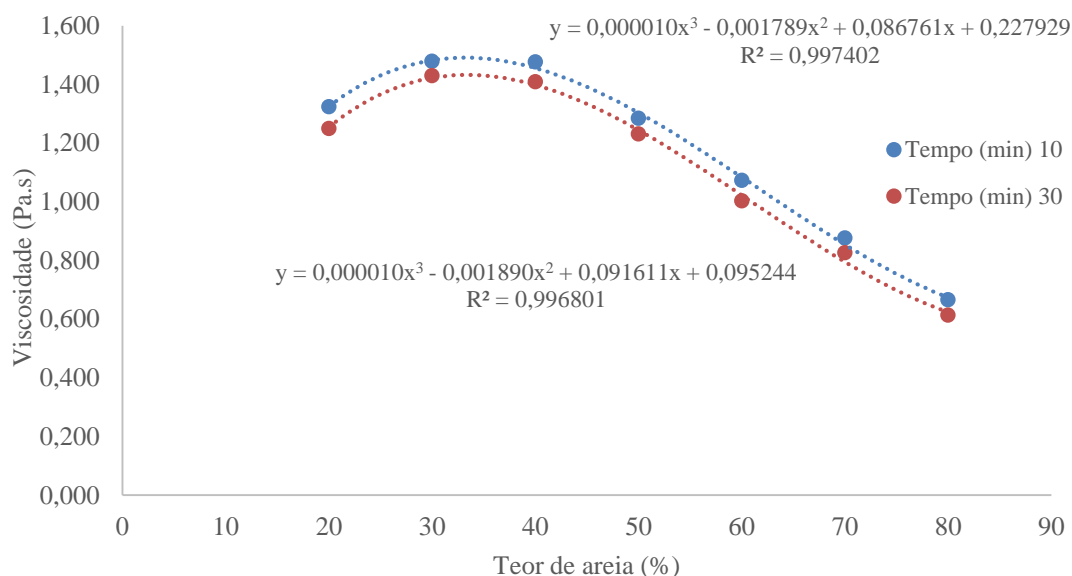


Figura 66 – Viscosidade da pasta para taxa de cisalhamento de 50 a 10 (1/s) em função do teor de areia.

Na Figura 65 é apresentada a viscosidade das diferentes pastas em função do consumo de água. Na Figura 66 a viscosidade é apresentada novamente em função do consumo de areia de cada mistura, sendo que o concreto produzido com as diferentes composições sempre apresentou abatimento de 120 mm.



## 4.5 ESTUDO 4 – MÁXIMA ESPESSURA DE ARGAMASSA VERSUS EMPACOTAMENTO MÁXIMO

### 4.5.1 Estudo 4 – Metodologia

Buscou-se com este experimento propor uma nova maneira de se determinar a compacidade ótima do esqueleto granular, alternativamente ao uso do conceito de compacidade máxima.

Hipóteses consideradas:

- Cada esqueleto granular com sua área superficial e espessura máxima de pasta demanda uma pasta com uma viscosidade específica. Isto é, não existe um esqueleto granular ideal para todas as pastas.
- A área superficial do esqueleto granular depende fundamentalmente do agregado miúdo; então, quanto maior for a quantidade de agregado graúdo, para um dado volume de pasta, menor será a quantidade de agregado miúdo e por conseguinte também menor será a área específica do esqueleto granular.
- Para um dado consumo de aglomerante e trabalhabilidade determinada, o esqueleto granular ideal é aquele que demanda menor consumo de água de mistura, pois assim maior será a resistência do concreto para o consumo de aglomerante considerado.

Entende-se então que a questão a ser solucionada na determinação do esqueleto granular é a determinação do consumo máximo de agregado graúdo da mistura para um dado consumo de aglomerante por metro cúbico de concreto.

Para tanto criou-se um novo parâmetro para caracterizar a fração graúda do esqueleto granular. A espessura equivalente de argamassa (EMA) é definida como uma variação da equação 10 que define a máxima espessura de pasta. A equação 10 foi criada para o cálculo da espessura máxima de pasta para partículas esféricas com mesma dimensão. Contudo isso não acontece para o agregado graúdo. As partículas de agregado graúdo apresentam uma série de diferentes tamanhos de partículas. A EMA então é calculada a partir da espessura média das partículas do agregado graúdo. A EMA está definida na equação 21.

$$EMA = \phi_{MÉDIO} \left( \sqrt[3]{\frac{g^*}{g}} - 1 \right) \quad \text{Equação 21}$$

Onde: EMA – espessura média de argamassa (mm);

$\emptyset_{MÉDIO}$  – dimensão média do agregado graúdo (mm);

$g$  – volume de agregado graúdo por metro cúbico de concreto ( $m^3/m^3$ );

$g^*$  – quociente da massa unitária compactada pela massa específica do agregado graúdo ( $(g/cm^3)/(g/cm^3)$ ).

Variando-se a espessura média de argamassa determina-se a espessura média de argamassa crítica definida como sendo aquela para a qual o consumo de água é mínimo.

A partir da Equação 21 montou-se um programa de experimentos para sua validação. Foram elaborados traços de concreto com diferentes espessuras de argamassa para dois consumos de aglomerante diferentes. Como referência foram moldados também dois traços de concreto utilizando o método de dosagem proposto por Toralles-Carbonari (1996).

#### 4.5.1.1 Dosagem com EMA variável

O parâmetro  $g^*$  representa a compacidade do agregado graúdo, isto é, corresponde ao volume de sólido presente no esqueleto do agregado graúdo. É determinado pelo quociente da massa unitária do agregado graúdo, pela massa específica do agregado graúdo. A compacidade do agregado graúdo é uma característica do agregado, diretamente influenciada pela forma do agregado e também pela distribuição granulométrica. Neste experimento foram dosados traços de concreto de alta resistência apresentados na Tabela 35. Variou-se nestes traços o consumo de agregado graúdo por metro cúbico de concreto.

O parâmetro ( $g$ ) na determinação da EMA corresponde justamente ao volume de agregado por metro cúbico, sendo determinado como o consumo de agregado graúdo em quilos por metro cúbico de concreto pela massa específica do agregado graúdo. O agregado graúdo empregado foi a brita 1. A partir da análise granulométrica da brita, determinou-se o diâmetro médio do agregado graúdo como 16,86 mm. A compacidade da brita 1, ( $g^*$ ) foi determinada como sendo igual a 0,616. O parâmetro  $g$  é variável para os diferentes traços de concreto. O consumo de cimento e de sílica ativa e o consumo de superplastificante foram mantidos constantes para esta bateria de traços. O consumo de aglomerante foi de  $550 kg/m^3$ , o teor de superplastificante foi

definido sendo igual 1,32%, que corresponde ao ponto de saturação de aditivo para a relação água/aglomerante de 0,25, estimada para determinação do traço.

Tabela 35 – Traço de concreto de alta resistência

Materiais (kg/m <sup>3</sup> )	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4	Traço 5
Cimento (kg)	500	500	500	500	500
Sílica Ativa (kg)	50	50	50	50	50
<b>Agregado Graúdo (kg)</b>	<b>900</b>	<b>1050</b>	<b>1200</b>	<b>1350</b>	<b>1500</b>
Agregado Miúdo (kg)	898	764	629	495	360
Água (estimado 135 kg)	Determinada experimentalmente				
Superplastificante (kg)	7,26	7,26	7,26	7,26	7,26
Espessura Média de Argamassa (mm)	4,329	3,267	2,391	1,650	1,011

O consumo de areia dos traços da Tabela 35 foi determinado pelo método do peso. A espessura de pasta foi calculada para cada um dos traços de concreto de acordo com a equação 21, sendo o valor também apresentado na Tabela 35.

No laboratório mediu-se então o consumo de água demandado por cada mistura para que o concreto tivesse o abatimento de  $200 \pm 20$  mm, medido de acordo com a NM 67 (ABNT, 1996).

Também se realizou a dosagem de um traço de concreto de resistência convencional. Para tanto empregou-se um consumo de aglomerante de 350 kg. O teor de superplastificante foi definido como sendo igual 0,25%. A Tabela 36 apresenta os traços de concreto convencional dosados neste estudo.

Tabela 36 – Traço de concreto convencional

Materiais (kg/m <sup>3</sup> )	Traço 6	Traço 7	Traço 8	Traço 9	Traço 10
Cimento (kg)	318	318	318	318	318
Sílica Ativa (kg)	32	32	32	32	32
<b>Agregado Graúdo (kg)</b>	<b>900</b>	<b>1050</b>	<b>1200</b>	<b>1350</b>	<b>1500</b>
Agregado Miúdo (kg)	1087	952	818	683	549
Água (estimado 135 kg)	Determinada experimentalmente				
Superplastificante (kg)	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875
Espessura Equivalente de argamassa (mm)	4,329	3,267	2,391	1,650	1,011

O consumo de areia dos traços da Tabela 36 foi determinado pelo método do peso. A espessura de pasta foi calculada para cada um dos traços de concreto de acordo com a equação 21, e está apresentada na referida tabela. No laboratório mediu-se então o consumo de água demandado

por cada mistura para que o concreto tivesse o abatimento de  $100 \pm 20$  mm, medido de acordo com a NM 67 (ABNT, 1996).

#### 4.5.1.2 Dosagem comparativa pelo Método Toralles-Carbonari (1996)

Como descrito na revisão bibliográfica deste trabalho, o método proposto por Toralles-Carbonari (1996) divide-se em três etapas. A primeira etapa é a determinação do esqueleto granular. Busca-se, através de ensaios de massa unitária, a composição de um esqueleto granular com o menor volume de vazios.

Observa-se que para cada combinação de agregado determinou-se a massa unitária compactada da mistura de acordo com a norma NBR NM 45 (ABNT, 2006). Neste procedimento o agregado é lançado em três camadas sendo o adensamento de cada camada realizado mediante 25 golpes da haste de adensamento. O procedimento foi realizado 4 vezes para cada combinação, adotando-se a média dos valores como resultado. A Tabela 37 apresenta a massa unitária, a massa específica e o volume de vazios das diferentes composições de brita 1 e brita zero.

A Figura 67 apresenta a função que descreve o comportamento do volume de vazios em função do teor de brita zero. A figura apresenta também a derivada da referida função. Igualando-se a derivada a zero determina-se o teor de brita zero, e brita 1, com menor volume de vazios. Determinou-se assim que a composição denominada de M1 correspondente a 41,19% de brita zero e 58,81% de brita 1.

Tabela 37 – Ensaio de compacidade entre a brita 1 e brita zero.

% Brita 1	% Brita Zero	Massa Unitária Mistura (kg/dm <sup>3</sup> )	Massa Específica Mistura (kg/dm <sup>3</sup> )	Volume de Vazios %
100	0	1,79	2,90	38,40
80	20	1,85	2,90	36,13
70	30	1,88	2,90	35,31
60	40	1,87	2,90	35,42
50	50	1,85	2,90	36,15
40	60	1,84	2,90	36,64
30	70	1,83	2,90	36,91
20	80	1,79	2,90	38,11
0	100	1,74	2,90	39,97

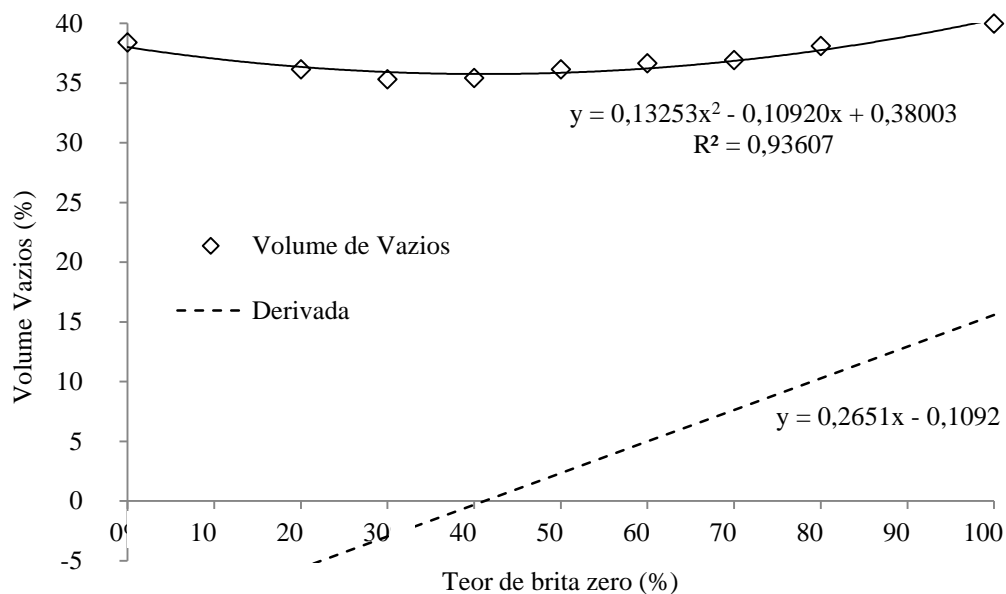


Figura 67 – Determinação da compactação ótima entre a brita 1 e brita zero.

Determinada a composição M1 que corresponde ao menor volume de vazios entre brita 1 e brita zero, determinou-se então a composição ótima entre a mistura M1 e a areia grossa. A Tabela 38 apresenta a massa unitária, a massa específica e o volume de vazios das diferentes composições de M1 e areia grossa.

A Figura 68 apresenta a função que descreve o comportamento do volume de vazios em função do teor de areia grossa. A figura apresenta também a derivada da referida função. Igualando-se a derivada a zero determina-se o teor da mistura M1, e areia grossa, com menor volume de vazios. Determinou-se assim que a composição denominada de M2 correspondente a 48,60% de areia grossa e 51,40 % de M1.

Tabela 38 – Ensaio de compactação entre M1 e Areia Grossa.

% M1	% Areia Grossa	Massa Unitária (kg/dm <sup>3</sup> )	Massa Específica da Mistura (kg/dm <sup>3</sup> )	Vazios (%)
100	0	1,86	2,900	35,92
80	20	2,02	2,846	28,90
70	30	2,08	2,819	26,35
60	40	2,09	2,792	25,00
50	50	2,07	2,765	25,29
40	60	2,00	2,738	26,82
30	70	1,94	2,711	28,51
20	80	1,86	2,684	30,63
0	100	1,70	2,630	35,45

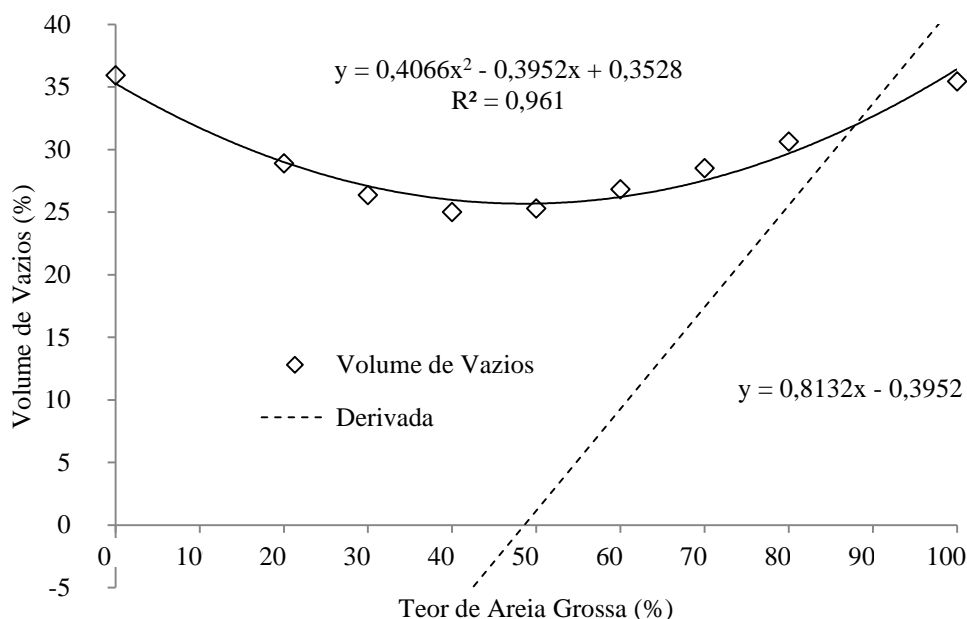


Figura 68 – Determinação da compactidade ótima entre M1 e areia grossa.

Determinada a composição M2, que corresponde ao menor volume de vazios entre a mistura M1 e a areia grossa, determinou-se então a composição ótima entre a mistura M2 e a areia média. A Tabela 39 apresenta a massa unitária, a massa específica e o volume de vazios das diferentes composições de M2 e areia média.

A Figura 69 apresenta a função que descreve o comportamento do volume de vazios em função do teor de areia média. A figura apresenta também a derivada da referida função. Igualando-se a derivada a zero determina-se o teor da mistura M2, e areia média, com menor volume de vazios. Chega-se assim à composição denominada de M3 correspondente a 0,00% de areia média e 100 % de M2. Ou seja, M2 é igual a M3, a composição com a areia média não resultou na diminuição do volume de vazios da mistura em nenhum teor.

Tabela 39 – Ensaio de compactidade entre a mistura M2 e a areia média.

M2	% Areia Média	Massa Unitária da Mistura (kg/dm <sup>3</sup> )	Massa Específica da Mistura (kg/dm <sup>3</sup> )	Volume de Vazios (%)
100	0	2,06	2,769	25,65
80	20	2,04	2,741	25,51
70	30	2,01	2,727	26,41
60	40	1,97	2,713	27,57
50	50	1,91	2,699	29,25
40	60	1,88	2,686	30,05
30	70	1,82	2,672	31,85
20	80	1,76	2,658	33,90
0	100	1,62	2,630	38,41

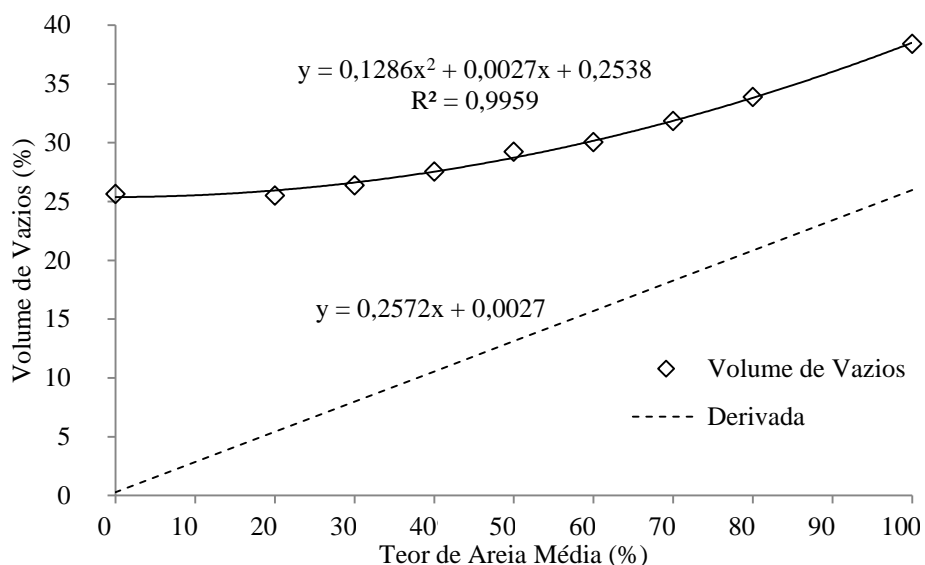


Figura 69 – Determinação da compacidade ótima entre M2 e areia média.

A partir da composição M3, que no presente estudo verificou-se ser igual a M2, determinou-se então a composição ótima entre a mistura M3 e a areia fina. A Tabela 40 apresenta a massa unitária, a massa específica e o volume de vazios das diferentes composições de M3 e areia fina.

A Figura 70 apresenta a função que descreve o comportamento do volume de vazios em função do teor de areia fina. A figura apresenta também a derivada da referida função. Igualando-se a derivada a zero determina-se o teor da mistura M3, e areia fina, com menor volume de vazios. Obteve-se assim a composição denominada de M4 correspondente a 4,17% de areia fina e 95,83 % de M3.

Tabela 40 – Ensaio de compacidade entre a mistura M3 e areia fina.

M3	% Areia Fina	Massa Unitária da Mistura (kg/dm³)	Massa Específica Mistura (kg/dm³)	Volume de Vazios (%)
100	0	2,06	2,769	25,54
80	20	2,13	2,741	22,32
70	30	2,06	2,727	24,53
60	40	1,99	2,713	26,57
50	50	1,92	2,699	28,83
40	60	1,86	2,686	30,88
30	70	1,77	2,672	33,75
20	80	1,70	2,658	36,21
0	100	1,53	2,630	41,77

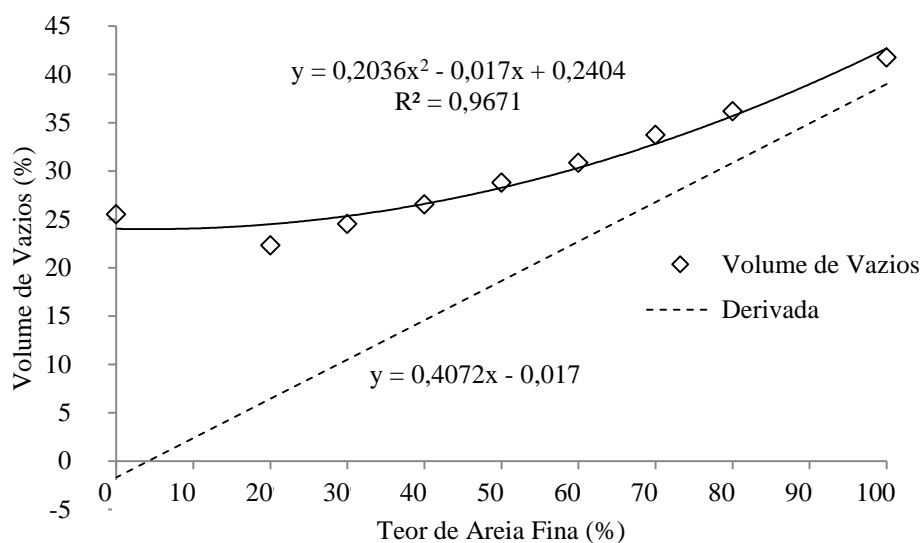


Figura 70 – Determinação da compactidade ótima entre M3 e areia fina.

A combinação de agregados por fim então é definida como sendo composta por 4,17% de areia fina, 0,00% de areia média, 46,57% de areia grossa, 20,29% de brita zero e 28,97% de brita 1. Essa composição de agregados apresenta um volume de vazios de 24%.

Determinada a fase agregado passou-se então à determinação da fase pasta. Foram utilizadas duas pastas diferentes neste estudo, uma pasta para dosagem de traço de concreto de alta resistência e uma pasta para dosagem de concreto convencional.

Para o concreto de alta resistência a “pasta número 1” é composta por cimento e sílica ativa, na proporção de 10 % de sílica em relação à massa de cimento. A relação água/aglomerante adotada foi de 0,17. O teor de aditivo superplastificante foi de 1,32%, mesmo teor utilizado na composição dos traços T1 a T5.

Para o concreto convencional a “pasta número 2” é composta por cimento e sílica ativa também na proporção de 10% de sílica em relação à massa de cimento. A relação água/aglomerante adotada foi de 0,48. O teor de aditivo superplastificante foi de 0,25%, teor utilizado na composição de T6 a T10.

Determinada a composição do esqueleto granular e a composição da pasta dos concretos de alta resistência e concreto convencional, determinou-se então as misturas de concreto a serem moldados no laboratório para determinação do traço.

A Tabela 41 apresenta as misturas que foram moldadas em laboratório para definição do proporcionamento de concreto convencional. A determinação do traço é feita através da



variação do excesso de pasta no traço. São testados teores de excesso de pasta de 2%, 4%, 8% e 16% da “pasta número 2”. A partir das misturas estabelecidas determina-se em laboratório qual teor de excesso de pasta propicia ao esqueleto granular o abatimento de  $100 \pm 20$  mm, medido de acordo com a NM 67 (ABNT, 1996).

A tabela 42 apresenta as misturas que foram moldadas em laboratório para determinação do traço de concreto de alta resistência. A determinação do traço é feita através da variação do excesso de pasta no traço. São testados teores de excesso de pasta de 2%, 4%, 8% e 16% da “pasta número 1”. A partir das misturas estabelecidas determina-se em laboratório qual teor de excesso de pasta propicia ao esqueleto granular o abatimento de  $200 \pm 20$  mm, medido de acordo com a NM 67 (ABNT, 1996).

Tabela 41 – Misturas experimentais para determinação do traço de concreto convencional (Traço11) (Método Toralles-Carbonari, 1996).

Volume de Vazios (%)		24			
	Teor de Excesso de pasta (%)	2	4	8	16
Fase Pasta	Volume de Pasta (%)	26	28	32	40
	Água (kg)	154	166	190	237
	Cimento (kg)	292	315	360	449
	Sílica Ativa (kg)	29	31	36	45
	Superplastificante (kg)	0,80	0,87	0,99	1,24
	Relação A/A	0,480	0,480	0,480	0,480
	Fase Agregado	Teor de Agregado (%)	74	72	68
Brita 1 (kg)		592	576	544	480
Brita zero (kg)		415	404	381	336
Areia Grossa (kg)		952	926	875	772
Areia Fina (kg)		85	83	78	69

Tabela 42 – Misturas experimentais para determinação do traço de concreto de alta resistência (Traço 12) (Método Toralles-Carbonari, 1996).

Volume de Vazios (%)		24			
	Teor de Excesso de pasta (%)	2	4	8	16
Fase Pasta	Volume de Pasta (%)	26	28	32	40
	Água (kg)	88	95	109	136
	Cimento (kg)	473	510	582	728
	Sílica Ativa (kg)	47	51	58	73
	Superplastificante (kg)	6,87	7,40	8,46	10,57
	Relação A/A	0,17	0,17	0,17	0,17
	Fase Agregado	Teor de Agregado (%)	74	72	68
Brita 1 (kg)		592	576	544	480
Brita zero (kg)		415	404	381	336
Areia Grossa (kg)		952	926	875	772
Areia Fina (kg)		85	83	78	69

#### 4.5.1.3 Ensaios realizados

Os traços apresentados na tabela 35, tabela 36, tabela 41 e tabela 42 foram moldados no laboratório e com os mesmos realizaram-se os ensaios abaixo descritos.

##### 4.5.1.3.1 Abatimento

O ensaio de abatimento foi realizado de acordo com a NM 67 (ABNT, 1996). Para os traços de concreto da Tabela 35 e da Tabela 36 o abatimento e o teor de aditivo superplastificante foram fixados, ajustando-se o abatimento experimentalmente através do consumo de água de mistura. Para os traços da Tabela 41 e da Tabela 42 o abatimento foi simplesmente medido segundo a NM 67 (ABNT, 1996).

##### 4.5.1.3.2 Consistência pelo espalhamento na mesa de Graff

A determinação da consistência pelo espalhamento na mesa de Graff é aplicável ao concreto cujo espalhamento seja igual ou superior a 350 mm. A determinação da consistência pelo espalhamento na mesa de Graff foi determinado segundo a NM 68 (ABNT, 1998). Essa norma

define a aparelhagem utilizada, composta basicamente pela mesa de espalhamento, o molde e o soquete de madeira.

O ensaio consiste no preenchimento do molde tronco cônico em duas camadas de volume aproximadamente iguais, aplicando em cada camada 10 golpes com soquete uniformemente distribuídos. Após moldagem aguarda-se 1 minuto e retira-se o molde tronco cônico. Após 15 segundos da retirada do molde, iniciam-se as 15 quedas da mesa de uma altura de 40 mm. O espalhamento é determinado através da medição, em milímetros, dos dois maiores diâmetros circunscritos pelo concreto. A diferença entre os dois diâmetros deve ser menor que 40 mm, caso contrário o ensaio deve ser repetido.

A consistência do concreto é a média aritmética dos dois diâmetros determinados no ensaio, como mostra a equação 22:

$$D = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad \text{Equação 22}$$

Onde:

$D$  é a consistência do concreto, em milímetros.

$d_1$  e  $d_2$  são os diâmetros medidos em mm determinados experimentalmente.

A fluidez do concreto é definida pela NM 68 (ABNT, 1998) através da equação 23.

$$f = \frac{D}{d} \quad \text{Equação 23}$$

Onde:

$f$  é a fluidez do concreto.

$D$  é a consistência do concreto.

$d$  é o diâmetro da base maior do molde tronco cônico igual a 200 mm.

#### 4.5.1.3.3 Resistência à Compressão

Foram moldados 3 corpos de prova para cada uma das diferentes misturas. A moldagem dos corpos de prova foi realizada seguindo-se os procedimentos da NBR 5738 (ABNT, 2015). O

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

#### 4.5.1.3.4 Módulo de elasticidade

Foram moldados 2 corpos de prova para cada uma das diferentes misturas. A moldagem dos corpos de prova foi realizada seguindo-se os procedimentos da NBR 5738 (ABNT, 2015).

O ensaio para determinação do módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial do concreto foi realizado seguindo as recomendações da NBR 8522 (ABNT, 2008).

O instrumento utilizado para obtenção das deformações foi um relógio medidor com resolução de  $1 \pm 10^{-3}$  mm e erro relativo máximo inferior a 1%. Os pontos utilizados no cálculo do módulo de elasticidade foram a tensão e a deformação correspondente a 0,5 MPa e a tensão e deformação correspondente a 30% da carga de ruptura. A Figura 71 apresenta os ciclos de carregamento utilizados na determinação do módulo de elasticidade, conforme recomendação da norma.

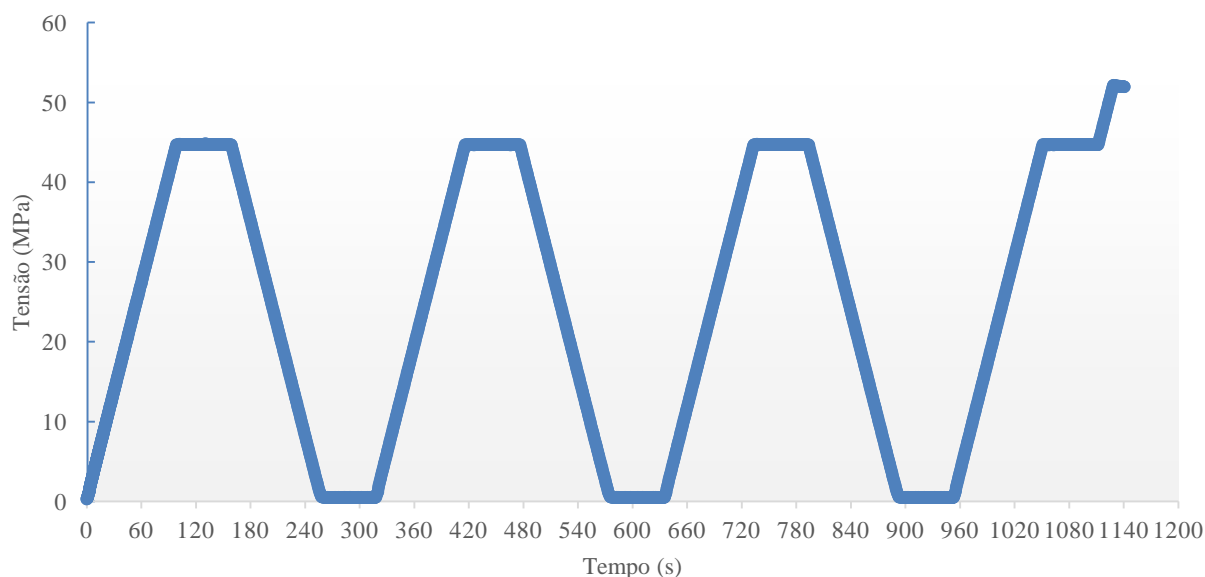


Figura 71 – Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade do concreto.

#### 4.5.1.3.5 Reologia das pastas

Foi realizada a caracterização da reologia das pastas dos diferentes traços de concreto estudados neste experimento. Utilizou-se para caracterização das pastas o reometro Brookfield R/S Plus

de geometria do tipo cilíndricos coaxiais com diâmetro de 25 mm (CC25), como mostrado na Figura 72.



Figura 72 – Reometro Brookfield R/S Plus com geometria do tipo cilíndricos coaxiais.

O ensaio consistiu na aplicação de uma taxa crescente de cisalhamento com aceleração de 0 a 160 (1/s) em 160 segundos, seguida de uma desaceleração até 0 em mais 160 segundos, como ilustra a Figura 73. Betioli *et al.* (2009) e também Teixeira *et al.* (2014) utilizaram este procedimento, contudo com intervalo de 2 minutos e taxa de cisalhamento variando de 0 a 100 (1/s). Durante os ensaios a temperatura e a umidade relativa do ar foram monitoradas e verificou-se que as mesmas se mantiveram em  $24\pm 2^{\circ}\text{C}$  e  $60\% \pm 10\%$  respectivamente.

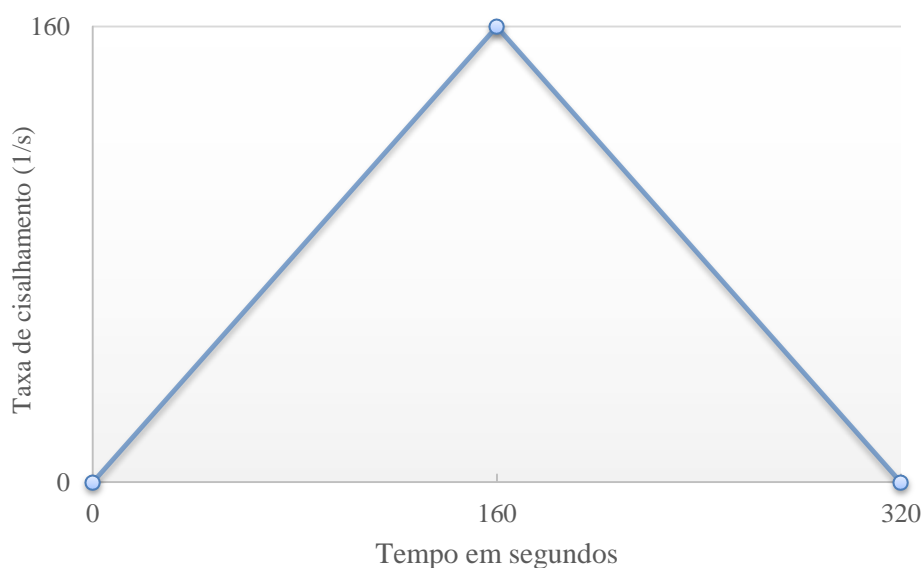


Figura 73 – Rampa utilizada na caracterização reométrica.

Segundo Teixeira *et al.* (2014), a partir da variação da taxa de cisalhamento pode-se traçar o perfil reológico dos materiais e assim determinar importantes propriedades reológicas, tais como viscosidade média ( $\eta$ ), tensão de escoamento ( $\sigma_0$ ) e área de histerese (AH). A Figura 74 apresenta um esquema ilustrando a disposição gráfica destes parâmetros. A viscosidade média foi determinada para uma faixa de taxa de deformação variando de 50 a 150 (1/s), parâmetro também adotado no estudo realizado por Giroto *et al.* (2014). O referido autor justifica a adoção desta faixa de ajuste tendo em vista a taxa de aplicação e a taxa de trabalho do material em aplicações de engenharia. A tensão de escoamento foi aproximada pela extrapolação da curva de tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento até a taxa de 0 (1/s), critério também adotado por Teixeira *et al.* (2014). Outro parâmetro analisado com os resultados do ensaio de fluxo é a área de histerese (AH). Esta área é formada através das curvas de aceleração e desaceleração no gráfico de tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento (OLIVEIRA *et al.*, 2000; BETIOLI *et al.*, 2009 ) e indica o grau de estruturação/desestruturação do sistema.

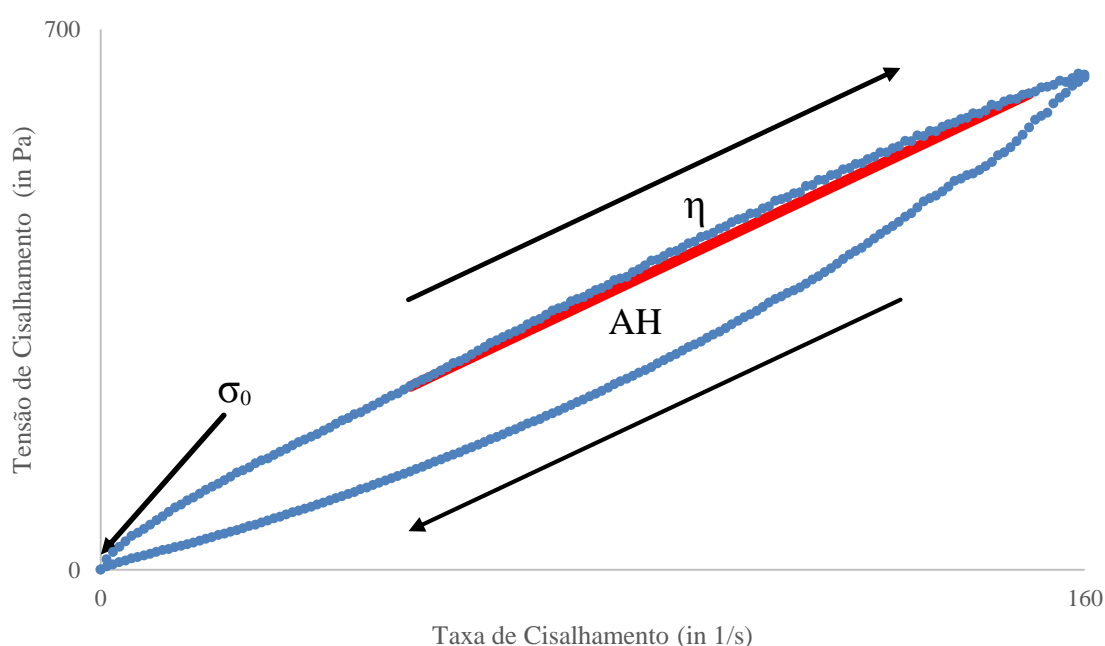


Figura 74 – Perfil reológico com as características reológicas determinadas.

Os ensaios foram realizados em cada amostra em dois tempos distintos, sendo o primeiro no tempo de 10 min e segundo no tempo de 30 minutos. Teixeira *et al.* (2014) afirmam que ainda não há um método normatizado de mistura para a produção de pastas cimentícias a serem utilizadas na determinação das propriedades reológicas. No presente estudo foi adotado o procedimento sugerido pela norma Mercosul NM 43 (2002), que estabelece os procedimentos

necessários para determinação da pasta de consistência normal, para preparação de pasta. A composição das pastas é apresentada na Tabela 43.

Tabela 43 – Misturas experimentais para caracterização reométrica das pastas utilizadas resultantes das dosagens dos traços de concreto.

Traço <sup>11</sup>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Cimento (g)	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
Sílica Ativa (g)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Superplastificante (g)	7,26	7,26	7,26	7,26	7,26	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,37	7,26
Água (g)	107	95	94	100	102	325	278	269	281	275	264	93

#### 4.5.2 Resultados Estudo 4 – Máxima espessura de argamassa versus empacotamento máximo

##### 4.5.2.1 Abatimento

O ensaio de abatimento foi empregado na determinação do teor de excesso de pasta no método Toralles-Carbonari (1996). A Tabela 44 apresenta os teores de pasta estudados e o respectivo abatimento determinado para o concreto de alta resistência. A Figura 75 apresenta o abatimento em função do teor de excesso de pasta. No gráfico visualmente determina-se que o teor de excesso de pasta correspondente ao abatimento de  $200 \pm 20$  mm foi de 8%. Para concreto de alta resistência que apresenta viscosidade elevada o abatimento de 200 mm propicia a trabalhabilidade adequada (AÏTCIN, 2000).

Tabela 44 – Abatimento em função do teor de excesso de pasta determinado experimentalmente para traço 12 – concreto de alta resistência.

	Teor de Excesso de pasta (%)			
	2	4	8	16
Abatimento (mm)	5	30	205	250

<sup>11</sup> Traços de 1 a 5 são pastas oriundas dos traços de CAR dosados com o parametro EMA; Traços 6 a 10 são pastas oriundas dos traços de concreto convencionais dosados com o parametro EMA; Traço 11 é a pasta utilizada na dosagem do concreto convencional dosado segundo método Toralles-Carbonari (1996). Traço 12 é a pasta utilizada na dosagem do CAR dosado segundo método Toralles-Carbonari (1996).

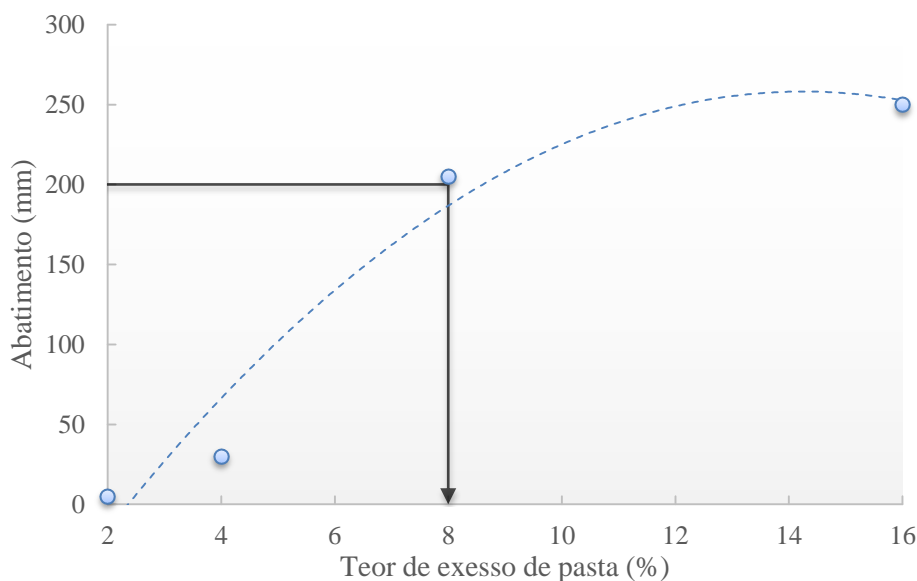


Figura 75 – Abatimento em função do teor de excesso de pasta traço 12.

A Tabela 45 apresenta o abatimento determinado experimentalmente para os diferentes teores de excesso de pasta para o concreto convencional. Os dados expostos na Tabela 45 foram plotados na Figura 76, onde determina-se que o teor de excesso de pasta aproximado para se ter um abatimento de 100 mm foi aproximadamente 6 %.

Tabela 45 – Abatimento em função do teor de excesso de pasta determinado experimentalmente para traço 11 – concreto convencional.

	Teor de Excesso de pasta (%)			
	2	4	8	16
Abatimento (mm)	40	70	145	250

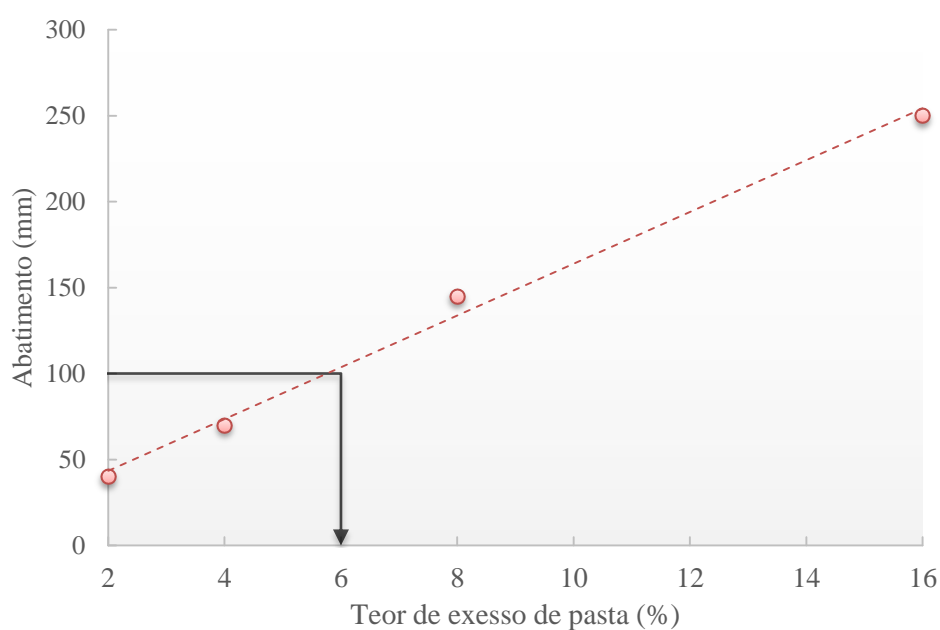


Figura 76 – Abatimento em função do teor de excesso de pasta traço 11.



Nos ensaios de determinação da espessura média de argamassa (EMA), o ensaio de abatimento foi utilizado para se definir a quantidade de água da mistura. A Tabela 46 apresenta o consumo de água para que os diferentes traços de concreto apresentassem o abatimento de  $200 \pm 20$  mm.

Tabela 46 – Consumo de água por metro cúbico de concreto para diferentes EMA para os traços de concreto de alta resistência.

	<b>Espessura de argamassa (mm)</b>				
	<b>4,329</b>	<b>3,267</b>	<b>2,391</b>	<b>1,650</b>	<b>1,011</b>
Água do ensaio (kg)	107	95	94	100	102
Relação água/aglomerante	0,19	0,17	0,17	0,18	0,19

Na Tabela 47 são apresentados os consumos de água para o que os concretos convencionais apresentem experimentalmente o abatimento de  $100 \pm 20$  mm.

Tabela 47 – Consumo de água por metro cúbico de concreto para diferentes EMA para os traços de concreto convencional.

	<b>Espessura de argamassa (mm)</b>				
	<b>4,329</b>	<b>3,267</b>	<b>2,391</b>	<b>1,650</b>	<b>1,011</b>
Água do ensaio (kg)	207	177	171	179	175
Relação água/aglomerante	0,59	0,50	0,49	0,51	0,50

A Figura 77 apresenta o consumo de água para os traços de concreto que foram dosados com consumo de aglomerante de  $550 \text{ kg/m}^3$  e  $350 \text{ kg/m}^3$ . Também podem ser visualizadas nessa figura as derivadas das equações que descrevem o comportamento do consumo de água em função da espessura média de argamassa. Observa-se que para os traços de concreto de alta resistência a espessura média de argamassa, que resultou no menor consumo de água, foi de aproximadamente 2,55 mm enquanto que para o concreto convencional a espessura média de argamassa que resultou no menor consumo de água foi de 2,07 mm.

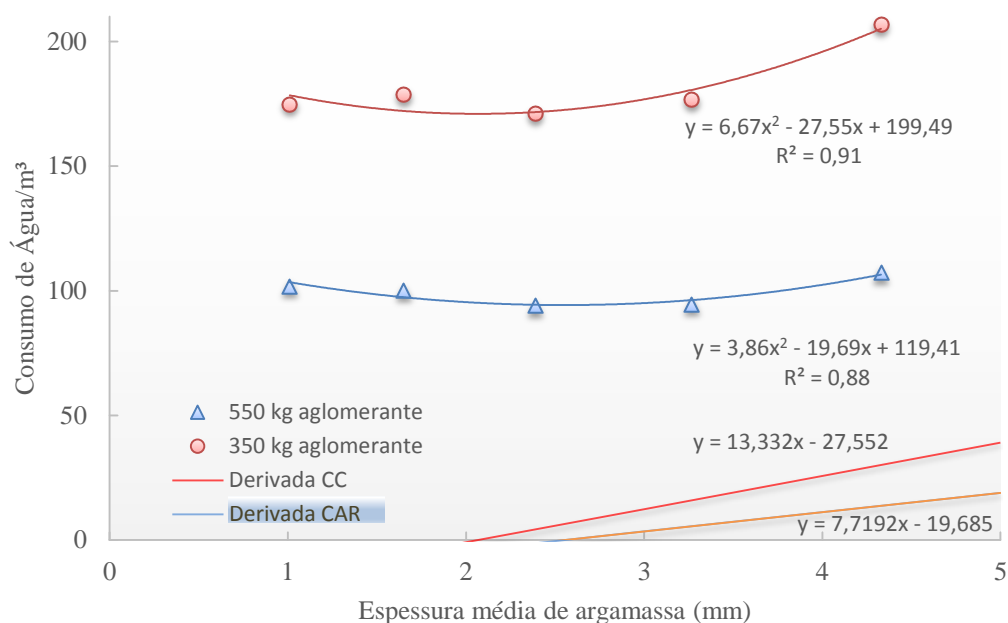


Figura 77 – Consumo de água em função da espessura média de argamassa.

A partir do empacotamento máximo e do teor de excesso de pasta definidos de acordo com o método Toralles-Carbonari (1996), foram determinados os traços de concreto de alta resistência e de concreto convencional para o abatimento considerado conforme mostrado na Figura 75 e Figura 76, respectivamente. Os traços são apresentados na Tabela 48. Da mesma forma definiram-se os traços de concreto de alta resistência e de concreto convencional dosados segundo EMA a partir do consumo de água mínimo determinado utilizando as curvas apresentadas na Figura 77. Estes traços também são apresentados na Tabela 48.

Tabela 48 – Traços de concretos otimizados dosados segundo EMA e segundo Empacotamento máximo dos agregados.

Materiais por m <sup>3</sup>	EMA		Empacotamento	
	CAD	CC	CAD	CC
Cimento (kg)	500	318	582	337
Sílica Ativa (kg)	50	32	58	34
Água (kg)	94,3	171	109	178
Superplastificante (kg)	7,26	0,875	8,46	0,93
Brita 1 (kg)	1170	1260	544	560
Brita zero (kg)	-	-	381	392
Areia Grossa (kg)	816	725	875	901
Areia Média (kg)	-	-	-	-
Areia Fina (kg)	-	-	78	81

#### 4.5.2.2 Determinação da consistência pelo espalhamento na mesa de Graff

Para complementar a caracterização do concreto no estado fresco determinou-se a consistência pelo espalhamento na mesa de Graff. A Tabela 49 apresenta o espalhamento na mesa de Graff e a fluidez do concreto de alta resistência. Já a Tabela 50 apresenta o espalhamento na mesa de Graff e a fluidez do concreto convencional dosados variando-se a EMA. A figura 78 mostra o comportamento da fluidez em função da espessura média de argamassa. O aumento da fluidez do concreto é dado pelo aumento do consumo de água e pelo decréscimo da proporção entre areia/brita. Para o concreto convencional estes dois parâmetros são concorrentes, não havendo predominância de um sobre o outro. Já para o concreto de alta resistência observa-se que o consumo de água é predominante e que os concretos com maior consumo de água têm maior fluidez. Poder-se-ia dizer também que os concretos com menor consumo de água são mais viscosos.

Tabela 49 – Espalhamento na mesa de Graff para os concretos de alta resistência dosados variando-se a EMA.

	Espessura de argamassa (mm)				
	4,329	3,267	2,391	1,650	1,011
d <sub>1</sub> (mm)	410	350	260	280	410
d <sub>2</sub> (mm)	430	340	240	260	410
<b>Graff (mm)</b>	<b>420</b>	<b>345</b>	<b>250</b>	<b>270</b>	<b>410</b>
Fluidez	2,100	1,725	1,250	1,350	2,050

Tabela 50 – Espalhamento na mesa de Graff para os concretos convencionais dosados variando-se a EMA.

	Espessura de argamassa (mm)				
	4,329	3,267	2,391	1,650	1,011
d <sub>1</sub> (mm)	420	400	400	380	430
d <sub>2</sub> (mm)	370	380	400	400	430
<b>Graff (mm)</b>	<b>395</b>	<b>390</b>	<b>400</b>	<b>390</b>	<b>430</b>
Fluidez	1,975	1,950	2,000	1,950	2,150

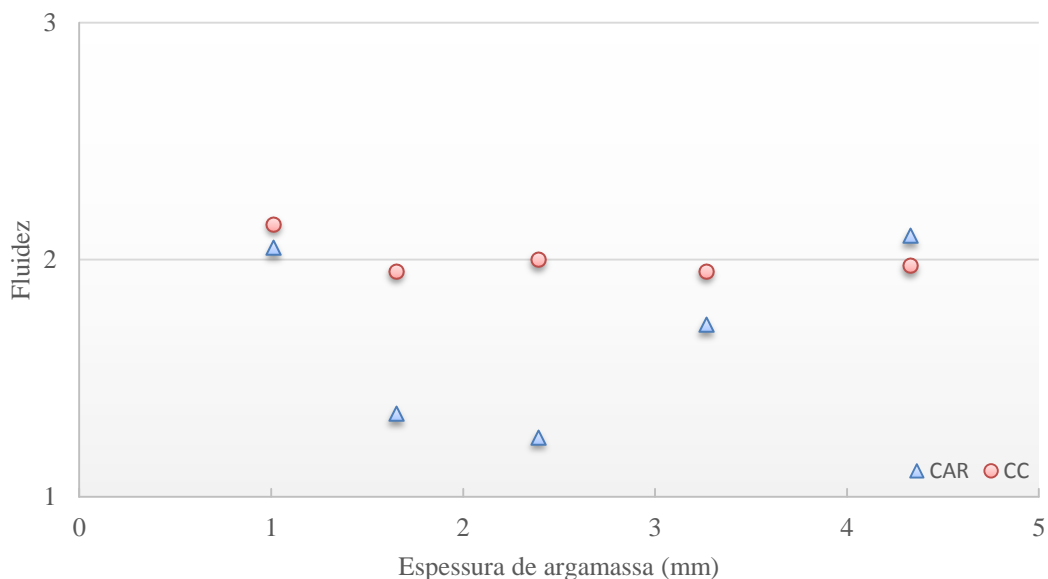


Figura 78 – Fluidez em função da espessura média de argamassa.

A Tabela 51 e a Tabela 52 apresentam o espalhamento e a fluidez dos traços de concreto dosados segundo o método proposto por Toralles-Carbonari (1996) para o concreto de alta resistência e para o concreto convencional, respectivamente. A figura 79 apresenta a relação existente entre a fluidez e o teor de excesso de pasta.

Tabela 51 – Espalhamento na mesa de Graff para os traços de concreto de alta resistência dosados pelo método Toralles-Carbonari (1996).

	Teor de Excesso de pasta (%)			
	2	4	8	16
d <sub>1</sub> (mm)	200	200	320	560
d <sub>2</sub> (mm)	200	200	330	600
Graff (mm)	200	200	325	580
Fluidez	1,000	1,000	1,625	2,900

Tabela 52 – Espalhamento na mesa de Graff para os traços de concreto de convencional dosados pelo método Toralles-Carbonari (1996).

	Teor de Excesso de pasta (%)			
	2	4	8	16
d <sub>1</sub> (mm)	260	310	410	570
d <sub>2</sub> (mm)	260	310	410	590
Graff (mm)	260	310	410	580
Fluidez	1,300	1,550	2,050	2,900

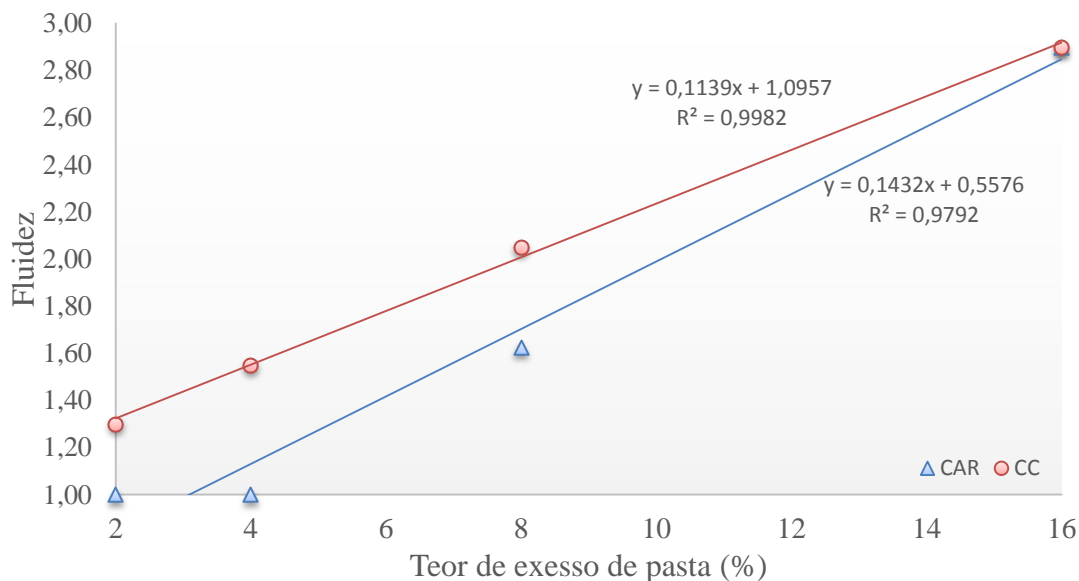


Figura 79 – Fluidez em função do teor de excesso de pasta para os concretos dosados com o método Toralles-Carbonari (1996).

Observa-se que a fluidez é diretamente proporcional ao teor de excesso de pasta. Nota-se também que para teores baixos de excesso de pasta o concreto convencional apresenta maior fluidez, ou seja, o concreto de alta resistência é mais viscoso. Já para teores maiores de excesso de pasta a fluidez do concreto de alta resistência e do concreto convencional convergem para um mesmo valor.

#### 4.5.2.3 Resistência à Compressão

A Tabela 53 apresenta a resistência à compressão dos corpos-de-prova de concreto de alta resistência dosados para diferentes EMA, determinada aos 28 dias. A resistência à compressão, como esperado, é inversamente proporcional à relação água/aglomerante.

Tabela 53 – Resistência à compressão dos concretos de alta resistência dosados com EMA variável.

	Espessura de argamassa (mm)					
	4,329	3,267	2,391	1,650	1,011	
Água do ensaio (kg)	107	95	94	100	102	
Relação água/aglomerante	0,19	0,17	0,17	0,18	0,19	
Resistência à Compressão (MPa)	01	112,19	135,24	110,99	74,19	99,79
	02	100,56	120,42	116,08	116,64	55,52
	03	115,15	140,50	110,92	117,68	73,64
<b>Resistência à compressão Média (MPa)</b>		<b>109,30</b>	<b>132,05</b>	<b>112,66</b>	<b>102,83</b>	<b>76,31</b>
Desvio Padrão (MPa)		6,30	8,50	2,42	20,26	18,17
CV (%)		5,76	6,44	2,15	19,70	23,81
Resistência Potencial (MPa)		<b>115,15</b>	<b>140,50</b>	<b>116,08</b>	<b>117,68</b>	<b>99,79</b>

Observa-se que para os concretos dosados com espessuras de argamassa menores do que 2 mm o coeficiente de variação apresentou-se bastante elevado. Este fato se deve à deficiência de compactação apresentada por esses traços de concreto. A Figura 80 e a Figura 81 mostram os corpos de prova utilizados no ensaio antes da ruptura. Também foram determinadas as massas dos corpos de prova antes do ensaio, bem como as suas dimensões. A partir destas medidas determinou-se a massa específica dos corpos de prova. O desvio padrão médio encontrado na massa específica dos corpos de prova moldados com os traços com EMA maior que 2 mm foi de 13 kg/m<sup>3</sup>. Já para os dois outros traços foi de 33 e 72 kg/m<sup>3</sup>. Assim não se atribui esse elevado coeficiente de variação à deficiência da preparação do topo dos corpos de prova e sim à falta de compactação do concreto. Observa-se também que nos demais corpos de prova a compactação apresentou-se adequada.



Figura 80 – Corpo de prova do traço de CAD com EMA 1,65 mm no momento da ruptura.



Figura 81 – Corpo de prova do traço de CAD com EMA 1,01 mm no momento da ruptura.

A Tabela 54 apresenta a resistência à compressão dos corpos de prova moldados com diferentes traços de concreto convencional dosados para diferentes EMA. Como esperado, a resistência à compressão apresentou-se inversamente proporcional à relação água/aglomerante.

Tabela 54 – Resistência à compressão dos concretos convencionais dosados com EMA variável.

		Espessura de argamassa (mm)				
		4,329	3,267	2,391	1,650	1,011
Água do ensaio (kg)		207	177	171	179	175
Relação água/aglomerante		0,59	0,50	0,49	0,51	0,50
Resistência à Compressão (MPa)	01	42,06	50,69	47,84	46,35	43,73
	02	43,55	42,68	45,13	47,16	37,82
	03	41,11	52,45	48,30	46,49	41,38
<b>Resistência à compressão Média (MPa)</b>		<b>42,24</b>	<b>48,61</b>	<b>47,09</b>	<b>46,67</b>	<b>40,98</b>
Desvio Padrão (MPa)		1,00	4,25	1,40	0,36	2,43
CV (%)		2,37	8,75	2,98	0,76	5,94
<b>Resistência Potencial (MPa)</b>		<b>42,06</b>	<b>52,45</b>	<b>48,30</b>	<b>47,16</b>	<b>43,73</b>

A Tabela 55 apresenta os resultados de resistência à compressão apurados na determinação do teor de excesso de pasta do concreto de alta resistência dosado segundo o método proposto por Toralles-Carbonari (1996). Como a pasta apresentou todas as suas características constantes nos diferentes traços, o ensaio permite se avaliar o efeito da variação do confinamento da pasta pelo esqueleto granular. Isto é, quanto maior o excesso de pasta, menos confinada está a pasta pois a distância entre as partículas de agregado é maior. O efeito do confinamento da pasta na resistência à compressão foi estudado por De Larrard (1999). Quanto maior o confinamento da pasta, maior a resistência. Quando, no entanto, o teor de excesso de pasta é muito pequeno, a compactidade é comprometida e a resistência à compressão diminui.

Tabela 55 – Resistência à compressão dos concretos de alta resistência dosados pelo método Toralles-Carbonari (1996).

		Teor de Excesso de pasta (%)			
		2	4	8	16
Relação água/aglomerante		0,17	0,17	0,17	0,17
Resistência à Compressão (MPa)	01	37,26	130,71	139,94	133,28
	02	53,14	99,57	148,67	129,08
	03	71,18	81,07	142,40	132,60
<b>Resistência à compressão Média (MPa)</b>		<b>53,86</b>	<b>103,78</b>	<b>143,67</b>	<b>131,65</b>
Desvio Padrão (MPa)		13,86	20,48	3,68	1,84
CV (%)		25,7	19,7	2,6	1,4
<b>Resistência potencial (MPa)</b>		<b>71,18</b>	<b>130,71</b>	<b>148,67</b>	<b>133,28</b>

A Tabela 56 apresenta os resultados de resistência à compressão apurados na determinação do teor de excesso de pasta do concreto convencional dosado segundo o método proposto por Toralles-Carbonari (1996).

Tabela 56 – Resistência à compressão dos concretos convencionais dosados pelo método Toralles-Carbonari (1996).

		Teor de Excesso de pasta (%)			
		2	4	8	16
Relação água/aglomerante		0,48	0,48	0,48	0,48
Resistência à Compressão (MPa)	01	57,41	51,62	51,60	47,81
	02	58,27	54,78	50,61	45,56
	03	57,64	45,34	53,06	48,33
<b>Resistência à compressão Média (MPa)</b>		<b>57,77</b>	<b>50,58</b>	<b>51,76</b>	<b>47,23</b>
Desvio Padrão (MPa)		0,44	4,81	1,23	1,47
CV (%)		0,80	9,5	2,4	3,1
<b>Resistência potencial (MPa)</b>		<b>58,27</b>	<b>54,78</b>	<b>53,06</b>	<b>48,33</b>

A partir das resistências potenciais apresentados na Tabela 53, Tabela 54, Tabela 55 e Tabela 56 e dos traços de concreto otimizados mostrados na Tabela 48, compara-se então a eficácia do empacotamento máximo granular e a adoção do parâmetro EMA proposto neste trabalho. Para realizar esta comparação utilizou-se como indicativo o consumo de aglomerante por metro cúbico de concreto. Para tanto dividiu-se a massa de cimento da mistura pela resistência à compressão do concreto. É importante que esta comparação sempre seja feita para o mesmo percentual de aditivo superplastificante e com relações água/aglomerante semelhantes. Na Tabela 57 é novamente apresentado o proporcionamento das misturas otimizadas juntamente com a resistência à compressão potencial das misturas. Na Figura 82 também podem ser vistos os resultados do cociente do consumo de aglomerante pela resistência à compressão.



Tabela 57 – Eficácia do empacotamento e do parâmetro EMA no proporcionamento de concreto de alta resistência e convencional.

Materiais por m <sup>3</sup>	EMA		Empacotamento	
	CAR	CC	CAR	CC
Cimento (kg)	500	318	582	337
Sílica Ativa (kg)	50	32	58	34
Água (kg)	94,3	171	109	178
Superplastificante (kg)	7,26	0,875	8,46	0,93
Brita 1 (kg)	1170	1260	544	560
Brita zero (kg)	-	-	381	392
Areia Grossa (kg)	816	725	875	901
Areia Fina (kg)	-	-	78	81
Resistência Potencial (MPa)	<b>140,5</b>	<b>47,73</b>	<b>148,67</b>	<b>53,92</b>
Relação Água/Aglomerante	<b>0,171</b>	<b>0,489</b>	<b>0,170</b>	<b>0,480</b>
% Superplastificante	0,0132	0,0025	0,0132	0,0025
Massa de aglomerante da mistura (kg)	550	350	640	371
Kg aglomerante/MPa	<b>3,91</b>	7,33	<b>4,30</b>	6,88

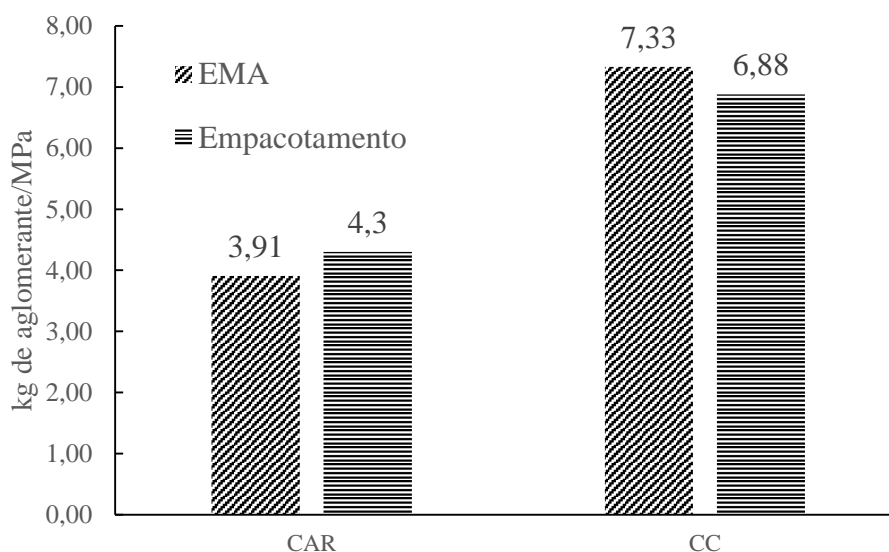


Figura 82 – Resistência à compressão versus consumo de aglomerante.

A partir da análise do parâmetro adotado, consumo de aglomerante por MPa, conclui-se que o parâmetro proposto (EMA) se mostrou mais eficaz do que a teoria do esqueleto granular com menor volume de vazios na dosagem de concreto de alta resistência. Na dosagem de um concreto de 140 MPa, por exemplo, dosado segundo as duas teorias, tem-se um consumo de 547 kg variando-se a EMA e um consumo de 602 kg empregando-se a teoria do esqueleto

granular com menor volume de vazios. Essa diferença de aglomerante corresponde a uma economia de 10% no consumo de aglomerante.

Na dosagem do concreto convencional observou-se o inverso. O concreto de resistência convencional proporcionado com esqueleto granular com menor volume de vazios mostrou-se como o mais econômico. Para dosagem de um concreto com 50 MPa, por exemplo, ter-se-ia um consumo de aglomerante de 366 kg para o traço de concreto proporcionado variando-se a EMA e um consumo de 344 kg de aglomerante dosando com esqueleto granular com menor volume de vazios, isto é, um consumo de aglomerante 6% menor de aglomerante.

A Figura 83 apresenta as diversas curvas granulométricas utilizadas totais (soma do agregado miúdo e graúdo). Observa-se que a curva granular “ótima”, que apresenta o menor volume de vazios, é contínua, enquanto que as demais curvas granulares são descontínuas.

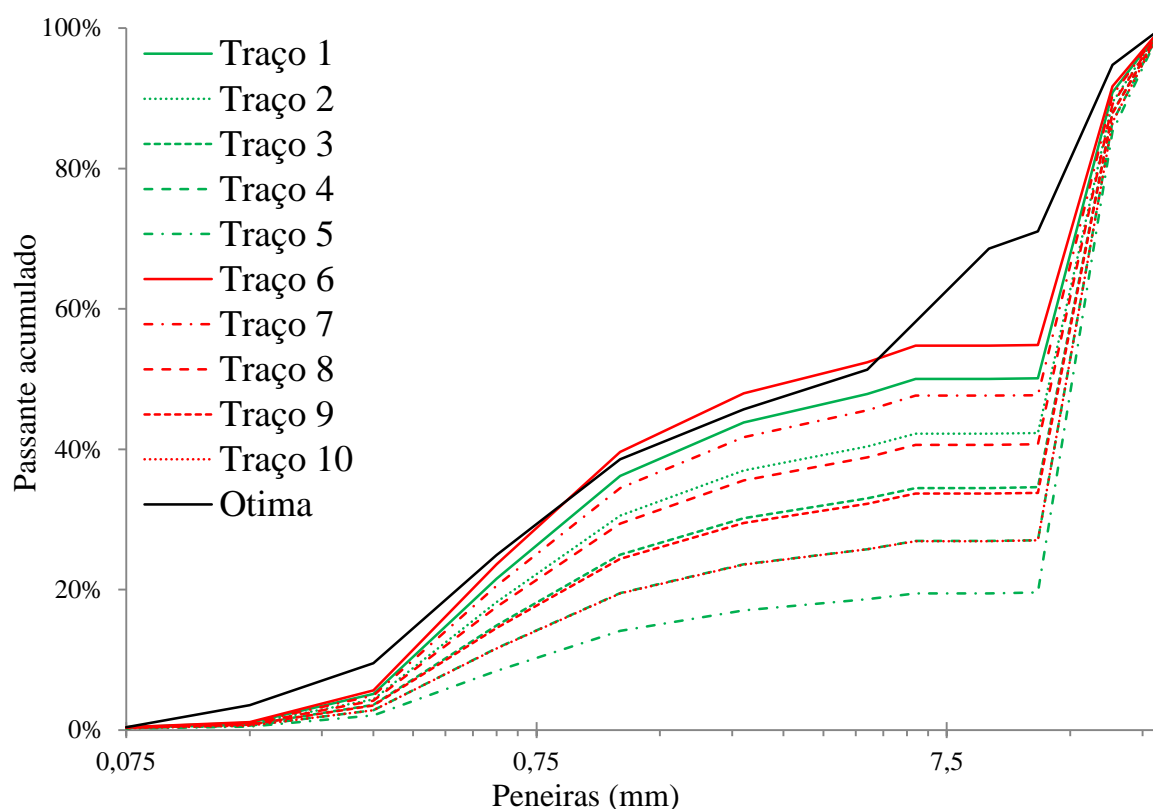


Figura 83 – Curvas granulométricas utilizadas nos diferentes traços de concreto.

O motivo pelo qual o concreto convencional apresentou menor consumo de aglomerante quando dosado empregando-se o esqueleto granular com menor volume de vazios enquanto o concreto de alta resistência apresentou comportamento inverso é explicado pela interação entre as curvas granulométricas do agregado e os parâmetros reológicos da pasta. A seguir é

apresentada a caracterização reológica das pastas de aglomerante utilizadas nos diferentes traços de concreto.

#### 4.5.2.4 Reologia das pastas

Com as curvas granulométricas apresentadas na Figura 83 foram dosados concretos de alta resistência e concretos convencionais. Para cada grupo de concretos foram fixados parâmetros de trabalhabilidade, isto é, para o concreto convencional o abatimento foi fixado em  $100\pm 20$  mm enquanto para o concreto de alta resistência o abatimento foi fixado em  $200\pm 20$  mm. No grupo de concretos dosados variando-se o parâmetro EMA a quantidade de água necessária para a obtenção do abatimento estabelecido foi variável, apresentando os consumos de água mostrados na Tabela 46, Tabela 47 para o concreto de alta resistência e para o concreto convencional, respectivamente. Nas Figura 84 a Figura 88 são apresentadas as caracterizações reológicas de cada uma das pastas utilizada nos traços Traço 1, Traço2, Traço3, Traço 4 e Traço 5 respectivamente, traços estes de concreto de alta resistência dosados variando-se a EMA. Na Figura 89 é apresentada a caracterização reológica da pasta utilizada na dosagem do Traço 15, Traço 16, Traço 17 e Traço 18.

Já nas Figura 90 a Figura 94 são apresentadas as caracterizações reológicas das pastas utilizadas nas dosagens do Traço 6, Traço 7, Traço 8, Traço 9 e Traço 10, respectivamente, traços estes de concretos convencionais dosados variando-se a EMA. Na Figura 95 é apresentada a caracterização reológica da pasta utilizada na dosagem do Traço 11, Traço 12, Traço 13 e Traço 14.

Como descrito na metodologia do trabalho, da caracterização reológica de cada uma das pastas foi determinada a tensão de cisalhamento inicial, a viscosidade e a área de histerese.

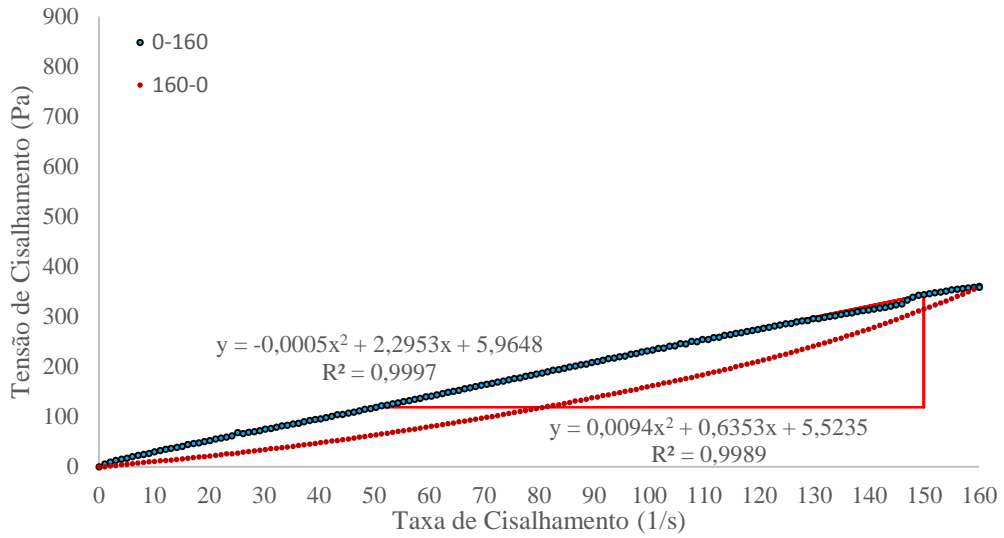


Figura 84 – Tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento da pasta do Traço 1.

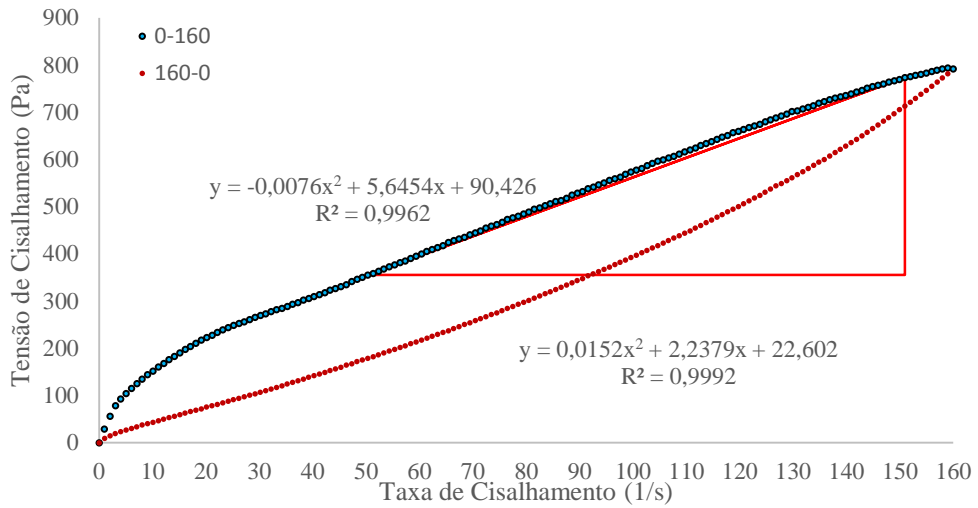


Figura 85 – Tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento da pasta do Traço 2.

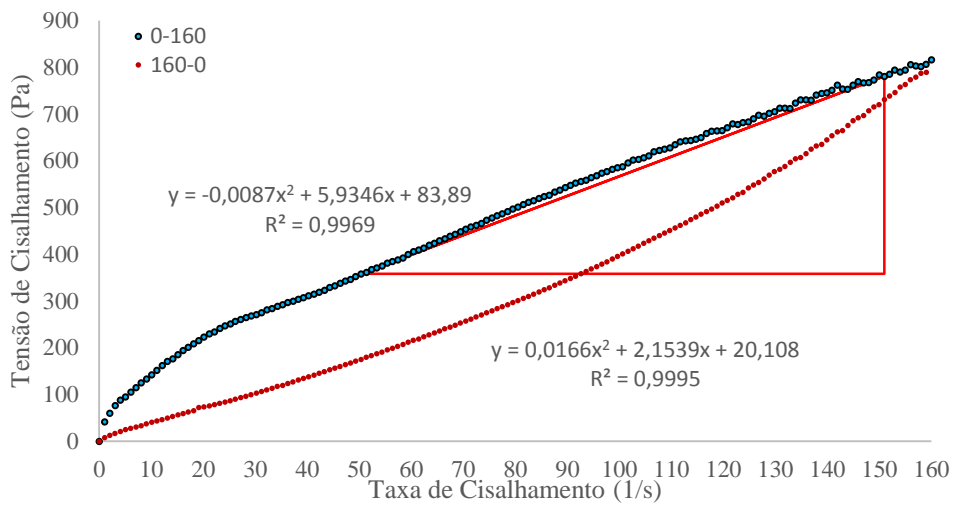


Figura 86 – Tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento da pasta do Traço 3.

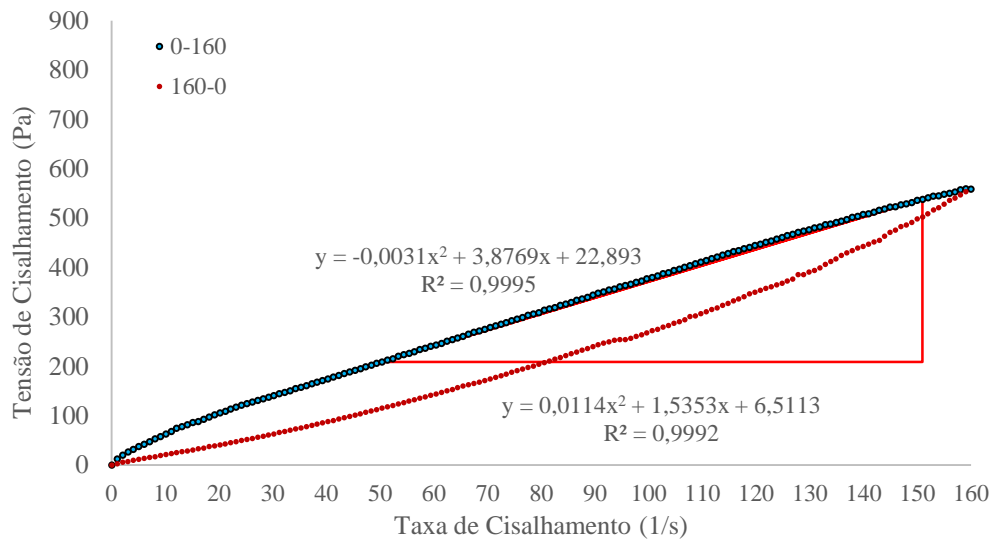


Figura 87 – Tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento da pasta do Traço 4.

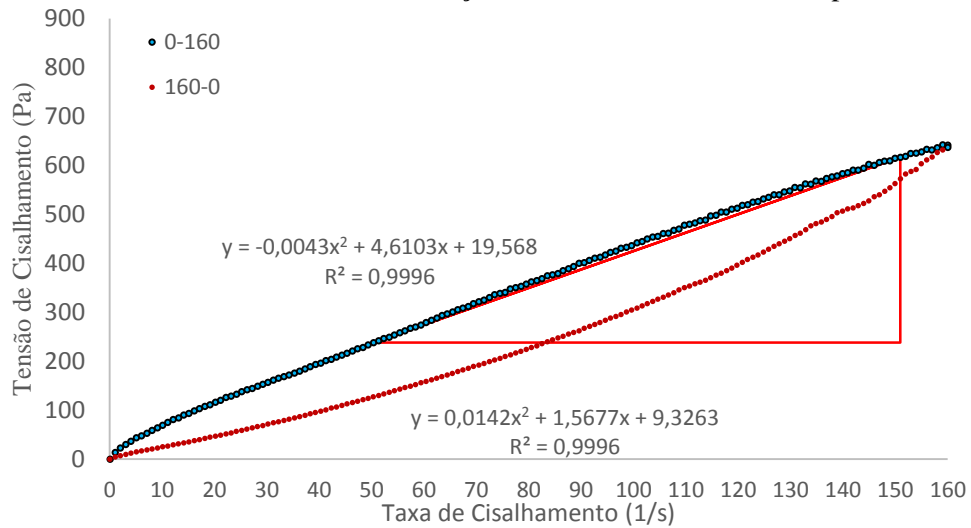


Figura 88 – Tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento da pasta do Traço 5.

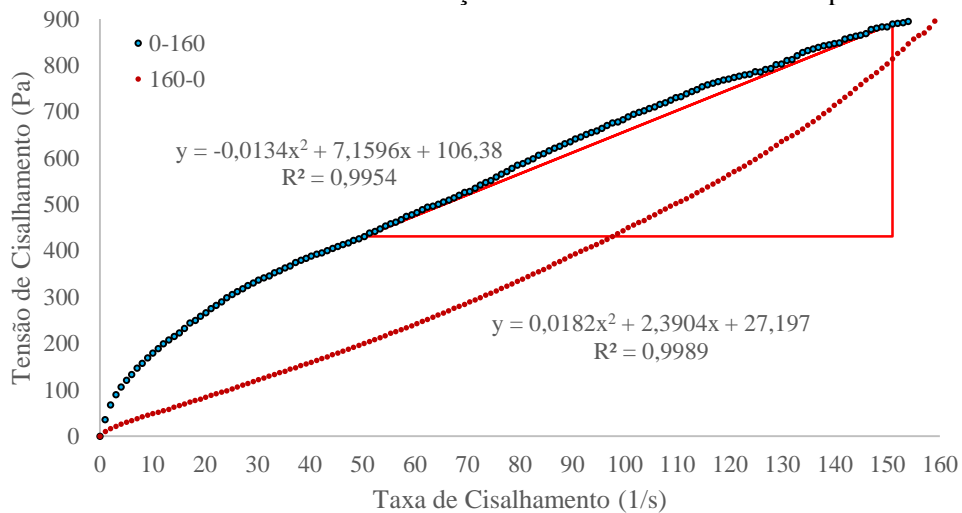


Figura 89 – Tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento da pasta do Traço 15.

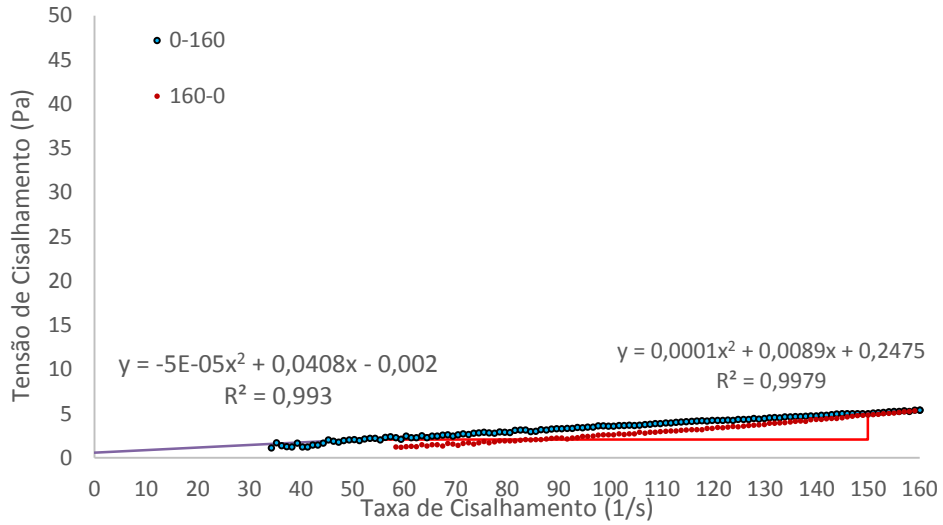


Figura 90 – Tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento da pasta do Traço 6.

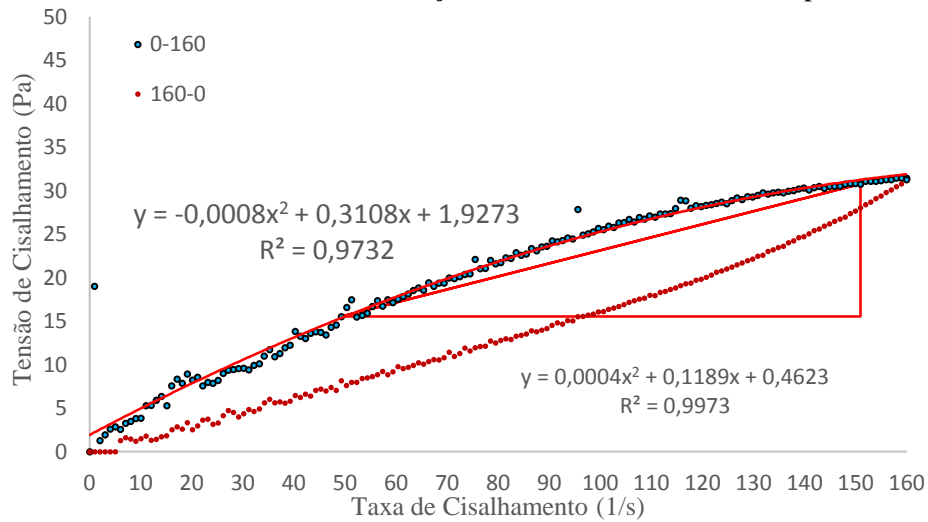


Figura 91 – Tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento da pasta do Traço 7.

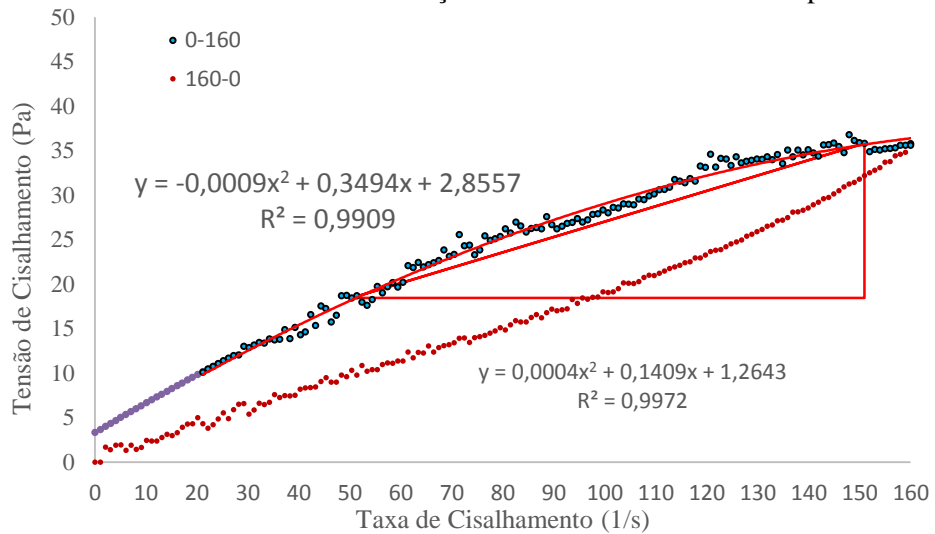


Figura 92 – Tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento da pasta do Traço 8.

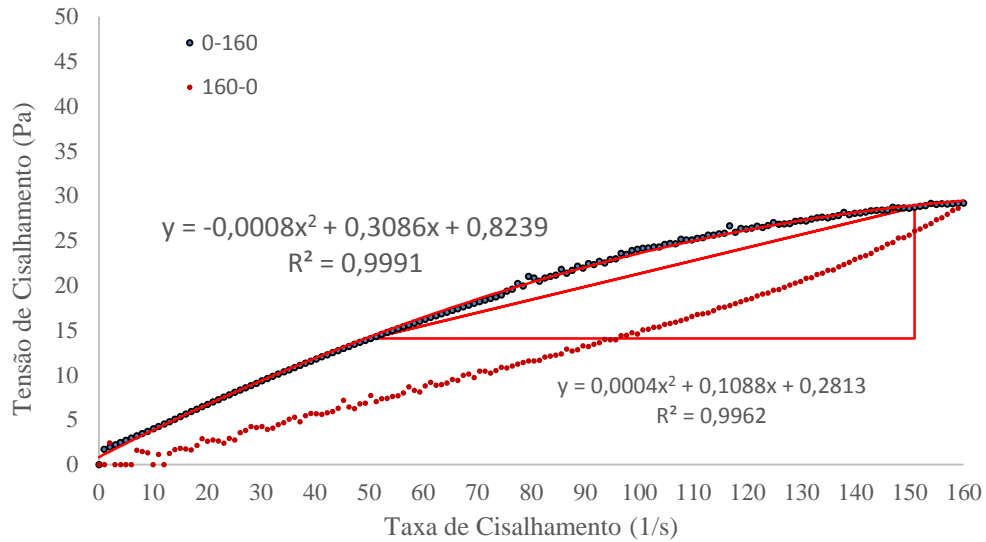


Figura 93 – Tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento da pasta do Traço 9.

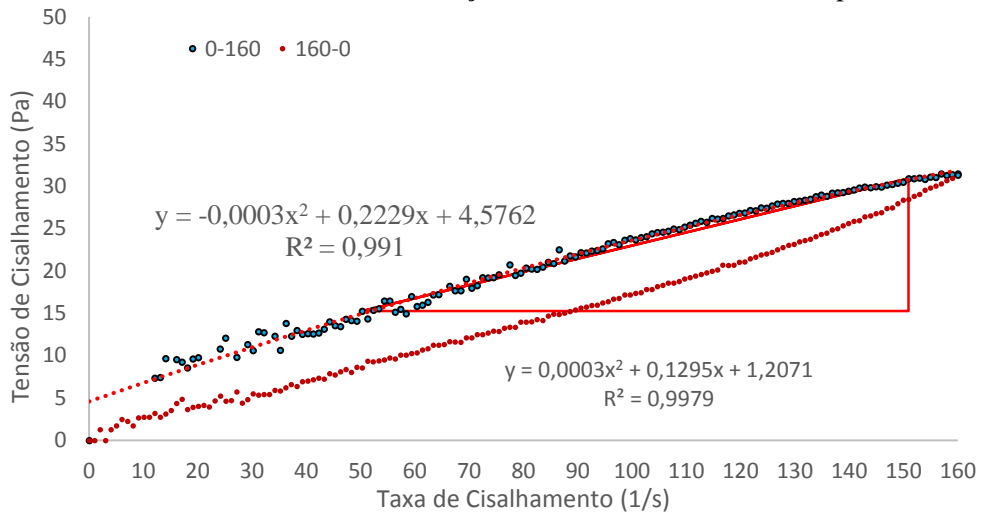


Figura 94 – Tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento da pasta do Traço 10.

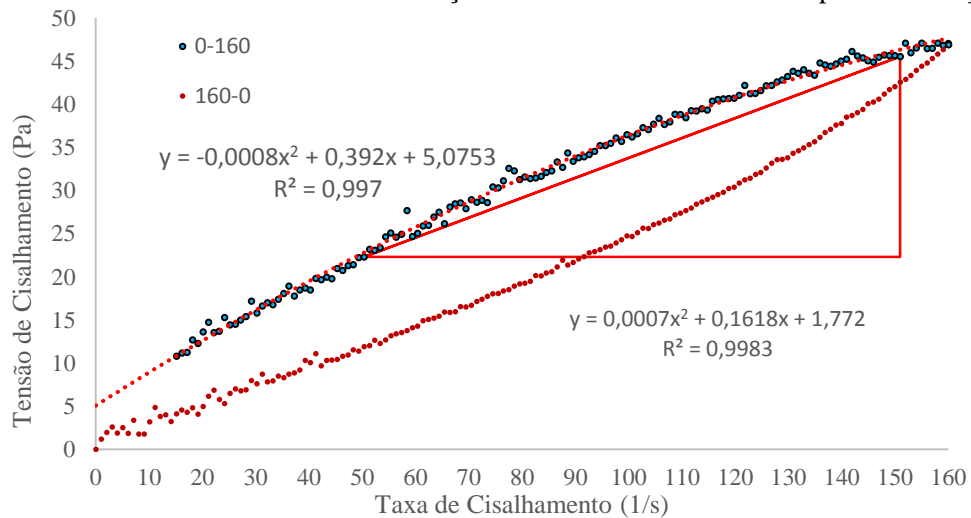


Figura 95 – Tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento da pasta do Traço 11.

A partir das caracterizações reológicas apresentadas identifica-se que o modelo que melhor descreve o comportamento reológico das pastas é o modelo Herschell-Bulkley, que representa o comportamento de um fluido com tensão de escoamento e com uma relação não-linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento.

A viscosidade foi calculada para uma variação de taxa de cisalhamento entre 50 e 150 (1/s). A Figura 96 apresenta a viscosidade determinada cada uma das pastas apresentadas em função do consumo de água da mistura.

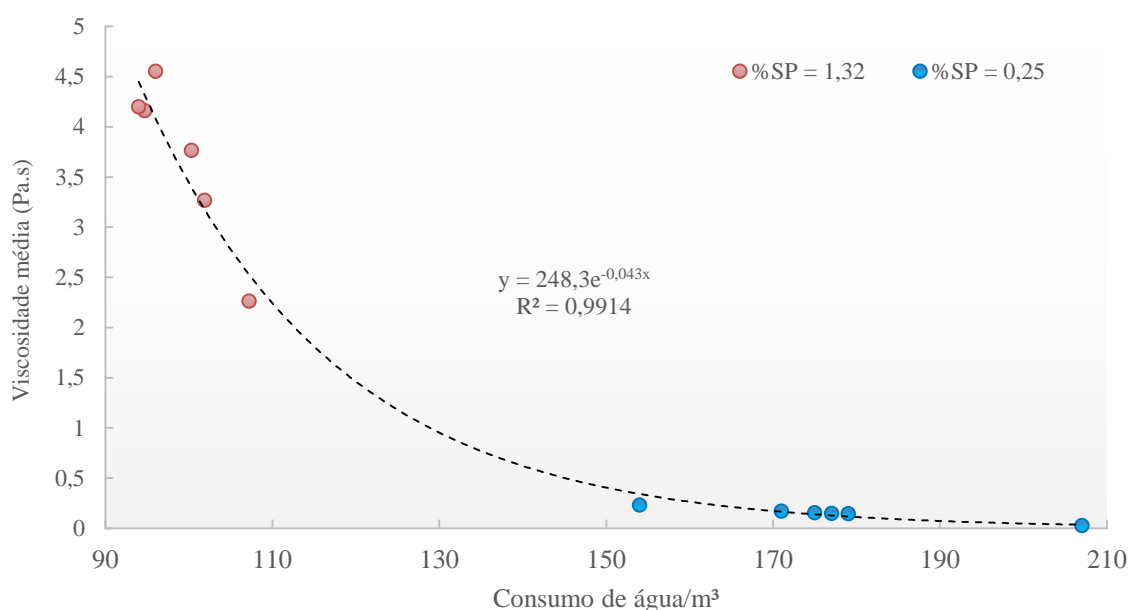


Figura 96 – Viscosidade das pastas em função do consumo de água por metro cúbico de concreto.

Como descrito na metodologia do trabalho, todas as pastas apresentam uma relação entre sílica ativa e cimento de 10% em massa. Já o teor de superplastificante utilizado variou em função do ponto de saturação. Como apresentado na Figura 96, a influência do consumo de água na pasta apresenta comportamento exponencial. As pastas utilizadas nos concretos de alta resistência apresentam viscosidade cerca de 10 vezes maior do que a viscosidade das pastas utilizadas nos traços de concreto convencional.

A Figura 97 apresenta a tensão de cisalhamento inicial, também chamada de tensão de escoamento, determinada para cada uma das pastas estudadas. Da mesma maneira que a viscosidade, a tensão de cisalhamento inicial é bastante influenciada pelo consumo de água. A função que melhor descreve a influência do consumo de água de mistura na tensão de escoamento das pastas estudadas é uma função exponencial.



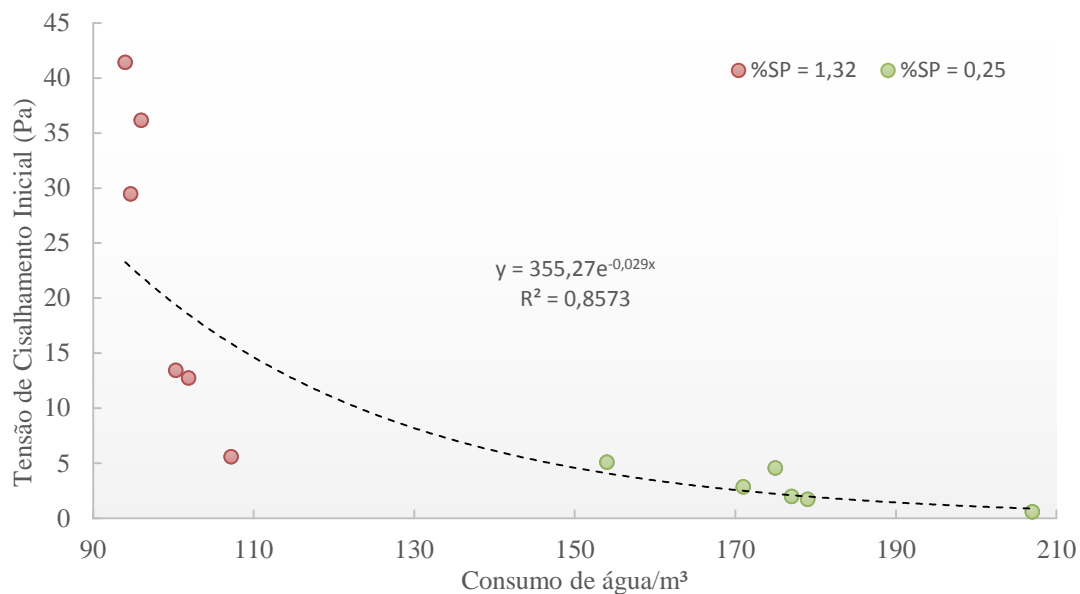


Figura 97 – Tensão de cisalhamento inicial das pastas em função da água por metro cúbico de concreto.

O concreto convencional, cuja pasta apresenta viscosidade e tensão de escoamento baixas, o princípio do esqueleto granular com menor volume de vazios e granulometria contínua é válido e eficaz no proporcionamento de concretos econômicos. Isso se deve ao fato de que a pasta com baixa viscosidade e baixa tensão de escoamento consegue envolver toda a área superficial do esqueleto granular, propiciando a trabalhabilidade adequada ao concreto.

Para os concretos com resistências mais elevadas, proporcionados com baixos consumos de água, que implicam em pastas de elevada viscosidade e tensões de escoamento, a adoção de esqueletos granulares menos densos, propiciados por curvas granulométricas descontínuas, apresentam-se mais eficazes. Como mostrado na dosagem do concreto de alta resistência, para se ter a mesma trabalhabilidade, o volume de pasta dispendido pelo esqueleto granular contínuo foi maior do que o volume de pasta utilizado pelos esqueletos granulares descontínuos.

A Figura 98 apresenta a área de histerese determinada para cada uma das pastas estudadas. Quando se observa uma área de histerese na curva completa de cisalhamento, considera-se que o material testado tem um significativo comportamento tixotrópico, isto é, quando tal material é submetido a uma taxa de cisalhamento constante, sua viscosidade aparente diminui ao longo do tempo. Esse comportamento deve-se à existência de uma estrutura instável no material, que pode ser rompida com a aplicação de uma determinada energia, lembrando-se que essa quebra estrutural é reversível e rapidamente recuperada (CASTRO *et al.*, 2009).

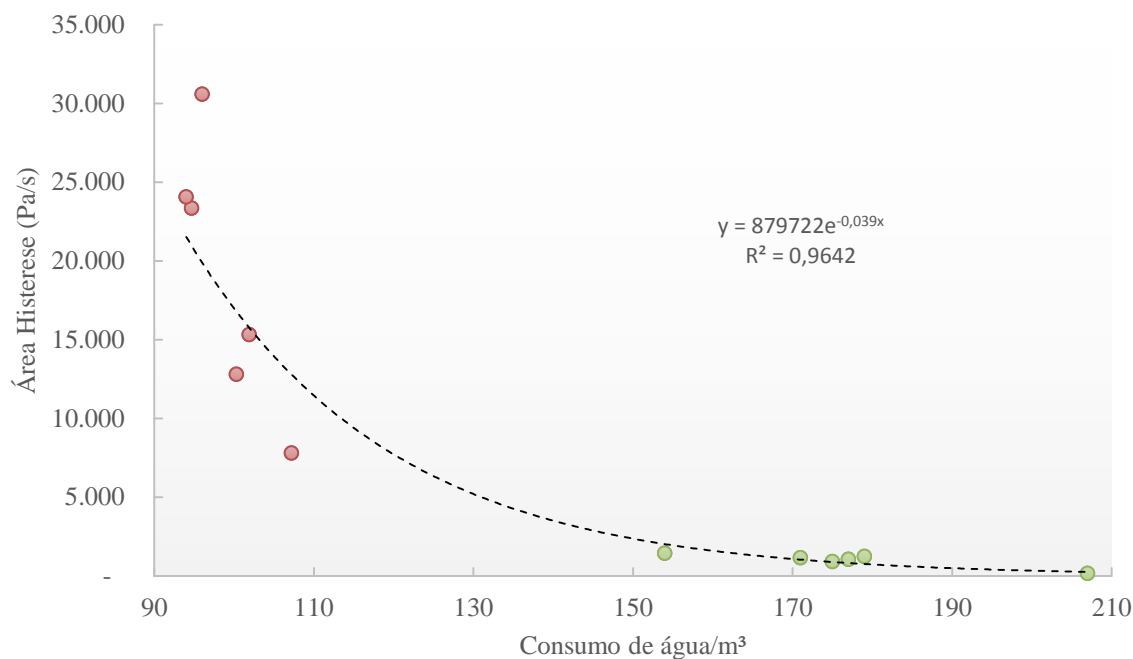


Figura 98 – Área de histerese das pastas em função da água por metro cúbico de concreto

Assim como a viscosidade e a tensão de escoamento, a área de histerese também é bastante influenciada pelo consumo de água da mistura. As áreas de histerese das pastas dos traços de concreto de alta resistência são até 20 vezes superiores às áreas de histerese das pastas de concreto convencional.

#### 4.5.2.5 Módulo de elasticidade

Na Tabela 58 e na Tabela 59 são apresentados os valores do módulo de elasticidade determinados experimentalmente para os diferentes traços de concretos de alta resistência e concretos convencionais, respectivamente, dosados variando-se a EMA. O módulo de elasticidade é uma característica mecânica diretamente proporcional à resistência à compressão do concreto. Para os traços dosados variando-se a EMA dois fatores que influenciam o módulo de elasticidade são variáveis. O primeiro é a relação água/aglomerante e o segundo é o teor de agregado graúdo.

Tabela 58 – Módulo de Elasticidade dos concretos de alta resistência dosados com EMA variável.

		Espessura de argamassa (mm)				
		4,329	3,267	2,391	1,650	1,011
Água do ensaio (kg)		107	95	94	100	102
Relação água/aglomerante		0,19	0,17	0,17	0,18	0,19
Módulo de Elasticidade (GPa)	01	53,14	58,65	65,47	58,05	45,89
	02	57,79	61,20	64,56	58,68	57,00
<b>Módulo de Elasticidade Médio (GPa)</b>		<b>55,47</b>	<b>59,93</b>	<b>65,02</b>	<b>58,37</b>	<b>51,45</b>
Desvio Padrão (GPa)		2,33	1,28	0,45	0,32	5,56

Tabela 59 – Módulo de Elasticidade dos concretos convencionais dosados com EMA variável.

		Espessura de argamassa (mm)				
		4,329	3,267	2,391	1,650	1,011
Água do ensaio (kg)		207	177	171	179	175
Relação água/aglomerante		0,59	0,50	0,49	0,51	0,50
Módulo de Elasticidade (GPa)	01	40,15	46,40	43,85	49,60	43,98
	02	37,62	48,02	48,17	42,99	36,91
<b>Módulo de Elasticidade Médio (GPa)</b>		<b>38,89</b>	<b>47,21</b>	<b>46,01</b>	<b>46,30</b>	<b>40,45</b>
Desvio Padrão (GPa)		1,27	0,81	2,16	3,31	3,54

Na Tabela 60 e na Tabela 61 são apresentados os resultados de módulo de elasticidade determinados para concretos de alta resistência e convencional, respectivamente, proporcionados segundo o método de dosagem proposto por Toralles-Carbonari (1996).

Tabela 60 – Módulo de Elasticidade do concreto de alta resistência dosado pelo método Toralles-Carbonari (1996).

		Teor de Excesso de pasta (%)			
		2	4	8	16
Relação água/aglomerante		0,17	0,17	0,17	0,17
Módulo de Elasticidade (GPa)	01	45,28	48,50	56,65	52,56
	02	42,64	56,00	55,71	52,22
<b>Módulo de Elasticidade Médio (GPa)</b>		<b>43,96</b>	<b>52,25</b>	<b>56,18</b>	<b>52,39</b>
Desvio Padrão (GPa)		1,87	5,30	0,66	0,24

A Figura 99 apresenta a correlação entre a resistência à compressão dos diferentes traços de concreto e o módulo de elasticidade determinado. Notadamente os concretos dosados variando-se a EMA apresentam módulo de elasticidade mais elevado do que os concretos dosados segundo o método proposto por Toralles-Carbonari (1996). Este fato se deve aos traços dosados com EMA variável apresentarem teores mais elevados de agregado graúdo.

Tabela 61 – Módulo de Elasticidade do concreto convencional dosado pelo método Toralles-Carbonari (1996).

		Teor de Excesso de pasta (%)			
		2	4	8	16
Relação água/aglomerante		0,48	0,48	0,48	0,48
Módulo de Elasticidade (GPa)	01	42,81	44,16	40,01	34,56
	02	45,79	40,13	39,40	36,02
<b>Módulo de Elasticidade Médio (GPa)</b>		<b>44,30</b>	<b>42,15</b>	<b>39,71</b>	<b>35,29</b>
Desvio Padrão (GPa)		2,11	2,85	0,43	1,03

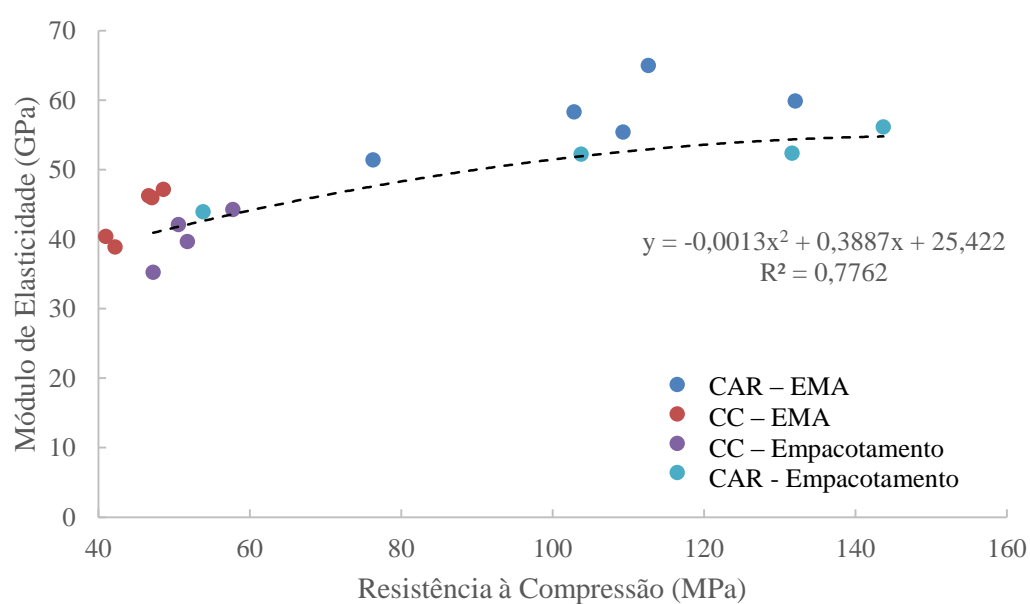


Figura 99 – Módulo de elasticidade em função da resistência dos concretos dosados.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As principais conclusões extraídas deste trabalho e a contribuição proporcionada por ele estão resumidas neste capítulo. São apresentadas, também, propostas para continuação dos estudos sobre o tema abordado. Esta tese teve por objetivo principal contribuir com o estudo dos métodos de dosagem de concretos de alta resistência através da discussão sobre os princípios da resistência potencial do agregado, da dimensão máxima característica e do empacotamento máximo do agregado adotados na elaboração dos métodos de dosagem.

A primeira contribuição do trabalho se dá no entendimento da influência da resistência do agregado graúdo na resistência à compressão do concreto. Caracterizou-se a resistência à compressão e o módulo de elasticidade da rocha, da argamassa e da pasta de concretos produzidos com diferentes agregados. Demonstrou-se experimentalmente que a diferença entre o módulo de elasticidade da fase agregado graúdo e da fase argamassa durante o processo de carregamento implica em deformações diferentes nas duas fases. A diferença de deformações, por sua vez, implica em tensões na interface argamassa/agregado graúdo. As tensões geradas por este efeito são proporcionais à diferença existente entre o módulo da fase agregado e da fase argamassa. Os resultados apresentados mostram que a resistência à compressão do concreto é tanto maior quanto menor é a diferença entre o módulo de elasticidade da rocha e da argamassa. Quanto ao módulo de elasticidade do concreto constatou-se que o mesmo é uma ponderação entre o módulo da rocha e da argamassa. Observa-se que para os traços de concreto de alta resistência estudados neste trabalho o módulo do concreto foi maior do que o módulo da argamassa e inferior ao módulo das rochas.

A segunda contribuição deste trabalho foi a proposição de uma metodologia para quantificação da resistência à compressão do agregado graúdo. Ao se comparar a resistência de frações de agregados com três diferentes tamanhos, demonstrou-se que a resistência das partículas é inversamente proporcional ao diâmetro das partículas. Para o agregado estudado no presente trabalho, o aumento de cada milímetro da dimensão máxima característica gerou uma diminuição de, em média, 3,5 MPa da resistência à compressão das partículas.

A terceira contribuição deste trabalho foi à cerca da definição da compacidade ótima do agregado para o concreto de alta resistência. Demonstrou-se que o menor volume de vazios não se refletiu no concreto mais econômico, tampouco no mais resistente. Este comportamento se

deveu ao fato de que com o aumento do teor de agregado miúdo na mistura há também o aumento da superfície específica do esqueleto granular, bem como a diminuição da espessura máxima de pasta. Assim a pasta demandou mais água para apresentar uma viscosidade suficientemente baixa para envolver todas as partículas, o que impactou negativamente na resistência à compressão do concreto.

A quarta contribuição do presente trabalho consistiu na proposição do parâmetro espessura média de argamassa para definição da compacidade ótima. Demonstrou-se que para concretos de resistência convencional, nos quais a viscosidade da pasta é baixa, a compacidade ótima é a compacidade máxima, ou seja, o esqueleto que apresenta o menor volume de vazios. Contudo para concretos com resistência à compressão maior, proporcionados com relações água/aglomerante menores, a compacidade ótima não corresponde ao máximo empacotamento. Através da aplicação do método de dosagem proposto por Toralles-Carbonari (1996), mostrou-se que o esqueleto granular mais empacotado demandou maior volume de pasta e, por conseguinte, de aglomerante, para se obter o mesmo abatimento do que o esqueleto granular proporcionado segundo o parâmetro da espessura média de argamassa. Isso se deve ao comportamento reológico da pasta. Tanto a viscosidade quanto a tensão de cisalhamento da pasta dos concretos de relação água/aglomerante baixo são bastante superiores aos das pastas utilizadas no concreto convencional.

Como sugestões para estudos futuros sugere-se:

Testar o parâmetro EMA em dosagens de concretos de alta resistência utilizando outros agregados graúdos;

Proposição de um método de dosagem para concretos de alta resistência utilizando o parâmetro EMA para definição da compacidade ótima do agrado;

Propor um modelo matemático a partir da caracterização das fases pasta, argamassa e agregado graúdo realizada nesta pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABO-EL-ENEIN, S. A.; EL-SAYED, H. A.; ALI, A. H.; MOHAMMED, Y. T.; KHATER, H. M.; OUDA, A. S. **Physico-mechanical properties of high performance concrete using different aggregates in presence of silica fume**. Housing and Building National Research Center, v. 10, p 43-48, 2014.

ACI Committee 221. **Guide for use of normal weight aggregate in concrete**. ACI manual of concrete practice: Part 1. Farmington Hills (MI): ACI; 2001.

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.

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.

AÏTCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. São Paulo. Editora Pini, 2000.

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.

Al-Oraimi, S. K.; Taha, R.; Hassan, H. F. **The effect of the mineralogy of coarse aggregate on the mechanical properties of high-strength concrete**. Construction and Building Materials, v. 20, p. 499-503, 2006.

ALVES, M. F., **Estudo comparativo de métodos de dosagem para concreto de alta resistência**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_. **NBR 5733:** Cimento Portland – Cimento Portland de alta resistência inicial – especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

\_\_\_\_. **NBR 5738:** Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

\_\_\_\_. **NBR 5739:** Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

\_\_\_\_. **NBR 7211:** Agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro. 2009.

\_\_\_\_. **NBR 7215:** Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro. 1996.

\_\_\_\_. **NBR 7389-2:** Apreciação petrográfica de materiais naturais, para utilização como agregado em concreto – Parte 2: Agregado graúdo. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

\_\_\_\_. **NBR 7681-2:** Calda de cimento para injeção. Parte 2: Determinação do índice de fluidez e da vida útil – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_. **NBR 7809:** Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro. 2006.

\_\_\_\_. **NBR 8522:** Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

\_\_\_\_. **NBR 12767:** Rochas para revestimento – determinação da resistência à compressão uniaxial. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

\_\_\_\_. **NBR NM 23:** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

\_\_\_\_. **NBR NM 43:** Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2002.

\_\_\_\_. **NBR NM 45:** Agregados - determinação da massa unitária e volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.



\_\_\_\_. **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_. **NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção da água. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_. **NBR NM 68:** Concreto – Determinação da consistência pelo espalhamento na mesa de Graff. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASTM **C939 – 2:** Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced – Aggregate Concrete (Flow Cone Method) .2002.

ASTM **C29/C29M:** Standard Test Method for Unit Weight and Voids in Aggregate. Philadelphia, 1991.

BARBOSA, M. P.; MACIEL, G. F.; CASTRO, A. L.; REIS, J. F. A.; LEMOS, K. A. A. **Determinação de parâmetros reológicos de argamassas e concretos através de técnicas alternativas.** Revista Ibracon Estruturas e Materiais. v. 4. n. 3. p. 440-480. 2011.

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.

BERN, R. **Agregados cúbicos: produção de agregados de alta qualidade com impactadores e britadores cônicos.** Revista areia e brita. São Paulo. Publicação trimestral. N.1. Maio/1997.

BETIOLI, A. M.; JOHN, V. M.; GLEIZE, P. J. P.; PILEGGI, R. G. **Caracterização reológica de pastas cimentícia: associação de técnicas complementares.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 37-48. 2009.

BEUSHAUSEN, H.; DITTMER, T. **The influence of aggregate type on the strength and elastic modulus of high strength concrete.** Construction and Building Materials, v. 74, p. 132-139, 2015.

BITTENCOURT, R. M. **Mass Concrete Mixtures Based on Fineness Modulus and Geometrical Gradation.** *Journal of Materials in Engineering*, v. 13, n. 1, p. 33-40, 2001.

BRETAS, R. E.; D'AVILA, M. A. **Reologia de polímeros fundidos.** São Carlos-SP. Editora da UFSCar, 2000. 196p.

CASTRO, A. L. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho.** Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos / Instituto de Física de São Carlos/ Instituto de Química de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CASTRO A. L., LIBÓRIO J. B. L., PANDOLFELLI V. C. **Reologia de concretos de alto desempenho aplicados na construção civil – Revisão.** *Revista Cerâmica*, São Carlos, v. 57, p. 63-75, 2011.

CASTRO, A. L.; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. **Avaliação do comportamento de concretos de alto desempenho no estado fresco com auxílio de um reometro.** *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*. v. 2. n. 4. p. 282-305. 2009.

CHANG, P. K. **An approach to optimizing mix design for properties of highperformance concrete.** *Cement and Concrete Research*, v. 34, p. 623-629, 2004.

CHIES, J. A.; ROHDEN, A. B.; SILVA FILHO, L. C. P. **Tratamentos superficiais em corpos de prova de concreto submetidos à compressão.** *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*. V.7. N. 5, 2014.

CHOE, G.; KIM, G.; GUCUNSKI, N.; LEE, SEONGHUM. **Evaluation of the mechanical properties of 200 MPa ultra-high-strength concrete at elevated temperatures and residual strength of column.** *Construction and Building Materials*. v. 86. p. 159-168. 2015.

CHOI, E. S.; KIM, Y. J.; JANG, K. P.; KWON, S. H. **Effect of the coarse aggregate size on pipe flow of pumped concrete.** *Construction and Building Materials*. v. 66, p. 723-730, 2014.

COSTA, H.N.; ALVES, D.S.; DIAS, D.M.; CABRAL, A.E.B. **Estudo da forma dos grãos de areia de britagem proveniente de pedreira da Região Metropolitana de Fortaleza.** 56° Congresso Brasileiro do Concreto. Natal, 2014.

DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adição de microssílica**. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

DE LARRARD, F.; BELLOC, A. **The influence of aggregate on the compressive strength of normal and high-strength concrete**, ACI Mater. J. v. 94 (5). p. 417–425. 1977.

DE LARRARD, F. **Concrete mixture proportioning: a scientific approach**. London: E & FN Spon, 1999.

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

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.

DITTMER, T.; BEUSHAUSEN, H. **The effect of coarse aggregate content and size on the age at cracking of bonded concrete overlays subjected to restrained deformation**. Construction and Building Materials. v. 69. p. 73-82, 2014.

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.

FORMAGINI, S. **Dosagem Científica e Caracterização Mecânica de Concretos de Altíssimo Desempenho**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

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.

GIROTTO, L. S.; BARBOSA, M. P.; MACIEL, G. F. **Avaliação do comportamento reológico na retração plástica e na fissuração de argamassas de concreto auto adensável**. Revista Ibracon Estruturas e Materiais. v. 7. n. 1. p. 24-52. 2014.

GIROTTI, L. S. **Investigação da retração plástica e da fissuração da argamassa do concreto auto-adensável**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. UNESP. Ilha Solteira, São Paulo, 2012.

HANKE, V. **Prediction of consistency of concrete by using key properties of raw materials and mix composition**. In: Rheology of Fresh Cement and Concrete, 1990, London. Proceedings... London: E & FN Spon, 1991. p. 303-309.

HELENE, P. L.; TERZIAN, P. R. **Manual de dosagem e controle do concreto**. Brasília: Pini, 1992.

HENRY, M.; DARMA, I. S.; SUGIYAMA, T. **Analysis of the effect of heating and re-curing on the microstructure of high-strength concrete using X-ray CT**. Construction and Building Materials. v. 67, p. 37-46, 2014.

IL-SEOK-OH. **Effects of aggregates on the properties of concrete**. Iowa State University, april, 24, 2001.

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.

Kiliç, A; C.D.; Atiş, C. D.; Teymen, A.; Karahan, O. ; Özcan, F.; Bilim, C.; Özdemir, M. **The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete**. Cement & Concrete Composites, v. 30, p. 290-296, 2008.

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao Estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostas com adições de sílica ativa**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM. UFRGS. Porto Alegre, 2002.

LONG, G.; WANG, X.; XIE, Y. **Very-high-performance concrete with ultrafine powders**. Cement and Concrete Research, v. 32, p.601-605, 2002.

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.

MEDDAH, M. S.; ZITOUNI, S.; BELÂABES, S. **Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete.** Construction and Building Materials, v. 24, p. 505-512, 2010.

MEHTA, P.K; AÏTCIN, P-C. **Principles underlying production of high performance concrete.** Cement, Concrete & Aggregates v. 12, n.2, p. 70-78, 1990.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais.** 3.ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MELERO, José Manuel Martínez. **Estudo de dosificação para hormigones de alta resistência – Análise de la influência de distintas matérias primas procedentes de la comunidade Valencia.** Discertação (Mestrado). Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminhos, Canales y Puertos – Universidad Politécnica de Valencia, 1998.

MELO, G. N. G.; SANTOS, J. J. C.; MONTEIRO, R. S.; MELO, K. A.; GOMES, P. C. C. **Estudo de métodos de composição granular de agregados para concreto.** Anais do 56º congresso brasileiro do concreto, 2014

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.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** 2º ed. São Paulo: Pini, 1997.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G. PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e Empacotamento de Partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico.** São Paulo: Fazendo Arte, 2000. 195 p.

OLIVEIRA, L. A. R. **Dosagem de Concretos Convencional, Alta Resistência e Auto adensável: Verificação do Método Mais Eficiente para o Parâmetro e Categoria Analisados.** Relatório (Trabalho de conclusão de curso): Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

O'REILLY, V. D. **Método de dosagem de concreto de elevado desempenho**. São Paulo: Editora PINI, 1998.

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.

OUDA, A. S. **Development of high-performance heavy density concrete using different aggregates for gamma-ray shielding**. Progress in Nuclear Energy, v. 79, p 48-55, 2015.

PACELLI DE ANDRADE, W. P. **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades**. São Paulo. Editora Pini, 1997.

PEREIRA, C. G.; GOMES, J. C.; OLIVEIRA, L. P. **Influence of natural coarse aggregate size, mineralogy and water content on the permeability of structural concrete**. Construction and Building Materials, v. 23, p. 602-608, 2009.

PEDRAJAS, C.; RAHHAL, V.; TALERO, R. **Determination of characteristic rheological parameters in Portland cement pastes**. Construction and Building Materials. v. 51. p. 484-491. 2014.

PINTO, R. O. **Contribuição ao estudo de métodos de dosagem para concretos de alto desempenho (CAD) empregando materiais locais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiânia, Goiás, 2003.

PINTO, R. O.; GEYER, A. L. B. **Aplicação de Diferentes Procedimentos de Cura no Concreto de Alto Desempenho (CAD)**. In: 45 Congresso Brasileiro do Concreto, 2003, Vitória. 45 Congresso Brasileiro do Concreto, 2003.

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.

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.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. **Composition of reactive powder concretes**. Cement and Concrete Research. v. 25. n. 7. p. 1501-1511. 1995.

ROSSI, E.; SALES, A. **Carbon footprint of coarse aggregate in Brazilian construction**. Construction and Building Materials. v. 72. p. 333-339. 2014.

ROHDEN, A. B. **Efeito da resistência e da dimensão máxima característica do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho**. Dissertação (Mestrado): Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2011.

ROUSSEL, N.; Le ROY, R. **The Marsh cone: a test or a rheological apparatus**. Cement and Concrete Research. v. 35, p 823-830. 2005.

SCHRAMM, G. **Reologia e reometria: fundamentos teóricos e práticos**. São Paulo: Artliber Editora, 2006. 234 p.

SHEN, W.; DONG, R.; LI, J.; ZHOU, M.; MA, W.; ZHA, J. **Experimental investigation on aggregate interlocking concrete prepared with scattering-filling coarse aggregate process**. Construction and Building Materials, v. 24, p. 2312-2316, 2010.

SHI, C.; WANG, D.; WU, L.; WU, Z. **The hydration and microstructure of ultra high-strength concrete with cement-silica fume-slag binder**. Cement & Concrete Composites. v. 61. p. 44-52. 2015.

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.

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.

SOUTO, João Vitor Andrade. **Patologias na formulação de um betão na ilha da Madeira**. Dissertação (Mestrado). Universidade da Madeira. Funchal/Portugal, 2010.

TALERO, R.; PEDRAJAS, C.; RAHHAL, V. **Performance of Fresh Portland Cement Pastes – Determination of Some Specific Rheological Parameters**. Rheology - New

Concepts, Applications and Methods. In: Performance of Fresh Portland Cement Pastes – Determination of Some Specific Rheological Parameters. INTEC, 2013.

TEIXEIRA, J. E. S. L.; SATO, V. Y.; AZOLIN, L. G.; TRISTÃO, F. A.; VIEIRA, G. L., CALMON, J. L. **Estudo do comportamento reológico de pastas cimentícias utilizando reometro de cisalhamento dinâmico**. Revista Ibracon Estruturas e Materiais. v. 7. n. 6. p. 922-939. 2014.

TORALLES-CARBONARI, B. M. **Estúdio paramétrico de variables y componentes relativos a la dosificación y producción de hormigones de altas prestaciones**. Tese (Doutorado). Universitat Politècnica de Catalunya. 1996.

TORRIJOS, M. C.; GIACCIO, G. ZERBINO, R. **Mechanical and transport properties of 10 years old concretes prepared with different coarse aggregates**. Construction and Building Materials, v. 44, p. 706-715, 2013.

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.

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.

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.

UYSAL, M. **The influence of coarse aggregate type on mechanical properties of fly ash additive self-compacting concrete**. Construction and Building Materials, v. 37, p. 533-540, 2012.

VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004



**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.

**ZHANG, X.; RUIZ, G.; YU, R. C.; POVEDA, E. PORRAS, R. Rate effect on the mechanical properties of eight types of high-strength concrete and comparison with FIB MC2010.** Construction and Building Materials. v. 30, p. 301-308, 2012.

**ZHANG, Y.; KONG, X. Correlations of the dispersing capability of NSF and PCE types of superplasticizer and their impacts on cement hydration with the adsorption in fresh cement pastes.** Cement and Concrete Research, v. 69, p 1-9, 2015

**ZHANGA, W.H.; ZHANG, Y.S. Research on the static and dynamic compressive properties of high performance cementitious composite (HPCC) containing coarse aggregate.** Archives of civil and mechanical engineering, v. 15, p 711-720, 2015.

**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 pp. 177-186, 1995.