

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

NICOLLE TALYTA ARRIAGADA SOTO

**AVALIAÇÃO DO USO DE AGREGADO DE RESÍDUO DE
CONSTRUÇÃO CIVIL NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO
SLUMP PARA FABRICAÇÃO DE ARTEFATOS DE CONCRETO**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2017

NICOLLE TALYTA ARRIAGADA SOTO

**AVALIAÇÃO DO USO DE AGREGADO DE RESÍDUO DE
CONSTRUÇÃO CIVIL NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO
SLUMP PARA FABRICAÇÃO DE ARTEFATOS DE CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Mestre em Engenharia Civil” - Área de Concentração: Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. José Alberto Cerri

Co-orientadora: Profa. PhD. Marcia Silva de Araújo

CURITIBA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

S718a Soto, Nicolle Talyta Arriagada
2017 Avaliação do uso de agregado de resíduo de construção civil nas propriedades do concreto no *slump* para fabricação de artefatos de concreto / Nicolle Talyta Arriagada Soto.-- 2017.
171 f.: il.; 30 cm.

Texto em português, com resumo em inglês.
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.
Bibliografia: p. 154-168.

1. Engenharia civil - Dissertações. 2. Construção civil. 3. Concreto. 4. Trabalhabilidade. 5. Resíduos como material de construção. 6. Agregados (Materiais de construção). I. Cerri, José Alberto. II. Araújo, Márcia Silva de. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: Ed. 22 -- 624

Biblioteca Ecoville da UTFPR, Câmpus Curitiba

TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 118

A Dissertação de Mestrado intitulada AVALIAÇÃO DO USO DE AGREGADO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO CIVIL NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO SLUMP PARA FABRICAÇÃO DE ARTEFATOS DE CONCRETO, defendida em sessão pública pelo(a) candidato(a) Nicolle Talyta Arriagada Soto, no dia 24 de maio de 2017, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração Construção Civil, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA:

Prof(a). Dr(a). José Alberto Cerri - Presidente - UTFPR

Prof(a). Dr(a). Prof. Dr. Adauto José Miranda de Lima - UTFPR

Prof(a). Dr(a). Profa. Dra. Marianne do Rocio de Mello Maron da Costa - UFPR

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, 24 de maio de 2017.

Carimbo e Assinatura do(a) Coordenador(a) do Programa

Ao meu marido Gustavo, que divide comigo
cada passo da caminhada, eterno amor e gratidão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que, de forma direta ou indireta, participaram da realização deste trabalho, e de forma especial:

Aos meus orientadores, professor José Alberto Cerri e professora Marcia Silva de Araujo, pela orientação competente ao longo de todo este trabalho.

Aos pesquisadores professora Nayara Soares Klein, professor Welington Mazer, professor Aduino José Miranda de Lima e professora Marianne do Rocio de Mello Maron da Costa pelas importantes observações e contribuições para o estudo.

À aluna Beatriz Monteiro Gomes e Luiz Gustavo de Carvalho pela ajuda nos ensaios realizados.

Aos servidores dos laboratórios de Materiais de Construção Civil do DACOC/UTFPR pela colaboração no desenvolvimento dos ensaios.

À Cimentos Itambé pela doação dos materiais utilizados nesta pesquisa.

Ao meu marido Gustavo, pelo fundamental incentivo à minha entrada no mestrado, interesse pela pesquisa e, acima de tudo, pelo amor e apoio constantes.

Aos meus pais e minha irmã, que sempre foram exemplos e fonte de profunda inspiração.

RESUMO

SOTO, Nicolle Talyta Arriagada. **Avaliação do uso de agregado de resíduo de construção civil nas propriedades do concreto *no slump* para fabricação de artefatos de concreto.** 2016. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

Uma das aplicações dos agregados provenientes da reciclagem dos resíduos de construção civil (ARC) é na fabricação de concretos *no slump*. Este tipo de concreto é utilizado na fabricação de peças conformadas por vibração e vibro compactação. Porém, as características dos agregados de ARC dificultam a dosagem desse tipo de concreto, pois ocorrem variações na trabalhabilidade dependendo da morfologia e absorção de água. O estudo da dosagem de ARC é importante pois ao ser utilizado altera as propriedades do concreto, em especial do concreto *no slump*, devido à necessidade de manter a forma imediatamente após a desmoldagem. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o efeito do agregado ARC nas características do concreto *no slump*, com a avaliação da influência do processo de fabricação na forma das partículas e da pré-molhagem do agregado nas propriedades reológicas e na resistência mecânica à compressão. Para isto, foram estudadas composições de concretos utilizando agregados reciclados com diferentes teores de excesso de pasta e diferentes relações água/cimento (a/c), além da composição sugerida pela ABCP para concretos utilizados em meio fio com agregados naturais. Com a composição que apresentou os melhores resultados e com o traço de referência foi realizada a análise do custo de fabricação de uma peça de meio-fio com cada um dos concretos, a fim de se avaliar o impacto econômico da substituição do agregado. Observou-se diferenças entre os agregados reciclados e naturais, tanto em relação as propriedades quanto a morfologia, fatos que resultaram em características distintas também nos concretos obtidos. No estudo da pré-molhagem foi possível observar que diferentes taxas de pré-molhagem resultaram em comportamentos distintos tanto no estado fresco como no endurecido, sendo obtida variação de 60% na resistência à compressão entre os teores de 75 e 65% de pré-molhagem. Com a obtenção de traços variando o excesso de pasta e a/c pode-se observar que a composição com a/c de 0,35 e teor de pasta de - 5% foi a que resultou em melhores características para a produção de peças submetidas à vibração. Apesar desta composição atingir o mínimo de 11 MPa exigido por norma para a fabricação de meio-fio, o custo para fabricação de uma peça de concreto com agregado reciclado foi 17% maior do que o custo com agregados naturais, resultado ligado ao maior consumo de cimento exigido pelo concreto com ARC para atingir a resistência exigida.

Palavras-chave: Concreto *no slump*. Trabalhabilidade. Excesso de pasta. Fator de preservação de forma. ARC. Agregado.

ABSTRACT

SOTO, Nicolle Talyta Arriagada. **Evaluation of civil construction waste aggregate use on no slump concrete properties for cement products.** 2016. 171 f. Dissertation (Master in Civil Engineering) - Postgraduate Program in Civil Engineering, Federal University of Technology - Parana. Curitiba, 2017.

One of the applications of aggregates from the recycling of civil construction waste (CCW) is in no slump concrete manufacturing. This type of concrete is used in the manufacture of parts shaped by vibration and vibrocompression, for example. However, the characteristics of CCW aggregates make it difficult to measure this type of concrete, since there are variations in the workability depending on the morphology and water absorption. The study of CCW aggregate is important because its use changes the concrete properties, especially in no slump concrete, due to the necessity to maintain the form immediately after the demolding. Therefore, the present work aim to evaluate the effect of the CCW aggregate on the no slump concrete characteristics, with the evaluation of the influence of the particle formation process and the pre-wetting of the aggregate on the rheological properties and the compression strength. For this, concrete compositions were studied using recycled aggregates with different contents of excess paste and different water/cement (a/c) ratios, in addition to the composition suggested by ABCP for concrete used in curb with natural aggregates. With the composition that presented the best results and with the reference mix design it was performed the analysis of the manufacturing cost of a piece of curb with each of the concretes, in order to evaluate the economic impact of the replacement of the aggregate. It was observed differences between the recycled and natural aggregates, both in relation to the properties and morphology, facts that resulted in different characteristics also in the concretes obtained. In the pre-wetting study, it was possible to observe that different pre-wetting rates resulted in different behaviors in both the fresh and hardened state, with a 60% variation in the compressive strength between 75 and 65% pre-wetting rates. By obtaining traces varying the excess of paste and a/c it can be observed that the composition with a/c of 0.35 and paste content of -5% was the one that resulted in better characteristics for the production of vibration pieces. Although this composition reached the minimum of 11 MPa required by standard for the production of curb, the cost for manufacturing a piece of concrete with recycled aggregate was 17% higher than the cost with natural aggregates, a result linked to the higher consumption of cement required by concrete with CCW to achieve the required strength.

Keyword: Zero *slump* concrete, workability, excess paste theory, shape preservation factor, CDW, aggregate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Camada de argamassa nova ao redor de agregado reciclado em concreto.....	35
Figura 2 - Curvas de fluxo de alguns tipos de fluido.....	41
Figura 3 - Efeito da quantidade e do tamanho de partículas na eficiência de empacotamento: (1) mínima densidade de empacotamento; (2) máxima densidade de empacotamento; (3) deficiência de partículas pequenas; (4) deficiência de partículas grandes; (5) distribuição inadequada de tamanhos de partículas.....	49
Figura 4 - Reologia do concreto: (A) mesma tensão de cisalhamento e diferentes viscosidades; (B) mesma viscosidade e diferentes tensões de cisalhamento	54
Figura 5 - Perfil típico de carga vs. deslocamento de um ensaio de squeeze-flow .	56
Figura 6 - Comparação entre proporções da mistura de um concreto <i>no slump</i> , concreto convencional e concreto autoadensável	59
Figura 7 - Comparação entre quantidade de água necessária para concreto convencional e concreto <i>no slump</i>	60
Figura 8 - Comparação entre concreto <i>no slump</i> e concreto auto adensável após desmolde: (a) concreto <i>slump</i> -zero praticamente sem deformação e (b) concreto autoadensável com alto grau de trabalhabilidade.....	61
Figura 9 - Partículas próximas e envoltas por filme de pasta	62
Figura 10 - Relação entre capacidade de deformação e volume de excesso de pasta.....	63
Figura 11 - Modelo de duas fases para concreto	64
Figura 12 - Fluxograma do procedimento experimental usado na presente pesquisa	66
Figura 13 - (a) Pedrisco e (b) areia, ambos de origem natural	68
Figura 14 - (a) Pedrisco e (b) areia reciclados de concreto.....	69
Figura 15 - Imagem obtida em escâner para cálculo do coeficiente volumétrico de forma	72
Figura 16 - Combinações entre teores de excesso de pasta vs relação água/cimento.....	77
Figura 17 - Área da seção transversal antes e depois da desmoldagem	80
Figura 18 - Relações de espalhamento.....	80
Figura 19 - Distribuição granulométrica dos agregados miúdos.....	84
Figura 20 - Distribuição granulométrica do agregado gráúdo natural.....	85
Figura 21 - Distribuição granulométrica do agregado gráúdo de ARC	86
Figura 22 - Comparação da %retida dos agregados gráúdos de ARC	87
Figura 23 - Volume de mercúrio intrudido (cm ³ /g)	91
Figura 24 - Volume de mercúrio incremental (cm ³ /g)	92
Figura 25 - Valores de absorção de água dos agregados miúdos	92
Figura 26 - Valores de absorção de água dos agregados gráúdos	93
Figura 27 - Teor de materiais pulverulentos dos agregados miúdos	95
Figura 28 - Teor de materiais pulverulentos dos agregados gráúdos	96
Figura 29 - Massa unitária no estado solto e compactado dos agregados miúdos .	97
Figura 30 - Massa unitária no estado solto e compactado dos agregados gráúdos	98
Figura 31 - (a) Partículas do agregado gráúdo natural e (b) detalhe do formato das partículas.....	100

Figura 32 - (a) Partículas do agregado graúdo ARC peneirado e (b) detalhe do formato e capa de argamassa ao redor das partículas.	100
Figura 33 - (a) Partículas do agregado graúdo ARC lavado e (b) detalhe do formato e menor capa de argamassa ao redor das partículas.	101
Figura 34 - Detalhe da partícula do agregado natural (a) peneirado e (b) lavado.	101
Figura 35 - Massa unitária compactada das composições entre areia e pedrisco peneirado, ambos de ARC	103
Figura 36 - Massa unitária compactada das composições entre areia e pedrisco ARC lavado	103
Figura 37 - <i>Slump test</i> para concretos (a) de referência e com pré-molhagem de (b) 50%,	106
Figura 38 - Ensaio do fator de preservação de forma para concretos (a) referência e com pré-molhagem de (b) 50%, (c) 65%, (d) 75%, (e) 85% e (f) 95%	107
Figura 39 - Perfil da curva força vs deslocamento com velocidade de deslocamento do prato de 3 mm/s para concretos com diferentes teores de pré-molhagem	109
Figura 40 - Evolução do ensaio <i>squeeze-flow</i> do concreto com teor de pré-molhagem de 50%.....	111
Figura 41 - Evolução do ensaio <i>squeeze-flow</i> do concreto com teor de pré-molhagem de 75%.....	112
Figura 42 - Evolução do ensaio <i>squeeze-flow</i> do concreto com teor de pré-molhagem de 95%.....	113
Figura 43 - Resistência à compressão e fator de preservação de forma axial para diferentes taxas de pré-molhagem	114
Figura 44 - Força aplicada para deslocamento de 20mm no ensaio de <i>squeeze-flow</i> vs fator de preservação de forma para diferentes taxas de pré-molhagem.....	116
Figura 45 - <i>Slump test</i> para concretos com diferentes a/c e teores de excesso de pasta.....	118
Figura 46 - Fator de preservação de forma para concretos com diferentes a/c e teores de excesso de pasta.....	120
Figura 47 - Fator de preservação de forma para os diferentes traços de concreto estudados.....	121
Figura 48 - Superfície de resposta - fator de preservação de forma	122
Figura 49 - Perfil da curva força vs deslocamento com velocidade de 3mm/s para diferentes teores de excesso de pasta e a/c	124
Figura 50 - Perfil da curva força vs deslocamento com velocidade de 3 mm/s para teor de excesso de pasta de -15%	125
Figura 51 - Composição da pasta dos traços estudados	125
Figura 52 - Perfil da curva força vs deslocamento com velocidade de 3mm/s para teor de excesso de pasta de -10%	126
Figura 53 - Perfil da curva força vs deslocamento com velocidade de 3mm/s para teor de excesso de pasta de -05%	127
Figura 54 - Correlação entre os ensaios de <i>squeeze-flow</i> e fator de preservação de forma.	128
Figura 55 - Massa específica dos diferentes traços de concreto estudados	129
Figura 56 - Composição dos traços.....	130
Figura 57 - Superfície de resposta - massa específica	130

Figura 58 - Absorção dos diferentes traços de concreto estudados.....	132
Figura 59 - Índice de vazios dos diferentes traços de concreto estudados	133
Figura 60 - Aspecto superficial dos corpos de prova com diferentes a/c e teores de excesso de pasta.....	134
Figura 61 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade	136
Figura 62 - Resistência à compressão axial, comparação entre traços	138
Figura 63 - Teste de normalidade para as composições.....	140
Figura 64 - Teste de independência de variáveis.....	140
Figura 65 - Diagrama de Pareto - Resistência a compressão	141
Figura 66 - Superfície de resposta - resistência à compressão em função da variação da relação a/c e Volume de excesso de pasta (V_{pex})	142
Figura 67 - Desejabilidade da superfície de resposta	143
Figura 68 - Resistência à compressão em função da relação a/c.....	144
Figura 69 - Resistência à compressão em função da relação ao excesso de pasta	144
Figura 70 - Dimensões do meio-fio simples	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produtos reciclados de RCC	24
Tabela 2 - Levantamento de valores de absorção encontrados para agregados reciclados	32
Tabela 3 - Levantamento de autores e seus teores e tempos de pré-molhagem....	34
Tabela 4 - Equações, parâmetros reológicos e exemplos de fluidos não Newtonianos.....	42
Tabela 5 - Evolução dos parâmetros reológicos durante a utilização do concreto fresco.....	48
Tabela 6 - Relação entre os tipos de concreto e o fator de preservação de forma (FPF)	53
Tabela 7 - Proporções típicas da composição de diferentes tipos de concreto.....	59
Tabela 8 - Relatório de ensaio físico-químico	67
Tabela 9 - Ensaio e normas utilizados para caracterização dos agregados naturais.....	68
Tabela 10 - Ensaio e normas utilizados para caracterização do ARC.....	69
Tabela 11 - Dados do concreto do fabricante - REF-01	76
Tabela 12 - Identificação dos traços referentes ao estudo da pré-molhagem.....	78
Tabela 13 - Identificação dos traços referentes ao estudo da composição dos concretos.....	78
Tabela 14 - Módulo de finura - Agregados miúdos.....	88
Tabela 15 - Massa específica real e aparente dos agregados miúdos	88
Tabela 16 - Massa específica real e aparente dos agregados graúdos	89
Tabela 17 - Resultados da porosimetria por intrusão de mercúrio para os agregados graúdos.....	90
Tabela 18 - Coeficiente de forma dos agregados graúdos.....	99
Tabela 19 - Porcentagem de perda de massa por abrasão Los Angeles.....	101
Tabela 20 - Resultados do ensaio de fator de preservação de forma para diferentes teores de pré-molhagem.....	108
Tabela 21 - Carga no ensaio <i>squeeze-flow</i> para um deslocamento de 20 mm.....	110
Tabela 22 - Resultados do teste de Tukey para a resistência à compressão das amostras pré-molhadas.....	115
Tabela 23 - Resultados do ensaio de fator de preservação de forma para diferentes traços de concreto estudados.....	123
Tabela 24 - Resultados do teste de Tukey para massa específica, considerando excesso de pasta e a/c.....	131
Tabela 25 - Resultados do teste de Tukey para absorção	135
Tabela 26 - Resultados do teste de Tukey para módulo de elasticidade, considerando excesso de pasta e a/c	137
Tabela 27 - Valor de m e teor de finos para os concretos com agregados reciclados	145
Tabela 28 - Resultados dos ensaios para concretos de referência e EP - (05) com AC 0,35	147
Tabela 29 - Custo dos materiais utilizados para produção dos concretos	150

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	JUSTIFICATIVA	17
1.2	OBJETIVO.....	19
1.2.1	Objetivos Específicos	19
1.3	ESTRUTURA.....	19
2	REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1	AGREGADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL	21
2.1.1	Uso do Rcc como Agregado Reciclado	22
2.1.2	Propriedades dos Agregados Reciclados.....	25
2.1.3	Propriedades do Concreto com Agregado Reciclado.....	35
2.2	REOLOGIA.....	40
2.2.1	Conceitos	40
2.2.2	Reologia do Concreto Fresco.....	42
2.3	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE MATERIAIS À BASE DE CIMENTO	51
2.3.1	Conceitos	51
2.4	CONCRETO <i>NO SLUMP</i>	58
2.4.1	Medidas de Distância entre Partículas	61
3	MATERIAIS E MÉTODOS	66
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS	67
3.1.1	Cimento	67
3.1.2	Agregados Naturais.....	67
3.1.3	Agregados Reciclados de Concreto	67
3.2	CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	68
3.2.1	Agregados Naturais.....	68
3.2.2	Agregados Reciclados de Concreto	69
3.3	BENEFICIAMENTO DA MATÉRIA-PRIMA	73
3.3.1	Secagem e Peneiramento	74
3.3.2	Lavagem.....	74
3.4	ESTUDO DE EMPACOTAMENTO DOS AGREGADOS.....	75
3.5	PLANEJAMENTO DAS COMPOSIÇÕES	75
3.6	MISTURA E MOLDAGEM	78
3.7	CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO.....	79
3.7.1	Abatimento de Tronco de Cone.....	79
3.7.2	Fator de Preservação de Forma.....	79
3.7.3	Squeeze-Flow.....	81
3.8	CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO..	81
3.8.1	Resistência Mecânica à Compressão Axial.....	81
3.8.2	Resistência Mecânica à Tração por Compressão Diametral.....	81
3.8.3	Módulo de Elasticidade Dinâmico.....	82
3.8.4	Absorção de Água, Índice de Vazios, Massa Específica e Densidade de Massa Aparente	82
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	84
4.1	ESTUDO DA FASE AGREGADO.....	84
4.1.1	Composição entre Agregados	102
4.2	ESTUDO DA PRÉ-MOLHAGEM	104

4.3	ESTUDO DA COMPOSIÇÃO	117
4.4	COMPARAÇÃO ENTRE O CONCRETO COM AGREGADOS NATURAL E REICLADO	146
5	CONCLUSÕES	151
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	153
6	REFERÊNCIAS.....	154
	APÊNDICE A - ESTUDO DA PRÉ-MOLHAGEM	169
	APÊNDICE B - ESTUDO DA COMPOSIÇÃO	170

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil tem papel relevante tanto no consumo de recursos naturais como na geração de impactos ambientais. Este impacto vai desde a fabricação de cimento e com as emissões de gás carbônico na atmosfera, a extração de agregados naturais até a disposição dos resíduos em aterros (ANGULO, 2000; RIBEIRO, DE MOURA e PIROTE, 2016). Cada vez mais o ambiente se torna um aspecto importante na cadeia produtiva, pois os processos de fabricação de produtos geram resíduos que, se não forem corretamente reaproveitados, certamente serão depositados na natureza e poderão ser causa de inúmeros problemas ambientais (GONÇALVES, 2001).

O ato de reciclar é quase tão antigo quanto a própria humanidade (PEREIRA e VIEIRA, 2013). O reuso e estudo de resíduos de construção civil começou bem antes da adoção de conceitos, técnicas e posturas mais sustentáveis por parte de todos os setores (LEITE, 2001). Desde a época dos romanos há registros da utilização de alvenaria britada (SCHULZ; HENDRICKS, 1992). No entanto, a primeira utilização significativa de RCC foi no fim da Segunda Guerra Mundial, uma vez que os bombardeios geraram um grande volume de escombros. Esse fato, aliado à necessidade de matéria-prima e a falta de local para disposição dos resíduos fomentaram o reaproveitamento e a reciclagem (LEITE, 2001).

Um dos graves problemas urbanos atuais é a geração e a destinação de resíduos sólidos provenientes da indústria da construção civil (LATTERZA, 1998; NASCIMENTO *et al.*, 2015). Os resíduos de construção civil (RCC) representam 50% da massa dos resíduos sólidos urbanos (RSU) (ANGULO, 2005; PINTO, 1999). Em Curitiba cerca de 48% dos resíduos sólidos são provenientes da construção civil (NAGALLI, 2016).

No Brasil, segundo Miranda, Angulo e Careli (2009), há registro de funcionamento de usinas de reciclagem desde 1986. Porém a reciclagem dos resíduos de construção no país teve início efetivo no ano de 1991, em Belo Horizonte (LEITE, 2001).

Visando regulamentar a disposição destes resíduos no Brasil, em 2002 foi homologada a Resolução nº 307 (CONAMA, 2002), definindo que os grandes geradores, sejam públicos ou privados, devem desenvolver e implantar planos de

gestão de RCC com objetivo de reutilizar, reciclar ou dar outra destinação ambientalmente correta a esses resíduos e, com isso, a reciclagem desses resíduos ganhou força.

A resolução nº 307 (CONAMA, 2002), representa um marco no sistema regulatório de gestão de resíduos da construção civil (FERREIRA, MOREIRA, 2013). A referida resolução apresenta a seguinte definição:

Resíduos da construção civil: são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha;

Segundo a mesma resolução, agregado reciclado é o material granular que provém do beneficiamento de resíduos de construção. Eles devem apresentar características que os permitam ser utilizados em obras de edificação, infraestrutura, aterros sanitários e outras obras de engenharia.

Resíduo de construção civil é definido por Angulo (2000) como qualquer resíduo oriundo de novas construções, reformas, demolições, que envolvam obras de arte, solos ou resíduos de vegetação presentes em limpeza de terreno, sendo a fração vegetal inclusa, pois a contaminação é inerente aos resíduos.

Pode ser definido também como restos do processo construtivo que se tornaram inadequados para sua uso inicialmente programado e que são descartados (FERNANDES; GUEDES, 2014).

No estudo de Lima (1999) foi verificado que a composição média do RCC é bastante heterogênea, variando conforme região e período de análise, não sendo possível fixar valores de porcentagem para os diversos componentes (argamassa, produtos cerâmicos, brita, concreto, torrões, entre outros). Desta forma, a proporção de materiais em diferentes amostras é de grande variabilidade e heterogeneidade, o que dificulta a reciclagem e utilização (SILVA; MACIEL, 2014).

No entanto, para efeitos legais, os resíduos de construção civil devem seguir a classificação de acordo com a resolução CONAMA nº 307. O Artigo 3º da referida resolução classifica os resíduos de construção civil em quatro classes, de A a D, sendo que as duas primeiras classes devem ser reutilizadas e/ou recicladas para a produção de agregados (FERREIRA, MOREIRA, 2013).

A partir da homologação da referida resolução houve uma aceleração na quantidade de usinas de reciclagem instaladas pois, segundo essa resolução, os geradores de resíduos passaram a ser responsáveis pelos resíduos (ABRECON, 2013).

Visando também a destinação dos resíduos gerados na construção civil a Prefeitura Municipal de Curitiba, no decreto número 852 de 2007, dispôs sobre a obrigatoriedade da utilização de agregados reciclados, oriundos dos resíduos sólidos da construção civil, em obras e serviços de pavimentação das vias públicas. Segundo o referido decreto, essa medida foi adotada levando em consideração os impactos ambientais negativos causados pela disposição inadequada dos resíduos da construção civil, os danos causados pela extração de matéria-prima virgem não renovável do ambiente e o desenvolvimento socioeconômico do município com a instalação de usinas de reciclagem.

Diante dos fatos expostos, a reciclagem dos resíduos vem se tornando uma alternativa econômica e ambientalmente viável, com aplicações na própria construção civil. Nas usinas de reciclagem é feita separação dos resíduos Classe A da Resolução nº 307 (CONAMA, 2002), que exclui plástico, metal, vidro, madeira e gesso (LASSO *et al.*, 2013). Este resíduo de construção civil reciclado, pode ser utilizado em substituição aos agregados graúdo e miúdo da produção de concreto e argamassa sem função estrutural e vem sendo estudado para atender as necessidades da indústria da construção (HUANG *et al.*, 2002).

Uma das possíveis aplicações dos agregados provenientes da reciclagem dos ARC é na fabricação de concreto de consistência rígida, denominados como concretos *no slump*. Este tipo de concreto tem como característica apresentar valores de *slump* de 0 a 25 mm e, a principal aplicação é na fabricação de peças conformadas por extrusão, vibro compactadas e no concreto compactado a rolo.

Para estudar a deformação do concreto no estado fresco é adequado valer-se de conceitos da reologia, (CASTRO, 2007).

Contudo, a estrutura do concreto é heterogênea e complexa, com fases e propriedades que interagem e influenciam as características. Para estudo das propriedades é necessário conhecer as características dos materiais constituintes e a relação entre eles (GONÇALVES, 2001).

1.1 JUSTIFICATIVA

Segundo a ABRELPE (2015) (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais) no ano de 2015 foram coletadas no Brasil cerca de 45 milhões de toneladas de RCC, um aumento de 1,2% em relação ao ano de 2014. Ainda segundo a ABRELPE, na região sul do país a geração estimada é de 0,748 kg/hab/dia de resíduos de construção civil. Deste montante, aproximadamente 95% são de interesse para reciclagem por possuírem natureza mineral inorgânica (ANGULO *et al.*, 2002).

A triagem e reciclagem destes materiais é de fundamental importância por contribuírem com a redução da utilização de aterros, ocorrência de deposições irregulares, consumo de recursos naturais não renováveis e impactos ambientais das atividades de extração de agregados (NASCIMENTO *et al.*, 2015; PINTO, 1999). Porém são muitas as dificuldades que as empresas de construção civil apresentam para a adequação à processos mais sustentáveis sem a geração de custos excessivos (FERNANDES; GUEDES, 2014).

Elementos simples de concreto, como meios-fios e blocos para calçadas, são fabricados com agregados naturais, porém os agregados provenientes dos ARC são uma alternativa viável para essas aplicações (MEFTEH *et al.*, 2013). Como estes artefatos de concreto são itens com baixa margem de lucro, fábricas desses produtos têm potencial interesse no uso de agregados de RCC devido a estes agregados apresentarem menores custos que os convencionais (TANG; SOUTSOS; MILLARD, 2007).

Segundo Surya, Kanta Rao e Lakshmy (2013) em 1999 já eram utilizados agregados reciclados de RCC para a fabricação de meios-fios na *Lent hall Street Project*, em Sydney, Austrália.

A porosidade aberta do agregado proveniente do RCC afetam a trabalhabilidade do concreto, uma vez que removem água da argamassa

(ZORDAN, 1997). Dada a importância da trabalhabilidade para concretos destinados à extrusão e considerando que o concreto comporta-se como um sólido em suspensão, nada mais adequado do que aplicar os conceitos da reologia ao estudo do seu comportamento no estado fresco (CASTRO, LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011).

O estudo das características reológicas do concreto tem aplicações que são de interesse na estimativa de diversos aspectos tais como: energia de mistura; capacidade de bombeamento do concreto e taxa de escoamento; velocidade do escoamento sob efeito da gravidade; velocidade do escoamento sob efeito combinado da gravidade e vibração; intervalo de tempo no qual o concreto pode ser lançado; qualidade da superfície da peça de concreto, entre outras (CASTRO, 2007).

Desde 1941, quando Powers e Wiler introduziram o plasticizômetro – equipamento que mensurava o torque aplicado pelo concreto em um cilindro, diversas tentativas têm sido feitas para conhecer as propriedades do concreto fresco. Os ensaios mais comumente utilizados são de métodos empíricos, como o ensaio de abatimento de tronco de cone. De acordo com Castro (2007) em 1973 houve avanço quando Tattersall introduziu o ensaio de dois pontos da trabalhabilidade. Desde esta época, o estudo do comportamento reológico do concreto fresco tem ocorrido continuamente, porém o estudo das propriedades do escoamento do concreto fresco ainda não é muito comum.

Diante do exposto o presente trabalho apresentará uma análise de concretos *no slump* no estado fresco com agregado de ARC, utilizando conhecimentos já estabelecidos sobre empacotamento de partículas, de maneira a viabilizar a substituição dos agregados convencionais por agregados reciclados de concreto.

A metodologia proposta poderá ser adaptada para as características dos agregados de outras regiões e com os resultados deste estudo será possível compreender melhor o impacto da substituição de agregados naturais por provenientes de ARC em concretos *no slump*. Dessa forma as empresas que não fazem essa substituição pela dificuldade de adaptação do traço terão subsídios para iniciar ou, aumentar a produção de concreto contendo esse tipo de agregado.

1.2 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar o efeito do uso de agregados provenientes da fração cinza dos resíduos de construção civil nas propriedades do concreto *no slump*.

1.2.1 Objetivos Específicos

De maneira a atingir o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos a serem alcançados ao longo desta pesquisa:

- avaliar a influência da variação das taxas de pré-molhagem dos agregados reciclados nas características do estado fresco e na resistência à compressão do concreto;
- analisar a influência da variação do volume de excesso de pasta e relação água/cimento na trabalhabilidade e resistência do concreto, e;
- comparar o custo dos materiais para a fabricação de meio-fio com concreto convencional e com concreto de agregados reciclados que obtiver o melhor desempenho no estado fresco e endurecido.

1.3 ESTRUTURA

O presente trabalho está estruturado em 5 capítulos.

No segundo capítulo é apresentada a revisão da literatura que abordará: a reciclagem do ARC para utilização como agregados, características relacionadas ao concreto *no slump*, a teoria do excesso de pasta e os principais aspectos relacionados com os ensaios e a reologia do concreto *no slump*.

No terceiro capítulo serão detalhados os materiais quanto à caracterização dos componentes utilizados para a produção dos concretos e os procedimentos experimentais quanto à aplicação de métodos para caracterizar o concreto *no slump* com agregados naturais e de ARC no estado fresco e endurecido.

No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios e no capítulo cinco são expostas as conclusões obtidas, além de sugestões para futuras pesquisas nesta área.

Por último, são apresentadas as referências e inseridos os Apêndices utilizados na elaboração da presente pesquisa.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão apresentadas informações acerca dos agregados de construção civil, reologia e ensaios de caracterização reológica de materiais a base de cimento e concreto *no slump*.

2.1 AGREGADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

A estimativa da literatura sobre a quantidade de resíduos gerada já é motivo suficiente para que sejam tomadas medidas para conter o avanço do problema. Depois de tomadas as medidas necessárias para a redução da geração de ARC, a reutilização dos materiais refugados sem a necessidade de beneficiamento pode ser considerada a melhor solução (LEITE, 2001).

Quando considerada a necessidade de matéria-prima, a reciclagem pode ser considerada como uma importante solução. Na reciclagem o RCC passa por algum tipo de beneficiamento para que possa ser reutilizado. O beneficiamento dos resíduos de construção civil passa pelas fases de separação, britagem, peneiramento e estocagem, para então ser encaminhado para a utilização (LEITE, 2001).

Uma solução que cada vez mais vem sendo defendida por pesquisadores, é a de que os resíduos de construção civil reciclados sejam utilizados na própria construção civil, como matéria-prima alternativa. Essa solução, além de diminuir a exploração de jazidas de recursos naturais não renováveis, é uma alternativa ao fato dos locais para deposição de RCC serem cada vez mais escassos e distantes dos centros geradores, tornando o processo de disposição oneroso (BRASILEIRO; MATOS, 2015).

Segundo Goldstein (1995) a incorporação de materiais reciclados ao concreto pode ser uma boa forma de conservar energia e recursos naturais, além de aumentar a vida útil das áreas destinadas a disposição de resíduos. Adicionalmente, de acordo com Ângulo, Zordan e John (2000) a reciclagem de RCC pode trazer inúmeros benefícios, tais como:

- redução no consumo de recursos naturais não-renováveis, quando substituídos por resíduos reciclados (JOHN, 2000);

- redução de áreas necessárias para aterro, pela minimização de volume de resíduos pela reciclagem (PINTO, 1999);
- redução do consumo de energia durante o processo de produção (JOHN, 2000).

Segundo Filho *et al.* (2013) os resíduos de construção civil podem ser reciclados para diversos usos na própria construção como agregados para concreto ou de maneira direta como material base em obras de terraplanagem, drenagem, estabilização de encostas e material de recuperação topográfica.

2.1.1 Uso do Rcc como Agregado Reciclado

Segundo diversos estudos (CAMARGO, 1995; LEVY, 1997; OLIVEIRA *et al.*, 2006; ZORDAN, 1997) os resíduos de construção civil, quando reciclados segundo metodologia adequada, podem gerar agregados com propriedades adequadas e custos inferiores aos preços médios dos agregados convencionais.

Aproximadamente 7 anos após a publicação da resolução CONAMA nº 307 já haviam 48 usinas instaladas no país, sendo cerca de metade delas pertencente ao poder público (MIRANDA; ANGULO; CARELI, 2009). Na última pesquisa setorial feita pela ABRECON - Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolições, a qual avaliou os dados de 2008 a 2013, constatou-se uma taxa de crescimento de 10,6 novas usinas por ano, indicando que o setor de reciclagem de RCC está em franco crescimento no país (ABRECON, 2013).

A partir da resolução CONAMA nº 307, planos de gerenciamento foram implantados e normas foram elaboradas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT - a partir de 2004 como (MIRANDA; ANGULO; CARELI, 2009).

- NBR 15113:2004 - Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros - Diretrizes para implantação e operação;
- NBR 15114:2004 - Resíduos sólidos da construção civil - Áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15115:2004 - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos

- NBR 15116:2004 - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos

Segundo a NBR 15114 (ABNT, 2004) agregados reciclados são os materiais granulares provenientes do beneficiamento dos resíduos Classe A que apresentam características técnicas para aplicação em obras de edificações, infraestrutura, aterros sanitários e outras obras de engenharia.

Os agregados reciclados podem ser classificados como de concreto e mistos. Os agregados reciclados de concreto (ARC), segundo a NBR 15116 (ABNT, 2004) são os obtidos por meio do beneficiamento de resíduos classe A que possuam na fração graúda no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland ou rochas. Por outro lado, o agregado reciclado misto (ARM) é proveniente de resíduos classe A com menos de 90% em massa de materiais cimentícios e rochas.

Para Lima (1999), os custos para remover e aterrar os resíduos de construção civil são maiores que os custos para reciclá-los. A economia é ainda maior quando computados os valores gastos com gerenciamento dos resíduos, menor velocidade de esgotamento dos aterros e menor gasto de energia para extração (LEITE, 2001).

Porém, de acordo com Simpson (1999) um aspecto intrínseco à reciclagem de RCC é a dificuldade de aceitação do mercado para a utilização desse material. Por esse motivo é importante, segundo o autor, que haja incentivos públicos e fiscais para estimular o consumo, como a taxação da extração de recursos naturais e incentivos fiscais para empresas que utilizem esses materiais. Apesar disso a demanda de agregados alternativos aos de origem natural vem aumentando (FERREIRA, MOREIRA, 2013).

De acordo com a ABRECON, na Tabela 1 encontram-se os diferentes produtos que têm origem na reciclagem dos resíduos de construção civil, bem como a recomendação de uso.

Tabela 1 - Produtos reciclados de RCC

Produto	Características	Recomendação de uso
Areia reciclada	Material com dimensão máxima característica inferior a 4,8 mm, isento de impurezas, proveniente da reciclagem de concreto e blocos de concreto.	Argamassas de assentamento de alvenaria de vedação, contra pisos, solo-cimento, blocos e tijolos de vedação.
Pedrisco reciclado	Material com dimensão máxima característica de 6,3 mm, isento de impurezas, proveniente da reciclagem de concreto e blocos de concreto.	Fabricação de artefatos de concreto, como blocos de vedação, pisos intertravados, manilhas de esgoto, entre outros.
Brita reciclada	Material com dimensão máxima característica inferior a 39 mm, isento de impurezas, proveniente da reciclagem de concreto e blocos de concreto.	Fabricação de concretos não estruturais e obras de drenagens.
Bica corrida	Material proveniente da reciclagem de resíduos da construção civil, livre de impurezas, com dimensão máxima característica de 63 mm (ou a critério do cliente).	Obras de base e sub-base de pavimentos, reforço e subleito de pavimentos, além de regularização de vias não pavimentadas, aterros e acerto topográfico de terrenos.
Rachão	Material com dimensão máxima característica inferior a 150 mm, isento de impurezas, proveniente da reciclagem de concreto e blocos de concreto.	Obras de pavimentação, drenagens e terraplenagem.

Fonte: ABRECON (2016)

Os agregados reciclados de RCC apresentam grande variabilidade, pois depende da composição do resíduo utilizado, do equipamento, do teor de impurezas, da granulometrias entre outros (JADOVSKI, 2005).

Segundo Hansen e Narud (1983) as características físicas e mecânicas do agregado reciclado são mais afetadas quanto menor a resistência do concreto original e quanto maior a quantidade de argamassa aderida.

2.1.2 Propriedades dos Agregados Reciclados

Os agregados de RCC apresentam características específicas e diferentes das do agregado natural, fator que determina algumas diferenças nas condições de aplicação e nas características do concreto em que forem utilizados.

De acordo com Lima (1999) as principais diferenças do agregado de RCC com relação ao agregado natural são:

- maior absorção de água pelas partículas;
- heterogeneidade da composição e,
- menor resistência mecânica das partículas.

2.1.2.1 Composição granulométrica e conteúdo de finos

A composição granulométrica dos agregados reciclados é influenciada pelo tipo e pela distribuição granulométrica do resíduo utilizado na obtenção, bem como do tipo de britador e suas regulagens (BANTHIA; CHAN, 2000; BAZUCO, 1999; LIMA, 1999). Além disso, a distribuição granulométrica influencia na trabalhabilidade do concreto no estado fresco e é um importante parâmetro na dosagem de concretos (OLIVEIRA, 1997).

Segundo Lima (1999) são gerados elevados percentuais de fração miúda, com até 60% em massa, nas recicladoras brasileiras que utilizam britadores de impacto. Para o autor, esse alto índice está atrelado ao tipo de resíduo, ao modelo de britador utilizado e a falta de classificação pré-britagem para retirada da parcela miúda do resíduo. Além disso, para o autor, um fator negativo é que o RCC apresenta parcela significativa de material fino ($< 0,063$ mm), porém a lavagem dos agregados pode reduzir esse teor de 10% para 0,8% (VAN DER WEGEN; HAVERKORT, 1998)

Os agregados reciclados de concreto tendem a apresentar curvas granulométricas próximas às curvas dos agregados naturais e não são significativamente influenciadas pela resistência original do concreto, porém pendem a uma composição granulométrica um pouco mais grossa, com agregados maiores e mais angulares e, por consequência, produzem concretos mais ásperos e menos trabalháveis (HANSEN, T. C., 1992; JADOVSKI, 2005). Schulz e

Hendricks (1992) afirmam que mesmo centrais modernas de reciclagem encontram dificuldades de obter agregados reciclados de alvenaria que atendam às exigências de granulometria.

Devem ser tomadas precauções no que tange a composição granulométrica dos agregados reciclados para que possam ser produzidos concretos trabalháveis, com empacotamento satisfatório e que assim apresentem desempenho técnico e redução de custos (LEITE, 2001). Nas misturas que utilizam substituição total de agregados naturais por reciclados a granulometria deve ser ajustada aos limites utilizados para os naturais, para que se tenha certa segurança em relação a trabalhabilidade e consumo de cimento (JADOVSKI, 2005).

2.1.2.2 Forma e textura das partículas

A forma e a textura das partículas exercem grande influência na produção do concreto principalmente no estado fresco, afetando aspectos como a trabalhabilidade, compacidade, ângulo de atrito interno e relação a/c, sendo que partículas de textura mais áspera, angulosa e alongada requerem mais pasta de cimento para produzir misturas trabalháveis (COUTINHO, 1997; LEITE, 2001; MEHTA; MONTEIRO, 1994).

O agregado graúdo reciclado possui forma similar àquele produzido na britagem de rocha calcária, porém apresenta textura mais áspera e porosa (CARNEIRO *et al.*, 2000). Para Hamassaki *et al.* (1996) a superfície dos agregados naturais pode ser considerada como praticamente polida, enquanto a dos agregados reciclados como áspera, quando obtidas de blocos cerâmicos e tijolos e muito ásperas quando obtidas de concreto. Essa aspereza vem da argamassa aderida às partículas ou do próprio material cerâmico (LEITE, 2001).

Apesar da forma mais angular, o agregado reciclado demanda maior quantidade de argamassa para melhorar a trabalhabilidade, enquanto a textura mais rugosa, tamanho e forma promovem boa aderência entre estes e a matriz do concreto (PIETERSEN; FRAAY; HENDRIKS, 1998; SAGOE-CRENTSIL; TAYLOR; BROWN, 1998). Além disso, o agregado reciclado absorve, por meio dos poros superficiais, a pasta de cimento, gerando nessa região maior concentração de cristais de hidratação, fato que pode melhorar o desempenho do concreto, pois

permite maior fechamento da zona de transição matriz-agregado (JADOVSKI, 2005).

Em pesquisas feitas por Bazuco (1999) e Leite (2001) foi encontrada uma relação entre a forma e textura dos agregados e o material de origem e o tipo de britador escolhido, sendo que o britador de mandíbula produz agregados de forma mais angular e o britado giratório produz agregados de forma mais arredondada.

Na pesquisa de Leite (2001) o concreto que utiliza agregado reciclado tem mistura mais coesa e, conseqüentemente, apresenta menor trabalhabilidade quando comparada a um mesmo concreto com agregado natural. Esse fato, segundo a autora, seria uma desvantagem na medida em que aumenta o custo do concreto por demandar mais pasta de cimento para produzir concretos trabalháveis.

Segundo Neville (1995) existe uma dificuldade de se representar corpos tridimensionais para a determinação da forma dos agregados. Por esse motivo, segundo o autor, a maioria das metodologias com esse fim define parâmetros geométricos para avaliação da forma dos agregados. Apesar de existirem formas de representar tridimensionalmente as partículas elas são dispendiosas e ainda pouco acessíveis nos centros de pesquisa (WEIDMANN, 2008).

2.1.2.2.1. Coeficiente volumétrico de forma

Uma das metodologias disponíveis para determinar a esfericidade dos agregados é proposta pela norma francesa XP P18-540 (AFNOR, 1997), que estabelece um coeficiente o qual indica o quanto o agregado se aproxima da forma esférica.

O estudo da esfericidade dos agregados parte do princípio que, para uma mesma distribuição granulométrica, quanto mais arredondados forem as partículas maior será o empacotamento do agregado.

O coeficiente volumétrico proposto por esta norma estabelece uma relação entre o volume das partículas e o volume de uma esfera que circunscreve essas partículas (FABRO; GAVA; GRIGOLI, 2011) conforme a Equação 1:

$$Cf = \frac{V}{\pi \frac{d^3}{6}} \quad (1),$$

em que:

V = volume da partícula;

d = diâmetro da esfera que circunscribe a partícula, sendo igual a sua maior dimensão.

Quanto maior o coeficiente de forma mais arredondado é a partícula, sendo que, para uma esfera esse coeficiente é igual a 1. A norma francesa recomenda limite de coeficiente de 0,20 para concretos estruturais armados e de baixa permeabilidade, mesmo coeficiente apontado pela norma espanhola UNE 7.238 (1971), que utiliza a mesma metodologia da AFNOR. Para concretos pouco ou não armados esse limite é de 0,15 (WEIDMANN, 2008). Agregados naturais apresentam coeficiente de forma próximos a 0,20 (FABRO; GAVA; GRIGOLI, 2011).

2.1.2.3 Massa específica e massa unitária

Os agregados reciclados em geral apresentam tanto massa unitária quanto massa específica menores que as apresentadas pelos agregados naturais, fato que se reflete nas massas específicas de argamassas e concretos produzidos com esses agregados, que também são menores que as de argamassas e concreto convencionais (LEITE, 2001; LIMA, 1999). Os valores de massa específica de agregados reciclados são de 5 a 10% mais baixos do que as de agregados naturais, fato devido à argamassa aderida às partículas do agregado reciclado e pelo fato de que os ARC são compostos de materiais porosos (BAZUCO, 1999; HANSEN, 1992; HANSEN; NARUD, 1983; LIMA, 1999).

De acordo com Lima (1999), os agregados reciclados de concreto apresentam, em geral, massa específica maior do que aqueles produzidos com alvenaria. Ainda segundo o autor, a parcela graúda do agregado reciclado apresenta menor diferença que a parcela miúda quando comparados aos agregados convencionais, devido ao menor teor de argamassa aderida.

Os resultados obtidos em pesquisas para massa específica e massa unitária são muito variáveis, mesmo para materiais com composição semelhante, fato que pode ser explicado pela diferenças na composição, tipo de beneficiamento, distribuição granulométrica e método utilizado para determinação dessa propriedade (JADOVSKI, 2005; LEITE, 2001).

2.1.2.4 Desgaste por abrasão do agregado

De forma geral os agregados reciclados apresentam menores valores de resistência ao impacto e resistência ao desgaste por abrasão que os agregados naturais devido a argamassa aderida e sua fraca ligação com o agregado (BAZUCO, 1999; LEITE, 2001; TAVAKOLI; SOROUSHIAN, 1996a, b). Hansen (1992) aponta ainda que o tipo de concreto que deu origem ao agregado reciclado tem relação com os valores obtidos nos ensaios de abrasão, pois quanto mais resistente o concreto, menor a relação água/cimento e menor o desgaste por abrasão.

Nas pesquisas de Hansen e Narud (1983), Bazuco (1999) e Tavakoli e Soroushian (1996a), foram obtidos valores de desgaste por abrasão para agregados reciclados de 20 a 60% maiores que para os agregados naturais.

Apesar dos pesquisadores terem observado um aumento no desgaste por abrasão, os valores encontrados para esta propriedade nos agregados de ARC (de 20 a 43%) satisfazem o requisito da NBR 6485 (ABNT, 1984), que considera como inadequado para uso em concreto apenas os agregados que apresentarem perda de massa por abrasão superior a 50% em massa.

2.1.2.5 Absorção de água

Uma das características mais distintas entre agregado reciclado e agregado natural é a absorção de água, uma vez que os agregados de ARC são compostos por materiais porosos como argamassa, componentes de alvenaria. O agregado de ARC apresenta taxas de absorção de água significativas, mesmo aqueles destinados a concretos estruturais (LIMA, 1999).

Isso ocorre porque os agregados reciclados têm grande porosidade e maior quantidade de finos (CARNEIRO *et al.*, 2000). Lima (1999) afirma que a absorção do agregado de ARC está relacionada com a porosidade dos componentes do resíduo utilizado para sua fabricação. Segundo o autor os agregados obtidos de alvenaria e argamassa apresentam taxa de absorção em torno de 15%, enquanto naqueles obtidos a partir da reciclagem de concreto essa taxa fica na faixa de 10%. A absorção de água decresce linearmente com o aumento dos teores das fases concreto e rocha, que apresentam menor absorção (ANGULO, 2000). Vários outros autores também afirmam que o aumento da taxa de absorção deve-se à camada de argamassa aderida às partículas (BANTHIA; CHAN, 2000; BAZUCO, 1999; HANSEN, 1992; LEVY, 1997; OLIVEIRA, 1997; ZORDAN, 1997).

No uso de agregados convencionais a taxa de absorção de água não exerce quase nenhum tipo de influência nas misturas de concreto, uma vez que esses agregados apresentam pouca ou nenhuma porosidade (LEITE, 2001). Porém ao se trabalhar com agregados reciclados, a influência da taxa de absorção torna-se uma grande preocupação, já que uma das características desse material é apresentar valores bem mais elevados de absorção do que os agregados convencionais (LEITE, 2001).

Em seus estudos Oliveira (1997) faz algumas considerações sobre a absorção de água pelos agregados graúdos reciclados de ARC. Quando esse material é incorporado diretamente à pasta de cimento, a absorção de água não ocorre uniformemente, mas principalmente pela zona de contato entre a pasta, ou argamassa, e o agregado e, esse fato faz variar a relação água/cimento da mistura de concreto, formando um gradiente decrescente da pasta ou argamassa até a superfície do agregado graúdo.

Oliveira (1997) ainda ressalta que as características do agregado influenciam diretamente na quantidade de água a ser absorvida por ele, ou seja, quanto mais poroso, seco e de menor dimensão, maior será a quantidade de água absorvida. Porém se esse agregado for previamente misturado à água antes de ser adicionado ao concreto, as partículas ficarão praticamente saturadas e a probabilidade de o agregado absorver água da pasta ou argamassa é muito menor.

Pode ocorrer inclusive o fenômeno inverso e o agregado devolver parte da água absorvida e promover a cura úmida interna do concreto, esta é uma

propriedade inerente aos agregados leves de alto poder de absorção (MACHADO JR.; AGNESINI, 2000; NEVILLE, 1995).

A quantidade de água que pode ser absorvida pelo material reciclado depende da condição inicial de umidade do agregado, tempo de contato do material com a água e se o agregado entra em contato primeiro somente com a água ou com a pasta de cimento (OLIVEIRA, 1997).

Caso o agregado de ARC entre em contato inicialmente com a água, a absorção será maior e, saturado, a possibilidade de absorção de água da mistura será menor (JADOVSKI, 2005).

Embora a pré-umidificação seja necessária, não há consenso sobre a duração desse período (LEITE, 2001). Lima (1999) afirma que esse período é curto uma vez que o agregado de ARC alcança 95% da absorção máxima nos primeiros 5 minutos. Para Knights (1998) o tempo de 10 minutos de pré-molhagem foi considerado suficiente para reduzir a alta absorção dos agregados reciclados.

A absorção de água dos agregados de ARC é ainda mais importante quando o uso é em concretos, pois essa característica influencia diretamente na relação a/c (água/cimento) das misturas. Se a absorção diferenciada desse material não for considerada, além da redução da relação a/c haverá também redução substancial da trabalhabilidade do concreto, deixando o material muito seco (LEITE, 2001). Outro aspecto abordado no estudo de Leite (2001) ao se produzir concretos com agregado reciclado há necessidade de acrescentar mais água a mistura e, com isso, haverá conseqüente redução da resistência mecânica. Para que a resistência não seja afetada haverá a necessidade do aumento do consumo de cimento ou uso de aditivos para manter a relação a/c do traço original.

É apresentada na Tabela 2 um levantamento dos valores encontrados para absorção de agregados graúdo e miúdo reciclados.

Tabela 2 - Levantamento de valores de absorção encontrados para agregados reciclados

Autor	Absorção Agregado miúdo (%)	Absorção Agregado graúdo (%)
Bazuco (1999)	-	8,45
Gonçalves (2001)	-	4,9
Leite (2001)	8,6	4,95
Buttler (2007)	-	4,45
Corinaldesi (2010)	8,8	6,8
Barbudo <i>et al.</i> (2013)	-	7,34
Folino; Xargay (2014)	-	2,69
Pelissari (2016)	-	3,22
Hermann (2016)	10,5	8,4
Araújo <i>et al.</i> (2016)	-	6,69
Barros; Fucale (2016)	10,0	-
Jordani (2016)	-	8,96
Zega (2016)	-	4,6
Tavares; Kazmierczak (2016)	-	7,91

Fonte: Autoria própria (2017)

Como pode ser observado na Tabela 2, os valores de absorção de agregados reciclados são bastante variáveis devido, principalmente, a heterogeneidade da composição dos mesmos.

A Diretriz 121 DRG de RILEM - *International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures*, que trata do uso da parcela graúda do material em concretos, leva em conta a alta absorção dos reciclados. As taxas de absorção máximas admitidas são 10 % e 20 %, para agregados reciclados de concreto e de alvenaria, respectivamente (LIMA, 1999). Na norma japonesa “Agregado reciclado e concreto de agregado reciclado” limita a taxa de absorção para menor que 7% nos agregados graúdos e 13% nos agregados miúdos (HANSEN, T. C., 1992).

2.1.2.5.1. Pré-molhagem

A absorção característica dos agregados naturais, devido à pouca ou nenhuma porosidade, praticamente não exerce influência no concreto. Esta característica nos agregados reciclados, devido a maior porosidade, pode afetar as

propriedades do concreto tanto no estado fresco quanto no estado endurecido (MALTA *et al.*, 2014; PADOVAN, 2013; TROIAN, 2010).

Para minimizar os efeitos da absorção, que podem resultar em perda de trabalhabilidade e alteração da relação água/cimento do concreto, não é adequado adicionar à mistura os agregados secos ou com baixa umidade e, para isto, é realizada a compensação da absorção por meio da pré-molhagem (MALTA *et al.*, 2014; PADOVAN, 2013).

Apesar de ser bastante difundida a necessidade da pré-molhagem, ainda não há um consenso sobre a quantidade de água a ser compensada (PADOVAN, 2013). Não é recomendada uma condição de extrema umidade no agregado reciclado pois ela pode provocar diminuição tanto da durabilidade das propriedades mecânicas (POON *et al.*, 2004).

No caso em que o agregado reciclado não completamente saturado é utilizado na mistura do concreto, poderá continuar absorvendo água da mistura e, desta forma, provocará retenção de partículas de cimento na superfície, o que reduz a capacidade de absorção do agregado. J No caso da adição de agregado reciclado completamente saturado não há movimentação de água para o interior das partículas, porém haverá movimentação da água interna do agregado para a pasta do concreto, aumentando a relação água/cimento e reduzindo a aderência entre a pasta e o agregado (OLIVEIRA, 1997; PADOVAN, 2013). Além disso, a água da pré-molhagem absorvida pelo agregado reciclado torna-se disponível após certo tempo da mistura, o que ajudaria a hidratar partículas de cimento ainda não hidratadas e também auxiliaria no processo de cura do concreto (CABRAL *et al.*, 2007).

Na Tabela 3 é apresentada uma relação de autores que utilizaram nas pesquisas com agregados reciclados, a pré-molhagem com teor de absorção compensada e o tempo que os agregados foram pré molhados antes da mistura do concreto.

Tabela 3 - Levantamento de autores e seus teores e tempos de pré-molhagem

Autor	Teor de pré-molhagem (%)	Tempo de pré-molhagem
Vieira (2003)	50	Na Água de amassamento
Ferreira (2007)	90	5 minutos
Cabral <i>et al.</i> (2007)	80	10 minutos
Troian (2010)	0, 25, 50, 75, 100	10 minutos
Werle (2010)	0, 25, 50, 75, 100	10 minutos
Fedumenti (2013)	50	10 minutos
Malta <i>et al.</i> (2014)	7	10 minutos
Nogueira (2015)	0	-
Jordani (2016)	100	24 horas

Fonte: Autoria própria (2017).

Como pode-se observar na Tabela 3 não há um consenso sobre a forma de se realizar a pré-molhagem. Porém nota-se uma tendência de compensação da absorção nos primeiros 10 minutos, haja visto a rápida absorção da água pelo agregado reciclado seco.

Outro aspecto importante da pré-molhagem é a manutenção da trabalhabilidade do concreto, sem esse procedimento o agregado reciclado mais poroso iria absorver parte da água de amassamento e seria necessário acrescentar mais água na mistura para alcançar a mesma trabalhabilidade de um concreto com agregados convencionais (PADOVAN, 2013).

Embora a pré-molhagem seja importante para compensar a elevada porosidade apresentada pelos agregados reciclados e para a melhora da plasticidade da mistura do concreto, há a possibilidade de que a água utilizada para este fim migre para a matriz, influenciando na zona de transição e aumentando a relação água/cimento. Desta forma a porcentagem da absorção compensada na pré-molhagem resultam em concretos com relação água/cimento distintas e, por consequência, características no estado fresco e endurecido diferentes (MALTA *et al.*, 2014)

2.1.2.6 Zona de transição interna

A zona de transição entre o agregado reciclado e camada de argamassa aderida é bastante frágil, e essa característica influencia principalmente em

concretos com relação água/cimento baixa, na qual a zona de transição interna do agregado é mais fraca que a nova zona de transição formada (OTSUKI; MIYAZATO; YODSUDJAI, 2003). Desta forma, no concreto produzido com agregado reciclado, há duas zonas de transição: uma entre o agregado e a capa de argamassa, e outra entre a capa de argamassa e a matriz do novo concreto, conforme mostrado na Figura 1 (RYU, 2002).

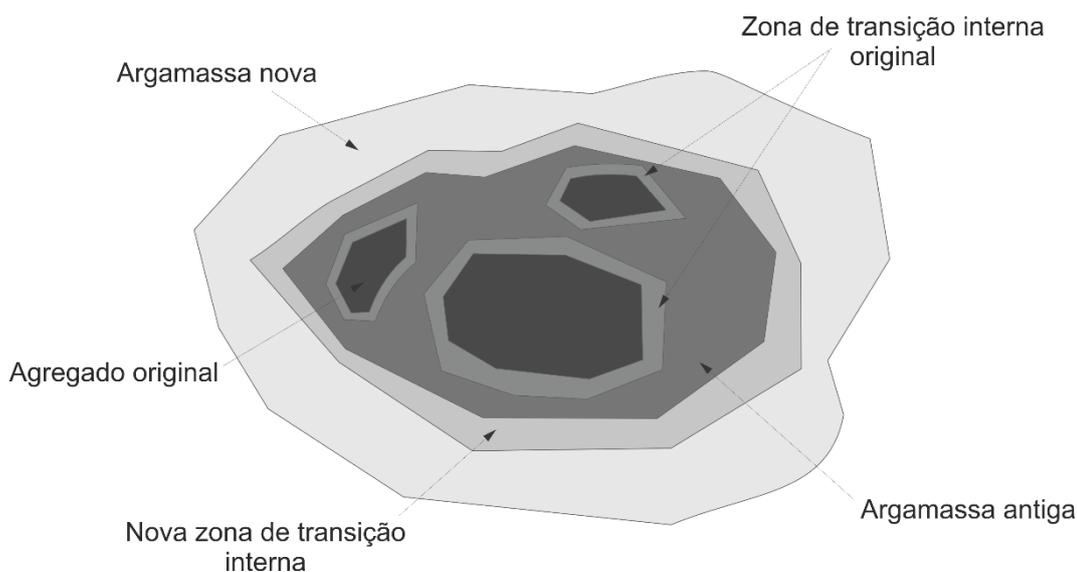


Figura 1 - Camada de argamassa nova ao redor de agregado reciclado em concreto
Fonte: Adaptado de Khoshkenari *et al.* (2014)

Na Figura 1 pode-se observar o agregado reciclado, formado por agregados naturais unidos por argamassa antiga, onde há a zona de transição original entre esses elementos. Esse agregado é rodeado por argamassa nova e, entre ela e a argamassa antiga existe a nova zona de transição.

Logo, a presença desta zona de transição interna influencia de forma negativa as propriedades do concreto produzido com agregado reciclado, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido (LI, W. *et al.*, 2012; ZHANG; INGHAM, 2010).

2.1.3 Propriedades do Concreto com Agregado Reciclado

O desempenho do concreto está diretamente ligado às características dos materiais usados na composição e, dessa forma, os agregados possuem grande

influência nas propriedades finais do concreto (CARRIJO, 2005). Segundo Mehta e Monteiro (1994) os agregados de origem natural são, em sua maioria, mais densos e resistentes e, por esse motivo, há um consenso de que estes agregados deveriam ser reservados para usos mais nobres, como na fabricação de concretos de alta resistência, concreto protendido, entre outros (VÁZQUEZ, 1997).

Para a utilização de agregados reciclados na produção de concreto devem ser realizadas, assim como com os agregados naturais, misturas experimentais nas quais deve ser estabelecida a quantidade de água suficiente para garantir a trabalhabilidade com uso racional de cimento (LEITE, 2001).

Não há consenso sobre os ajustes necessários na dosagem de concretos quando são utilizados agregados reciclados: para Oliveira (1997) há necessidade de se utilizar uma dosagem que evidencia a influência do agregado nas propriedades do concreto; para Banthia e Chan (2000) pequenos ajustes precisam ser feitos para se garantir as propriedades necessárias no concreto final; Devenny e Khalaf (1999) defendem que pode ser utilizada a mesma dosagem desde que se realize a pré-umidificação.

Todavia é consenso que a trabalhabilidade do concreto é afetada pelo uso de agregados reciclados, então para a produção de concretos utilizando esse material devem ser tomadas medidas como a pré-umidificação e uso de aditivos superplastificantes, para ajuste das propriedades necessárias (LEITE, 2001; PIETERSEN; FRAAY; HENDRIKS, 1998).

2.1.3.1 Resistência mecânica à compressão

Concretos que utilizam agregados reciclados apresentam, de forma geral, resistência à compressão menores ou iguais às dos concretos com agregados convencionais para concretos com médio ou alto consumo de cimento (CHEN; YEN; CHEN, 2003; KWAN *et al.*, 2012; LEVY, 2001; LIMA, 1999; MARINKOVIĆ *et al.*, 2010; OLIVEIRA, 1997; PENG *et al.*, 2013). A resistência à compressão dos concretos tende a diminuir conforme se aumenta o teor de substituição dos agregados naturais por agregados reciclados (DILBAS; ŞİMŞEK; ÇAKIR, 2014; FOLINO; XARGAY, 2014; LI, 2008). Quando se substitui 100% dos agregados naturais por reciclados a perda de resistência é de 20 à 30%, porém se forem

substituídos 20% ou menos dos agregados convencionais a perda é menor que 5% (BARBUDO *et al.*, 2013; VÁZQUEZ; HENDRIKS; JANSSEN, 2004).

Nos concretos com baixo consumo de cimento, alta relação água/cimento, a pasta do cimento é o ponto mais frágil da mistura e a presença do agregado reciclado não afeta de maneira significativa a resistência, pois ela é maior do que a resistência da pasta (BAZUCO, 1999; CARRIJO, 2005; JADOVSKI, 2005; LIMA, 1999).

Segundo Soutsos *et al.* (2004), para se manter a resistência do concreto com agregados reciclados, em comparação ao concreto convencional, é necessário que se aumente o consumo de cimento. Porém esse aumento impacta no custo do concreto, o que é inviável para empresas. Outros pesquisadores (AMADEI, 2011; ETXEBERRIA *et al.*, 2007; MATAR; EL DALATI, 2012) também chegaram a conclusões semelhantes, ou seja, a necessidade do aumento do consumo de cimento para manter a resistência à compressão.

Se a resistência for mantida, então o teor de cimento precisa ser aumentado em relação aos concretos feitos com agregados extraídos de fontes naturais. Experiências mostraram que a fração grosseira do agregado pode ser substituída por até cerca de 20% com agregados derivados de alvenaria sem afetar significativamente a resistência à compressão.

Características como alta porosidade e baixa resistência das partículas podem influenciar a resistência à compressão negativamente (CARRIJO, 2005). Segundo Hansen (1992) uma das causas da baixa de resistência à compressão e variabilidade dos resultados é a dificuldade de manter a relação água/cimento constante devido à alta absorção dos agregados reciclados. Esse fato também foi observado por Leite (2001) que constatou a tendência a rápida evolução da hidratação do cimento devido à alta taxa de absorção do agregado reciclado, o que diminuiu a quantidade de água na mistura para completar as reações de hidratação, fazendo com que os cristais de etringita e hidróxido de cálcio tenham um menor crescimento, o que tornaria a pasta mais densa.

Porém Machado Jr. e Agnesini (2000) e Salem e Burdette (1998) afirmam que a alta porosidade e absorção conferem ao agregado reciclado melhor aderência e maior travamento à matriz do concreto e um ganho de resistência entre as primeiras idades e os 28 dias, além de que a absorção de água pelo agregado

reciclado ocasiona a diminuição do a/c do concreto, o que melhora o desempenho mecânico. Nesses casos também é destacado o efeito retardado de hidratação e cura interna (LEITE, 2001; MACHADO JR.; AGNESINI, 2000; NEVILLE, 1995)

A resistência do concreto que deu origem ao agregado reciclado é fator determinante para a resistência do concreto final (BAZUCO, 1999; HANSEN; NARUD, 1983; KASAI; FUJII, 1989; LEVY; HELENE, 2000; LIMA, 1999; TAVAKOLI; SOROUSHIAN, 1996b). Além disso, a fraca aderência entre a argamassa antiga e o agregado original pode levar a redução de resistência do concreto com agregado reciclado (LIMA, 1999).

Devido à falta de um procedimento uniforme para as pesquisas torna-se difícil determinar o comportamento mecânico do concreto com agregado reciclado uma vez que os resultados encontrados em pesquisas apresentam valores variados para os diferentes parâmetros estudados (LIMA, 1999).

2.1.3.2 Massa específica

De modo geral, a massa específica do concreto feito com agregado reciclado tende a ser menor do que a do concreto convencional, em virtude da massa específica do próprio agregado reciclado ser menor, bem como uma maior quantidade de vazios incorporado ao concreto com esse material (LEITE, 2001; LIMA, 1999).

Segundo Machado Jr *et al.* (1998) e Bazuco (1999), a redução da massa específica provocada pelo uso de agregado reciclado confere ao concreto produzido com esse material características que o classificam entre o concreto leve e o concreto convencional.

Nas pesquisas de diversos autores, são descritas reduções de 5 a 17% da massa específica do concreto quando foram utilizados agregados reciclados (DEVENNY; KHALAF, 1999; HANSEN, 1992; LATTERZA, 1998; LEITE, 2001; LEVY, 1997; OLIVEIRA, 1997).

Quanto maior a porcentagem de agregado natural substituído pelo agregado reciclado maior será a diminuição da massa específica do concreto produzido (KIKUCHI; YASUNAGA; EHARA, 1993). Outro ponto que influencia a massa específica do concreto produzido com agregado reciclado é o material de

origem, quanto mais denso os materiais componentes do ARC, maior será a massa específica do concreto produzido (LEITE, 2001)

2.1.3.3 Trabalhabilidade

Há uma grande preocupação com a trabalhabilidade de concretos que utilizam agregado reciclado e com a melhor forma de se determinar essa propriedade (LEITE, 2001; LIMA, 1999).

Os concretos que utilizam agregados reciclados necessitam, em média, de 5% a mais de água livre para que se mantenha o índice de consistência do concreto de mesmo traço com agregado natural (HANSEN; NARUD, 1983).

Os agregados reciclados apresentam maior porosidade, característica que aumenta a absorção de água, conseqüentemente, diminui a quantidade de água livre da mistura. Além disso as partículas apresentam também forma mais angular e textura mais áspera, características que contribuem para a diminuição da trabalhabilidade de concretos que utilizam esse material (HANSEN; NARUD, 1983; LEITE, 2001; LEVY, 1997; PIETERSEN; FRAAY; HENDRIKS, 1998; QUEBAUD *et al.*, 1999). Por esse motivo os concretos com agregados reciclados apresentam valores de abatimento muito baixos, mas possuem aspecto satisfatório quando vibrados (JADOVSKI, 2005)

Para que se mantenha a trabalhabilidade de concretos, que utilizam em sua composição o agregado reciclado, são alternativas a pré-molhagem dos agregados e a utilização de aditivos plastificantes ou superplastificantes, salientando que o uso do último aumenta o custo final do concreto e pode reduzir a vantagem econômica gerada pelo uso do agregado reciclado (QUEBAUD *et al.*, 1999).

Machado Jr. e Agnesini (2000) e Hansen e Narud (1983) apontam que existe maior coesão entre as partículas do agregado reciclado e, com isso, o menor abatimento do concreto que utiliza esse material do que a dos concretos convencionais.

Não há consenso no meio científico de qual parâmetro deve ser adotado para avaliação da trabalhabilidade do concreto com agregado reciclado: para Andrade *et al.* (1998) o *slump test* deve ser considerado na dosagem do concreto

devido à alta absorção de água pelo agregado reciclado. Para Leite (2001) o abatimento de tronco de cone (*slump test*) apresentou alta variabilidade e que deve ser dada preferência ao ensaio de tempo de vibração VeBe. Para Neville (1995) as misturas ásperas tendem ao abatimento por desmoronamento ou cisalhamento e, portanto, o *slump test* não caracteriza de forma adequada esse tipo de concreto.

2.2 REOLOGIA

2.2.1 Conceitos

Reologia é o ramo da ciência que estuda os materiais complexos, que não podem ser classificados apenas como um fluido simples como gases e líquidos, nem como um sólido elástico ideal (LEITE, 2001; REIS, 2008; TATTERSALL; BANFILL, 1983).

Embora o conhecimento de reologia venha desde o século XVII, foi apenas em 1920 que surgiu a necessidade de estudo para entendimento do comportamento mecânico de materiais industriais (TANNER, 2000). O estudo da reologia é de grande importância para a ciência dos materiais, química, física e engenharias (REIS, 2008)

E. C. Bingham definiu, em 1929, o termo reologia: sendo originado da palavra grega *rhein*, cujo significado é escorrer e corresponde ao estudo da deformação e do escoamento da matéria (MANRICH; PESSAN, 1987; TANNER, 2000; VAN DER WEGEN; HAVERKORT, 1998). Desta forma a reologia analisa as respostas do material provocadas por aplicação de tensões ou deformações ao longo do tempo (QUEVEDO, 2013; REIS, 2008; TATTERSALL; BANFILL, 1983) e tem por finalidade prever a força necessária para causar uma dada deformação ou escoamento (MANRICH; PESSAN, 1987).

Reologicamente um material pode ser caracterizado de acordo com a sua relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação (BRETAS; D'AVILA, 2000). Em função desse comportamento os fluidos podem ser caracterizados como Newtonianos e não-Newtonianos (CASTRO, 2007; OLIVEIRA, 2013; REIS, 2008).

Fluidos newtonianos são aqueles que apresentam uma relação constante entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento independente da

deformação e do tempo, ou seja, a tensão de cisalhamento é proporcional a taxa de cisalhamento e a viscosidade mantém-se constante com a variação da taxa de cisalhamento, conforme observa-se na Figura 2 (CASTRO, 2007; OLIVEIRA, 2013; REIS, 2008).

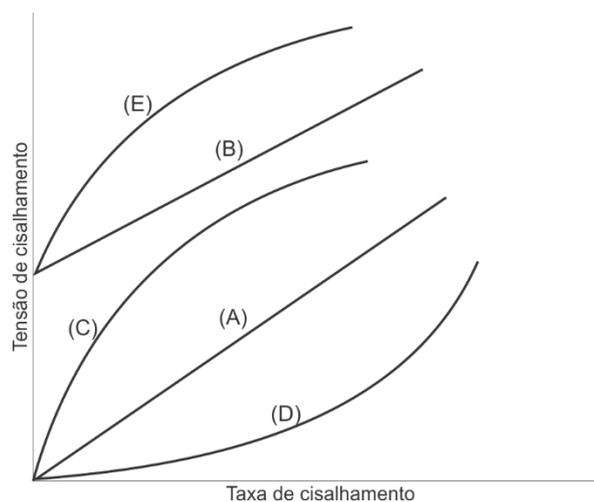


Figura 2 - Curvas de fluxo de alguns tipos de fluido (A) Newtoniano, (B) Binghamiano ou plástico ideal; (C) pseudoplástico; (D) dilatante e (E) pseudoplástico com limite de escoamento. Fonte: Adaptado de Kawatra e Bakshi (1996)

Matematicamente os fluidos Newtonianos são definidos pela Equação 2 que é conhecida como equação de Newton, sendo μ a viscosidade dinâmica absoluta que é constante, assim como a relação τ/γ (MACHADO, 2002).

$$\tau = \mu \gamma \quad (2),$$

em que, τ a tensão de cisalhamento, μ a viscosidade e γ a taxa de cisalhamento (FERREIRA *et al.*, 2005).

Os fluidos denominados não newtonianos apresentam uma relação não linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, ou seja, a viscosidade não permanece constante sob uma mesma temperatura e pressão (OLIVEIRA, 2013; REIS, 2008). Porém, depende da taxa de cisalhamento ou, de maneira mais geral, da história prévia de cisalhamento (TATTERSALL; BANFILL, 1983).

Qualquer fluido não Newtoniano pode ser representado pela Equação 3, na qual a viscosidade μ_a , variável como função de γ , é denominada de viscosidade

aparente (MACHADO, 2002), ou seja, a viscosidade que o fluido teria se fosse Newtoniano sob aquelas condições específicas de ensaio.

$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (3)$$

A Tabela 4 apresenta um quadro que resume os modelos, equações, parâmetros e número de determinações experimentais necessárias para determinação de parâmetros reológicos de fluidos não Newtonianos.

Tabela 4 - Equações, parâmetros reológicos e exemplos de fluidos não Newtonianos

Modelo	Equação	NDE*	Parâmetro	Exemplos
Newton	$\tau = \mu \dot{\gamma}$	01	Viscosidade dinâmica absoluta	Água, soluções, glicerina, mel
Bingham	$\tau = \mu_p \dot{\gamma} + \tau_l$	02	Viscosidade plástica e limite de escoamento	Dispersões coloidais concentradas
Ostwald	$\tau = K \dot{\gamma}^n$	02	Índice de consistência e índice de fluxo	Dispersões de polímeros e emulsões
Herschell-Buckley	$\tau = K \dot{\gamma}^n + \tau_0$	03	K, n e τ_0	Dispersões de polímeros e/ou argilas
Robertson-Stiff	$\tau = a (\dot{\gamma} + \dot{\gamma}_0)^b$	03	a, b e $\dot{\gamma}_0$	
Casson	$\tau^n = (\mu_\infty \dot{\gamma})^{1/2} + \tau_0^{1/2}$	02	μ_∞ e τ_0	Dispersões coloidais

*NDE: número mínimo de determinações experimentais

Fonte: (MACHADO, 2002)

Como pode ser visto na Tabela 4, para cada modelo um dos vários modelos reológicos existe uma equação que envolve parâmetros distintos, sendo aplicáveis a tipos específicos de materiais.

2.2.2 Reologia do Concreto Fresco

Segundo Ferraris (1999) e Oliveira (2013) o concreto pode ser definido como uma concentração de partículas sólidas em suspensão (agregados) em um líquido viscoso (pasta de cimento). Ainda segundo os mesmos autores a pasta de

cimento não pode ser considerada um líquido homogêneo, pois é composta de partículas de cimento e água.

Em escala macroscópica o concreto fresco flui como um líquido (FERRARIS, CHIARA F, 1999) e pode ser considerado um líquido bifásico e, desta forma, a reologia, que é voltada para estudo da deformação e fluidez da matéria, pode ser utilizada para estudar o seu comportamento (CASTRO, 2007; OLIVEIRA, 2013; REIS, 2008). O estudo das propriedades reológicas do concreto no estado fresco é de fundamental importância, principalmente durante o período no qual o concreto é lançado nas formas e, pode ser estudada em qualquer momento durante o período de hidratação do cimento (CHAPPUIS, 1990).

A investigação do comportamento reológico do concreto é difícil devido ao grande volume de material envolvido. Os dispositivos disponíveis para leituras em grande escala nem sempre são sofisticados - devido à necessidade de baixo valor, fácil transporte e manuseio para uso em campo. Outro motivo é a falta de reprodutibilidade das características das matérias-primas, fatos que acarretam em grande variabilidade nos resultados (CASTRO, 2007). Outro ponto é a dificuldade em se desenvolver equipamentos capazes de atender às superfícies mínimas de cisalhamento quando na presença de agregados graúdos (FERRARIS; GAIDIS, 1992; SAAK; JENNINGS; SHAH, 2001).

Segundo Reis (2008) e Castro (2007) o concreto necessita de uma tensão inicial para começar a fluir (tensão de escoamento inicial) e, por consequência, a curva de fluxo não atravessa a origem, fato que o caracteriza como fluido não newtoniano. Ainda segundo os autores, apesar de vários modelos já terem sido utilizados para descrever o comportamento do concreto no estado fresco a literatura é clara em apontar o modelo de Bingham como aquele que melhor descreve o comportamento deste material.

De acordo com Tanner (2000) o comportamento de um fluido Binghamiano é aquele no qual o fluido, quando em repouso, apresenta estrutura tridimensional rígida o suficiente para resistir às tensões inferiores à de escoamento. Porém, caso essa tensão seja excedida a estrutura do fluido se desintegra e passa a se comportar como um fluido newtoniano sob determinada tensão de cisalhamento. Ainda segundo o autor, quando essa tensão for reduzida a valores inferiores a tensão de escoamento a estrutura tridimensional original é recuperada.

Comportando-se o concreto, então, como fluido Binghamiano deve ser avaliado em termos de duas constantes: a tensão de escoamento e a viscosidade, sendo o primeiro parâmetro relacionado com a medida da força necessária para iniciar o movimento e o segundo com a resistência ao aumento da taxa de cisalhamento (DE LARRARD, FRANÇOIS; SEDRAN, 2002; QUEVEDO, 2013).

O concreto ainda pode se comportar como fluido tixotrópico (HU; DE LARRARD, 1996), o que pode gerar um grande aumento da tensão de escoamento durante o repouso (CASTRO, 2007).

2.2.2.1 Reologia da pasta de cimento

A pasta de cimento é responsável pela fluidez e coesão do concreto, e dessa forma, características como trabalhabilidade e outros parâmetros reológicos também são dependentes de suas características (AGULLO *et al.*, 1999; CHAPPUIS, 1990), quando se mantém constante a dimensão máxima do agregado (GHIO, 1993).

Diversos fatores influenciam as características reológicas da pasta de cimento, entre as quais a relação água/cimento, a idade da pasta, as características do cimento, as adições químicas/minerais incorporadas à mistura, o procedimento de mistura e condições de ensaio como intensidade da mistura e temperatura (CLAISSE; LORIMER; OMARI, 2001).

No concreto, a pasta de cimento pode ser considerada como lubrificante dos agregados e, desta forma, tanto a composição quanto a quantidade de pasta no influenciam a trabalhabilidade do concreto (FERRARIS; GAIDIS, 1992). Segundo Castro e Pandolfelli (2009) o estudo da pasta de cimento é de fundamental importância na dosagem do concreto, pois tem influência direta nas características reológicas da argamassa e do próprio concreto no estado fresco. Porém, e no meio científico ainda não está definida uma conexão entre a reologia do concreto e da pasta de cimento (TATTERSALL; BANFILL, 1983), uma vez que as propriedades reológicas destas misturas são complexas em diferentes aspectos e, o comportamento de uma nem sempre prediz o da outra (FERRARIS; GAIDIS, 1992).

Para que pastas de cimento escoem é necessária uma força de cisalhamento suficientemente intensa para quebrar as ligações entre partículas de cimento e iniciar o escoamento (REIS, 2008).

Castro (2007) ressalta que o sistema da pasta de cimento é muito complexo e pode apresentar diversos comportamento reológicos dependendo das condições de ensaio, da pasta, de dispersão e de cisalhamento. Para Ferraris *et al.* (2001), o escoamento da pasta de cimento é semelhante a um fluido newtoniano ou binghamiano, dependendo da composição. Segundo os autores, uma pasta não floculada pode apresentar uma tensão de escoamento próxima à zero, ou seja, comportar-se como um fluido newtoniano.

Quando as partículas de cimento entram em contato com a água elas tendem a flocular e, dependendo da quantidade de água, esse comportamento fica mais evidenciado, influenciando no comportamento reológico da pasta de cimento (BERTOLUCCI, 2010).

A pasta de cimento recém misturada pode apresentar um comportamento tixotrópico quando existem forças de atração entre as partículas, formando uma estrutura interna na pasta, o que lhe confere pouca fluidez, porém quando a mistura é agitada essa estrutura se desfaz e ocorre a fluidificação (CHAPPUIS, 1990).

As condições em que ocorre o experimento, tal como: tempo e intensidade da mistura, duração do ciclo, número de repetições e geometria da amostra, tem grande influência na determinação de parâmetros reológicos, podendo aparecer diferenças grosseiras nos resultados e, em alguns casos, até contraditórios (ATZENI; MASSIDDA; SANNA, 1985). Logo é de fundamental importância que se siga condições padronizadas de ensaio para contribuir no entendimento da reologia das pastas de cimento.

2.2.2.2 Reologia da argamassa

Segundo Rago e Cincotto (1999), Costa *et al.* (2010) e Reis (2008) a argamassa pode ser considerada como uma dispersão de agregados numa matriz de partículas finas e, desta forma, as características reológicas estão relacionadas a dimensão, forma e distribuição granulométrica do agregado, as características

físicas e químicas da pasta, a interação com a água de amassamento e a utilização de aditivos.

As propriedades da argamassa no estado fresco que influenciam as características reológicas são a coesão (capacidade de manter seus constituintes homogêneos e sem segregação), tixotropia, plasticidade (propriedade que permite que a argamassa se deforme e absorva certas deformações após a redução das tensões impostas), consistência (fluidez de uma argamassa fresca), e trabalhabilidade (DO Ó, 2004). A trabalhabilidade é a principal característica quando se estuda a reologia de argamassas, pois é o resultado visível das características de plasticidade, coesão, consistência, viscosidade, adesão e densidade (YOSHIDA; BARROS, 1995). O estudo dessas propriedades é importante, pois caso não sejam não satisfatórias no estado fresco é pouco provável que as características desejadas no estado endurecido sejam alcançadas (BANFILL, 2005).

Por serem suspensões ativas, a consistência é modificada ao longo do tempo, principalmente pela atuação do cimento (COSTA *et al.*, 2010; HU; DE LARRARD, 1996).

Aditivos superplastificantes influenciam na fluidez da argamassa, aumentando a trabalhabilidade, mas a dosagem deve ser criteriosa pois o excesso aumenta a fluidez (OLIVEIRA, 2013).

Normalmente a argamassa apresenta comportamento de fluido não newtoniano e, dependendo da composição da argamassa, os modelos reológicos atribuídos ao comportamento são os de Bingham e de Herschel-Bulkley (OLIVEIRA, 2013; REIS, 2008).

2.2.2.3 Fatores que influenciam no comportamento reológico do concreto

O comportamento reológico do concreto no estado fresco é muito complexo devido a fatores como composição e mudança das propriedades ao longo do tempo (CASTRO, 2007; OLIVEIRA, 2013; TATTERSALL, 1991).

Suspensões são consideradas misturas sólido/líquido formadas por um conjunto de partículas distribuídas de forma relativamente uniforme em um líquido, sem que haja dissolução do material particulado ao longo do tempo (OLIVEIRA. *et*

al., 2000). O concreto pode ser considerado uma suspensão concentrada, com concentração de sólidos maior que 50% do volume do material (OKAMURA; OUCHI, 2003).

Segundo Oliveira *et al.* (2000) devido a esse fato o concreto depende de fatores como concentração volumétrica de sólidos, características do meio líquido, temperatura, características físicas das partículas e a interação entre elas. Ainda segundo os autores, quando agentes dispersantes são incorporados, o comportamento do concreto torna-se ainda mais complexo e passa a sofrer influência de outros fatores como, a concentração de moléculas dispersantes no meio líquido, o peso molecular, a concentração espacial da molécula dispersante e a espessura de sua camada adsorvida em torno das partículas.

Desta forma, dependendo das particularidades de cada concreto e da taxa de cisalhamento aplicada, um ou mais fatores podem prevalecer na influência do comportamento reológico (CASTRO, 2007; QUEVEDO, 2013).

Ainda levando-se em consideração o comportamento do concreto como suspensão densa de partículas, três efeitos podem influenciar o comportamento reológico, quais sejam, os agregados, a segregação e a atividade química (DE LARRARD *et al.*, 1996), como descrito a seguir:

- o agregado pode ser poroso e ser preparado como um agregado não saturado e, no momento em que este entra em contato com a pasta de cimento tende a absorver água para atingir a saturação, aumentando a tensão de escoamento e a viscosidade.
- o concreto homogêneo após uma mistura eficiente pode segregar quando em repouso, por ação da gravidade quando a fração de agregado gráudo não está bem proporcional ou, quando sob vibração ou sob cisalhamento;
- Em terceiro pela existência de alguma atividade química anormal do concreto, quando a tensão de escoamento aumenta e a viscosidade permanece praticamente inalterada.

De acordo com as considerações apresentadas acima, De Larrard *et al.* (1996) sintetizaram os resultados na Tabela 5 para interpretar as mudanças de comportamento reológico do concreto.

Tabela 5 - Evolução dos parâmetros reológicos durante a utilização do concreto fresco.

Caso	Tensão de escoamento	Viscosidade	Abatimento	Superfície da amostra	Interpretação	Correção do problema
I	→	→	→	-	Mistura estável	-
II	↑	→	↓	-	Atividade química	Adição de um retardador de pega ou mudança do sistema cimento/Superplastificante
III	↑	↑	↓	-	Absorção de água	Agregados pré-saturados
IV	↓	→/↓	→/↓	Ascendência de agregado graúdo	Segregação entre a argamassa e o agregado graúdo	Mudança da granulometria do agregado ou adição de um agente de viscosidade

Obs.: as setas indicam o aumento (↑), a redução (↓) ou a manutenção (→) do valor do parâmetro medido (tensão de escoamento, viscosidade e abatimento) ao longo do tempo.

Fonte: Adaptado de Castro (2007)

Segundo Castro *et al.* (2009) e Quevedo (2013) os vários fatores que compõe a mistura do concreto influenciam suas propriedades reológicas do estado fresco e podem mudar as características mesmo quando possuírem a mesma composição.

Para Banfill (2005) os valores de tensão de escoamento e viscosidade diminuem com o aumento da energia da mistura. Ainda segundo o autor, deve-se considerar os seguintes fatores secundários que podem alterar as características reológicas do concreto no estado fresco: tipo de misturador, sequência de mistura, duração da mistura e temperatura.

2.2.2.4 Empacotamento de partículas

O estudo de empacotamento de partículas tem grande influência no comportamento reológico do concreto devido a relação direta entre fluidez e a granulometria do material (REIS, 2008). O interesse pelo empacotamento de partículas vem aumentando nos últimos anos em diferentes áreas da engenharia e isso se deve ao fato de que uma grande parte dos materiais possuírem partículas de diferentes tamanhos. Desta forma, o comportamento destes materiais depende parcialmente das propriedades das partes que os compõem e da interação entre elas (STROEVEN; STROEVEN, 1999).

O empacotamento pode ser representado quantitativamente em função da densidade de empacotamento, a qual pode ser definida como o volume de sólidos em uma unidade de volume (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

O comportamento de suspensões de concreto dependem principalmente de características físicas como distribuição granulométrica, índice de forma e textura superficial das partículas (BONEN; SARKAR, 1995). Desta forma, o estudo da distribuição de tamanho de partículas é de fundamental importância, pois promove o empacotamento e, com isso, define as características reológicas do material no estado fresco (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011)

Diversos fatores podem alterar o empacotamento de um conjunto de partículas: a existência de diversas distribuições granulométricas, morfologia, tamanho e porosidade das partículas (OLIVEIRA *et al.*, 2000). Segundo Oliveira *et al.* (2000) empacotamentos com menor porosidade podem ser obtidos quando os vazios entre as partículas existentes são preenchidos por partículas menores que os mesmos.

Assim, a quantidade e o tipo de agregado desempenham papel importante nas características reológicas do concreto fresco, aumentando tanto a viscosidade quanto a tensão de escoamento (CASTRO, 2007). Uma distribuição granulométrica adequada do aglomerante e o efeito lubrificante das partículas finas reduzem o imbricamento entre os agregados e melhoram o escoamento. Em síntese, um empacotamento ótimo das partículas pode melhorar o comportamento no escoamento do concreto (NEHDI; MINDESS; AİTCIN, 1998)

Na Figura 3 é possível observar o efeito da quantidade e tamanho das partículas na eficiência do empacotamento.

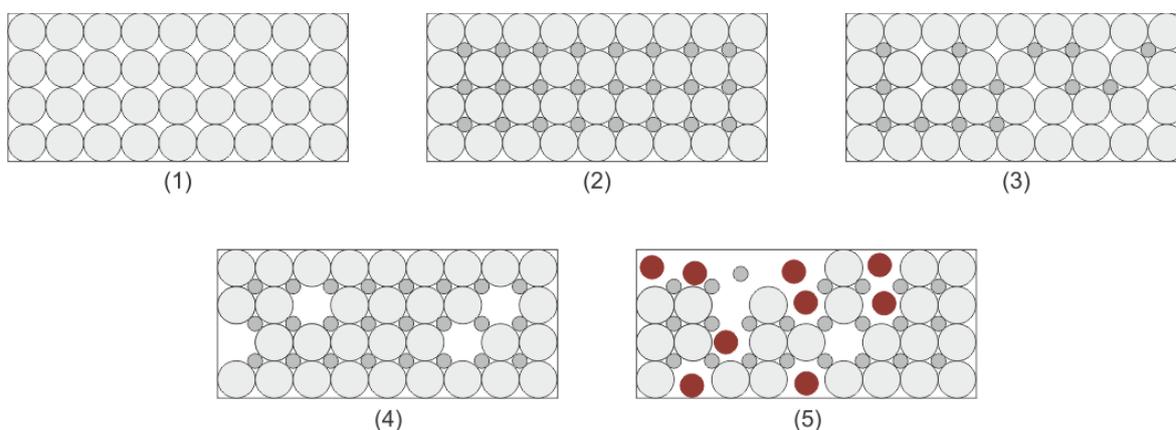


Figura 3 - Efeito da quantidade e do tamanho de partículas na eficiência de empacotamento: (1) mínima densidade de empacotamento; (2) máxima densidade de empacotamento; (3) deficiência de partículas pequenas; (4) deficiência de partículas grandes; (5) distribuição inadequada de tamanhos de partículas.

Fonte: Roy *et al.* (1993)

Segundo Castro *et al.* (2009), concretos dosados com base nos conceitos de empacotamento e dispersão de partículas, apresentam propriedades superiores garantindo a manutenção da trabalhabilidade por um período mais longo de tempo e melhor desempenho mecânico aos 28 dias.

Segundo os autores, o melhor desempenho mecânico é resultado da presença de agregados com menor dimensão aliado a melhor distribuição dos tamanhos das partículas.

Quando se aplica o empacotamento de agregados graúdos ocorrem melhorias na: resistência a compressão, rigidez, fluência, retração por secagem, permeabilidade e, redução na segregação, caso o alto empacotamento seja acompanhado de granulometria contínua e com menores diferenças de tamanho entre as faixas granulométricas das partículas (JOHANSEN; ANDERSEN, 1991).

Segundo Oliveira *et al.* (2000) *apud* Trigo (2012) outros fatores alteram o empacotamento de partículas, além da distribuição granulométrica. A morfologia das partículas, a medida em que se afasta da forma esférica, afeta o empacotamento: quanto mais alongada for a partícula, menor a densidade de empacotamento. Outro fator que interfere é o efeito de parede: quando as partículas pequenas, em alta quantidade, estiverem adjacentes aos agregados de grande tamanho e puderem ser consideradas como superfícies planas, fato que também ocorre em regiões próximas à forma e à armadura. Ainda segundo os autores, a maneira em que as partículas são dispostas também interfere no empacotamento, sendo que as partículas dispostas aleatoriamente e submetidas a vibração acarretam maior empacotamento. O estado de dispersão das partículas também é importante, principalmente em misturas com partículas finas com tendência a flocular. Outro fator importante é a porosidade interna das partículas, sendo recomendada para maior empacotamento de partículas densas, com menor porosidade possível.

2.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE MATERIAIS À BASE DE CIMENTO

2.3.1 Conceitos

Existem diversos ensaios laboratoriais que caracterizam o comportamento reológico de materiais à base de cimento no estado fresco podendo ser divididos em dois grupos: ensaios que medem apenas um parâmetro e ensaios que medem dois parâmetros reológicos (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011; OLIVEIRA, 2013).

Os ensaios de um parâmetro medem apenas um ponto da curva força x deslocamento (*flow curve*) e, por esse motivo, fornecem uma descrição incompleta das propriedades do material. Quanto aos ensaios de mais de um parâmetro fornecem vários pontos da curva e desta forma fornecem uma caracterização mais completa da reologia do concreto (KOEHLER; FOWLER, 2003).

Na sequência são apresentados alguns dos métodos de ensaio que visam caracterizar o concreto no estado fresco, dando ênfase àqueles que serão utilizados na presente pesquisa.

2.3.1.1 Ensaio que medem um parâmetro reológico

Os ensaios que medem apenas um parâmetro reológico são os mais usuais e refletem a resposta a uma taxa de cisalhamento em particular (QUEVEDO, 2013). Estabelecer uma relação entre o parâmetro medido nesses ensaios e um segundo não é uma tarefa simples e, na maioria das vezes, é impossível calcular o parâmetro fundamental a partir do resultado obtido, podendo-se apenas garantir certa correlação entre eles (CASTRO, 2007). A utilização dessa classe de ensaios é válida visto que, mesmo não sendo tão precisas quanto a de dois parâmetros, são de fácil execução, baixo custo e permitem uma avaliação rápida do concreto (QUEVEDO, 2013).

No quadro abaixo estão descritos os ensaios de um parâmetro existentes para concreto, compilados da literatura.

Quadro 1 - Ensaio de um parâmetro reológico para concreto

Ensaio de um parâmetro reológico	
Angles Flow Box Test	Mixer Devices
Compaction Factor Test	Moving Sphere Viscometer
Compaction Test	Powers Remolding Test
Cone Penetration Test	Proctor Test
Delivery-Chute Depth Meter	Ring Penetration Test
Delivery-Chute Torque Meter	Settlement Column Segregation Test
Flow Table Test (DIN)	Slump Test
Flow Trough Test	Soil Direct Shear Test
Free Orifice (Orimet) Test	Soil Triaxial Test
Fresh Concrete Tester 101	Surface Settlement Test
Intensive Compaction Test	Thaulow Tester
Inverted Slump Cone Test	Trowel Test
K-Slump Tester	Vebe Consistometer
Kango Hammer Test	Vibratory Flow Meter
Kelly Ball Test	Vibropenetrator
LCL Flow Test	Wigmore Consistometer

Fonte: Koehler e Fowler (2003)

2.3.1.1.1. Ensaio de abatimento do tronco de cone

Ensaio amplamente utilizado em campo devido a facilidade de execução, sendo capaz de detectar pequenas mudanças na composição do concreto a partir de sua especificação original (CASTRO, 2007; REIS, 2008). Porém, pode fornecer diferentes respostas para uma mesma amostra de concreto bem como pode fornecer resultados de abatimento semelhantes para amostras de concreto com trabalhabilidades distintas (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011; DAY, 1996). Destaca-se ainda que este ensaio não é capaz de verificar diferenças de trabalhabilidades em concretos com trabalhabilidade muito baixa, ou seja, *slumps* próximos a zero, nem naqueles que apresentam trabalhabilidade muito alta (CASTRO, 2007; REIS, 2008).

Com base nessas características, Castro *et al.* (2011) afirmam que a avaliação reológica do concreto com base apenas no resultados do ensaio de abatimento do tronco de cono é extremamente difícil, senão impossível. O ensaio de abatimento de tronco de cone é regulamentado pela norma NBR NM 67 (ABNT, 1998).

2.3.1.1.2. Fator de preservação de forma

A capacidade de uma mistura de concreto no estado fresco manter a sua forma pode ser medida pelo fator de preservação de forma (FPF). Esse fator é determinado pela razão entre a área da seção do concreto antes e após o ensaio de abatimento da mesa de Graff. De acordo com Hoornahad e Koenders (2014) esse ensaio também é capaz de avaliar a capacidade de preservação de forma de um concreto no estado fresco.

Segundo Hoornahad (2014), os fatores de preservação de forma de concretos podem ser divididos em cinco categorias, de acordo com o exposto na Tabela 6. As misturas de concreto com FPF próximos a 1,0 praticamente não apresentam deformação, categoria que enquadra os concretos *no slump*.

Para concretos com $FPF > 0,7$ é necessária energia externa para uma compactação eficiente. Concretos muito fluidos e com baixa capacidade de manutenção de forma apresentam fator de preservação de forma igual ou abaixo de 0,4.

Tabela 6 - Relação entre os tipos de concreto e o fator de preservação de forma (FPF)

Tipo de concreto	Fator de preservação de forma (FPF)	Características da mistura	
		Capacidade de manter a forma	Energia externa para compactação
Concreto <i>no slump</i>	$FPF \approx 1,0$	Excelente	Sim
	$0,7 < FPF < 1,0$	Muito alta	Sim
Concreto autoadensável com alta preservação de forma	$FPF \approx 0,7$	Alta	Não
	$0,4 < FPF < 0,7$	Média	Não
Concreto auto adensável	$FPF \leq 0,4$	Baixa	Não

Fonte: Adaptado de Hoornahad e Koenders (2014)

2.3.1.2 Ensaio que medem dois parâmetros reológicos

Segundo Ferraris (1999), a importância de se medir tanto a tensão de escoamento quanto a viscosidade plástica de um material vem do fato de que dois materiais distintos podem ter um dos parâmetros com o mesmo valor, enquanto o

outro apresenta valor diferente, fato que impõe aos dois materiais comportamentos reológicos diferentes, conforme apresentado na Figura 4. Desta forma, os ensaios que medem dois parâmetros reológicos têm a capacidade de caracterizar materiais que poderiam, erroneamente, ser considerados idênticos pelo ensaio de um parâmetro (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011).

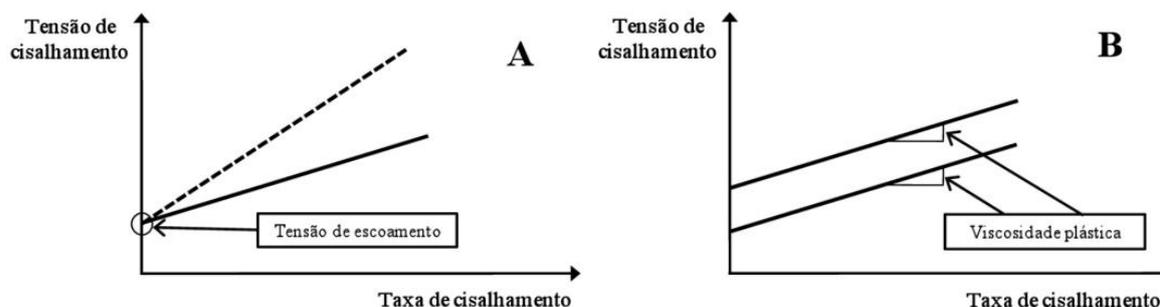


Figura 4 - Reologia do concreto: (A) mesma tensão de cisalhamento e diferentes viscosidades; (B) mesma viscosidade e diferentes tensões de cisalhamento
 Fonte: Ferraris (1999) *apud* Castro et al. (2011)

Existem ensaios capazes de fornecer até dois parâmetros reológicos que caracterizam o comportamento do concreto no estado fresco, porém a dimensão máxima das partículas causam alguns problemas à avaliação reológica (CASTRO, 2007). No caso de pastas de cimento a curva de cisalhamento pode ser obtida em um reômetro com um espaçamento de poucos milímetros das superfícies cisalhantes (DOMONE; YONGMO; BANFILL, 1999). Porém, a avaliação reológica de concretos tem encontrado dificuldades operacionais, uma vez que há dificuldade em desenvolver ensaios e equipamentos de caracterização reológica devido à dimensão máxima característica do agregado graúdo, além da tendência à segregação pela influência do tempo (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011; FERRARIS, 1999).

2.3.1.2.1. Squeeze-flow

A reometria por *squeeze-flow* consiste em comprimir uma amostra de material entre duas placas paralelas e medir a força necessária para a compressão uniaxial da amostra, podendo ser realizado em equipamentos tipo máquina universal de ensaios (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2005).

Segundo Cardoso; Pileggi e John (2010) este ensaio é especialmente adequado para materiais aplicados na construção civil, pois, além de possuir a capacidade de avaliar materiais de qualquer consistência, a mudança geométrica que ocorre durante o ensaio simula condições de aplicação destes materiais como nas etapas de nivelamento, espalhamento e acabamento. Ainda segundo os autores, este ensaio é adequado para uso na avaliação do concreto, pois este material é composto de argamassa e agregados graúdos, e a argamassa do concreto é constantemente comprimida e cisalhada entre os agregados durante o processamento no estado fresco.

Este ensaio pode ser realizado controlando-se a força aplicada ou o deslocamento. Na primeira opção é aplicada uma determinada força e, então, realiza-se a medida a deformação, enquanto na segunda opção o material ensaiado é submetido a um deslocamento com velocidade constante e a força é medida (ENGMANN; SERVAIS; BURBIDGE, 2005).

O ensaio consiste em aplicar compressão por meio de uma punção (placa superior) de diâmetro igual ao da amostra, sobre uma placa com diâmetro no mínimo duas vezes maior do que o da placa de punção. Nesta configuração a área solicitada permanece igual, sendo o espalhamento do material dado fora da área da punção. Existem ainda outras configurações possíveis como diâmetros iguais entre placa inferior e superior e amostra com diâmetro menor que o das placas (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2005; ENGMANN; SERVAIS; BURBIDGE, 2005; MIN; ERWIN; JENNINGS, 1994).

O perfil típico de um resultado obtido em ensaio de *squeeze-flow* com controle por deslocamento expresso em forma de gráfico tipo carga vs deslocamento apresenta três regiões bem definidas, conforme a Figura 5.

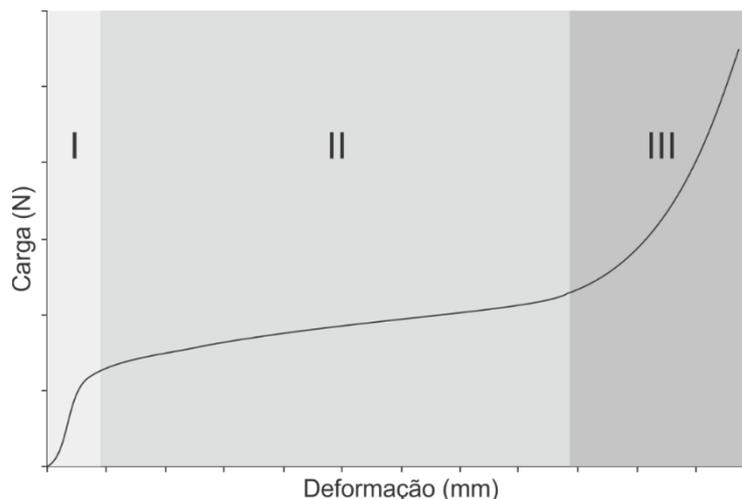


Figura 5 - Perfil típico de carga vs. deslocamento de um ensaio de squeeze-flow
Fonte: Cardoso, Pileggi e John (2005)

No estágio I em pequenas deformações, o material apresenta comportamento de sólido, apresentando, desta forma, deformação elástica linear. Um composto cimentício com grande parcela de deslocamento neste estágio, poderá apresentar problemas de fissuração no estado fresco, devido à recuperação elástica (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2005).

No segundo estágio, com deslocamentos médios, a compressão aplicada resulta em deformação radial elongacional e de cisalhamento. Essa compressão supera as forças que mantinham o material sob comportamento elástico. Desta forma, o material flui por deformação plástica e/ou viscosa sendo capaz de sofrer grandes deformações sem aumento significativo da força necessária para o deslocamento (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2010).

No terceiro e último estágio, em grandes deformações, ocorre um aumento expressivo da carga necessária para dar continuidade à deformação do material. A aproximação dos constituintes de um sistema submetido a grandes deformações gera forças restritivas ao fluxo e, desta forma, as forças de atrito passam a ser predominantes nessa situação (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2010).

As faixas de deformação e intensidade dos estágios varia de acordo com a composição dos materiais e configuração de ensaio utilizada.

Existem diversos modelos para cálculo da viscosidade e tensão de escoamento já estabelecidos, contudo resultados em forma de curvas de carga vs deslocamento e carga vs tempo são suficientes para interpretação e compreensão

da natureza reológica dos materiais estudados (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2005).

Este ensaio é normatizado pela NBR 15839 (ABNT, 2010), porém outras configurações podem ser utilizadas, conforme exposto por Cardoso; Pileggi e John, (2010) em seu manual de utilização.

2.3.1.3 Classificação com base no tipo de escoamento

Os ensaios que medem a trabalhabilidade do concreto podem ser classificados conforme o tipo de fluxo que acontece durante o teste.

A classificação proposta pelo Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (*National Institute of Standards and Technology* - NIST) divide os ensaios reológicos em quatro categorias listadas no Quadro 2.

Quadro 2 - Classificação testes reológicos segundo a NIST

Categoria	Definição
Escoamento confinado (<i>Confined Flow Tests</i>)	O material escoa pelo devido ao peso próprio ou pela pressão aplicada por um orifício estreito.
Escoamento livre (<i>Free Flow Tests</i>)	O material também flui pelo peso próprio, sem nenhum confinamento ou então, um objeto penetra o material por decantação gravitacional
Teste de vibração (<i>Vibration Tests</i>)	O material escoa sob a influência de vibração que pode ser aplicada por meio de uma mesa vibratória, batendo a base do molde, com um vibrador externo ou interno.
Reômetros rotacionais (<i>Rotational Rheometers</i>)	O material é cisalhado entre duas superfícies paralelas, sendo uma ou as duas estando em movimento rotacional.

Fonte: Adaptado de Hackley e Ferraris (2001) *apud* Koehler e Fowler (2003)

Os ensaios de escoamento confinado, testes de vibração e escoamento livre tendem a simular as condições do concreto em campo e, determinam a trabalhabilidade em parâmetros quantitativos empíricos, enquanto os reômetros rotacionais aplicam os conceitos dos reômetros tradicionais ao concreto e determinam o comportamento reológico em grandezas físicas fundamentais (KOEHLER; FOWLER, 2003; TATTERSALL; BANFILL, 1983).

Alguns dos ensaios existentes, como aqueles aplicados aos concretos de *slump* muito baixos, não se encaixam em nenhuma dessas quatro categorias, porém os resultados desses testes fornecem informações importantes sobre o comportamento do concreto no estado fresco. No Quadro 3 são apresentados os ensaios classificados conforme o NIST e os que não se encaixam em nenhuma das quatro categorias, ambos expostos em grupos separados (KOEHLER; FOWLER, 2003).

Quadro 3 - Classificação dos ensaios reológicos para concreto

Ensaio para concreto	Ensaio para concreto autoadensável	Ensaio para pastas e argamassas
<u>Escoamento confinado</u> -Compaction Factor Test -Free Orifice (Orimet) Test -K-Slump Tester	<u>Reômetros rotacionais</u> -Berta Apparatus -BML Viscometer -BTRHEOM Rheometer -CEMAGREF-IMG -FHPCM -Fresh Concrete Tester 101 -IBB Rheometer -Mixer Devices -Powers and Wiler Plastometer -Soil Direct Shear Test -Tattersall Two-Point Device	
<u>Escoamento livre</u> -Cone Penetration Test -Delivery-Chute Depth Meter -Delivery-Chute Torque Meter -Flow Trough Test -Kelly Ball Test -Modified Slump Test -Moving Sphere -Viscometer -Ring Penetration Test -Slump Rate Machine (SLRM) -Slump Test -Surface Settlement Test	<u>Testes em concretos de baixa trabalhabilidade</u> -Intensive Compaction Test -Kango Hammer Test -Proctor Test	<u>Escoamento confinado</u> -Fill-Box Test -L-Box Test -U-Box Test -V-Funnel Test
<u>Teste de vibração</u> -Angles Flow Box Test -Compaction Test -Flow Table Test (DIN) -Inverted Slump Cone Test -LCL Flow Test -Powers Remolding Test -Settlement Column Segregation Test -Thaulow Tester -Vebe Consistometer -Vertical Pipe Apparatus -Vibrating Slope Apparatus -Vibropenetrator -Wigmore Consistometer -Vibratory Flow Meter	<u>Outros métodos</u> -Multiple Single-Point Tests -Soil Triaxial Test -System and Method for Controlling Concrete Production -Trowel Test	-Flow Cone Test -Miniflow Test -Minislump Test -Turning Tube Viscometer -Vicat Needle Test -ViscoCorder -Wuerpel Device
	<u>Testes de estabilidade</u> -Penetration Test for Segregation -Wet Sieving Stability Test	

Fonte: Koehler e Fowler (2003)

2.4 CONCRETO NO SLUMP

Segundo o *American Concrete Institute* (ACI 116R-90, 2000; ACI 211.3R-02, 2002) o concreto *no slump* é definido como aquele que possui *slump* de 0 a 25 mm. Diferencia-se do concreto *slump* zero ou concreto seco pois este, além de não

apresentar *slump* após a retirada do cone, apresenta consistência rígida e extremamente seca, diferente do concreto *no slump*, que pode apresentar aspecto mais úmido. Há ainda, nessa categoria, o concreto *negative-slump*, definido pelo *American Concrete Institute* como concreto que não apresenta abatimento no *slump test*, e que ainda apresenta zero queda após adição de água.

O concreto *no slump* é um concreto com baixa porcentagem de pasta e grande volume de agregado, conforme Figura 6 e Tabela 7.

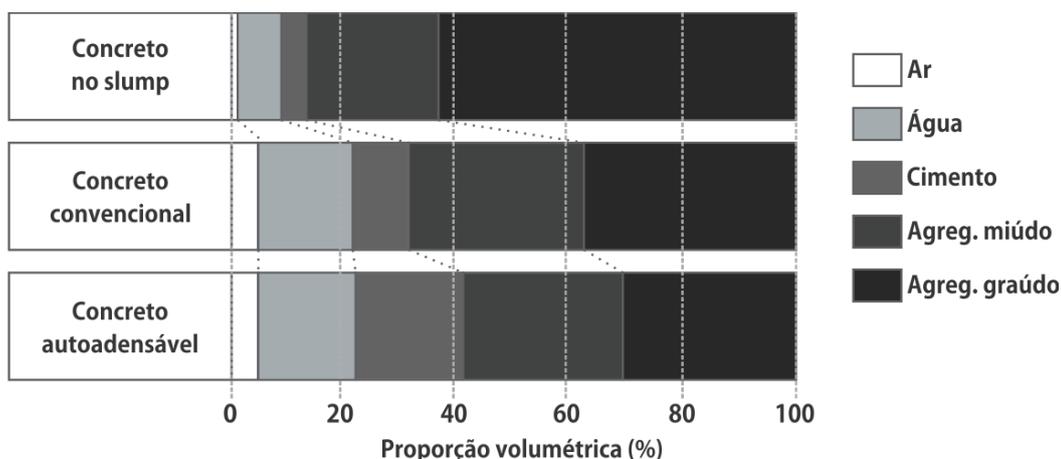


Figura 6 - Comparação entre proporções da mistura de um concreto *no slump*, concreto convencional e concreto autoadensável
Fonte: Adaptado de Okamura e Ouchi (2003)

Tabela 7 - Proporções típicas da composição de diferentes tipos de concreto

Componente	Concreto autoadensável	Concreto convencional	Concreto <i>no slump</i>
Agregado graúdo	30 - 34%	37 - 42%	48 - 60%
Agregado miúdo	26 - 36%	26 - 33%	13 - 29%
Volume de pasta	34 - 40%	30 - 32%	23 - 37%
Volume de água	15,5 - mais de 20%	19 - 20%	13 - 17%
Água/materiais secos	0,8 - 1,2	1,7	1,7

Fonte: Hoornahad (2014)

Os agregados, que geralmente representam entre 80 a 85% do volume total do concreto *no slump*, exercem influência importante nas propriedades tanto no estado fresco como no estado endurecido deste material (OKAMURA; OUCHI, 2003). Desta forma, e com o exposto na Figura 6 e Tabela 7, fica claro que o comportamento reológico do concreto está intrinsecamente relacionado com as proporções de sua mistura (HOORNAHAD, HOOMAN, 2014).

A mistura do concreto *no slump* é geralmente mais seca e seu proporcionamento é feito com o mínimo de pasta necessária para preencher os espaços entre os agregados. Na Figura 7 é possível comparar o volume de água utilizada em um concreto convencional em comparação com o concreto *no slump*.

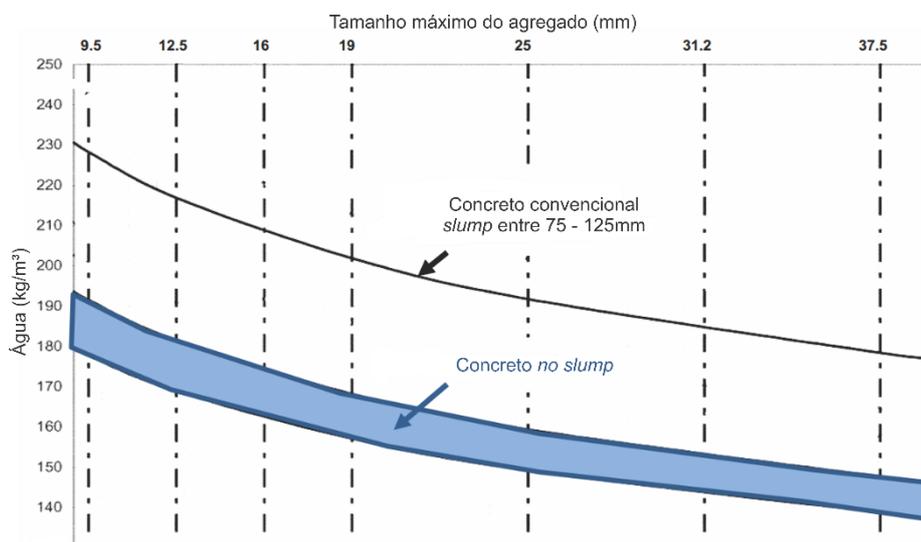


Figura 7 - Comparação entre quantidade de água necessária para concreto convencional e concreto *no slump*

Fonte: ACI 211.3R-02 (2002) adaptado de Hoornahad (2014)

O concreto *no slump* é mais comumente utilizado para produção de artefatos de concreto como tubos, *paver*, blocos de concreto, meios-fios, telhas, entre outros, uma vez que há necessidade de se remover essas peças imediatamente da forma, visando minimizar o tempo de produção (HÜSKEN; BROUWERS, 2012; SOBHANI *et al.*, 2010).

O concreto *no slump* no estado fresco possui consistência rígida e é caracterizado pela baixa quantidade de água na composição (HÜSKEN; BROUWERS, 2012). Esse tipo de concreto tem baixa trabalhabilidade, se moldado manualmente porém, quando usada vibração aumenta a trabalhabilidade (ACI 211.3R-02, 2002; CANNON, 1982).

Desta forma, em contraste com o concreto convencional (*slump* maior que 25 mm), o concreto *no slump* permite a retirada imediata da forma após enchimento e vibração (STUTECH, 2005). A essa característica dá-se o nome de *green-strength* ou *high shape holding ability*, e é definida como a capacidade do concreto no estado fresco manter o formato, até que se iniciem as reações de hidratação

(BORNEMANN, 2005). Essa característica permite a utilização eficiente de moldes e máquinas de extrusão (HOORNAHAD, HOOMAN, 2014; HÜSKEN; BROUWERS, 2012) e pode ser observada na Figura 8.

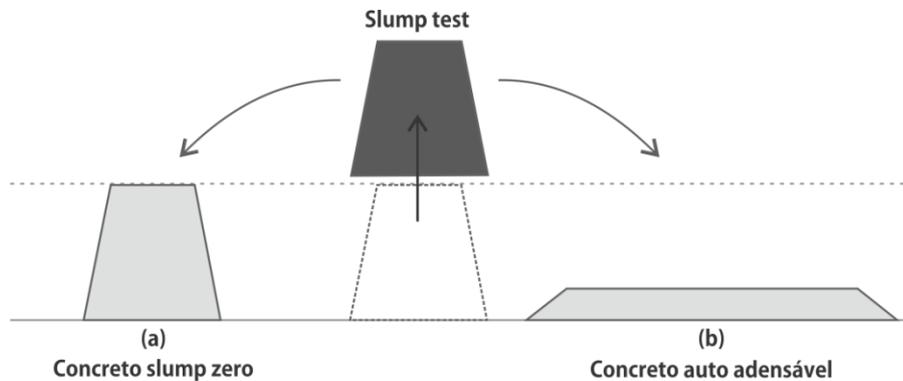


Figura 8 - Comparação entre concreto *no slump* e concreto auto adensável após desmolde: (a) concreto *slump*-zero praticamente sem deformação e (b) concreto autoadensável com alto grau de trabalhabilidade. Fonte: Hoornahad (2014)

2.4.1 Medidas de Distância entre Partículas

No ano de 1918, D. A. Abrams propôs uma teoria de dosagem de concreto relacionando a razão entre água e cimento e a proporção de agregados graúdos e, cerca de 20 anos depois, Kennedy propôs a teoria do excesso de pasta - *Excess Paste Theory*, que foi crucial para o entendimento do mecanismo da trabalhabilidade do concreto no estado fresco (OH; NOGUCHI; TOMOSAWA, 1999). Dentre os modelos de distância entre partículas mais utilizados estão camada de excesso de pasta (δp_{ex}), espaço interpartícula (IPS - *Inter Particle Spacing*) e espessura máxima de pasta (MPT - *Maximum Paste Thickness*).

2.4.1.1 Teoria do excesso de pasta

A teoria do excesso de pasta explica que para o concreto atingir determinada trabalhabilidade é necessário haver pasta de cimento suficiente para cobrir toda a superfície dos agregados, minimizando assim o atrito (OH; NOGUCHI; TOMOSAWA, 1999).

As informações e equações acerca da teoria do excesso de pasta constantes nessa pesquisa foram baseadas nos estudos realizados por Hoornahad (2014) e Oh *et al.* (1999).

Nesta teoria o concreto é considerado um sistema descontínuo representado por um modelo de duas fases: agregado e pasta. A pasta consiste de partículas finas dispersas em água. De forma geral as partículas finas da pasta são o cimento e partículas passantes da peneira # 0,150 mm.

Na Figura 9 (a) pode-se observar os agregados próximos e em contato, com a presença de vazios interpartículas. Ao adicionar a esse sistema a fase pasta, os agregados antes em contato passam a ficar separados por um filme de pasta ao redor deles, como representado na Figura 9(b). Pode-se observar também que os vazios foram preenchidos por pasta.

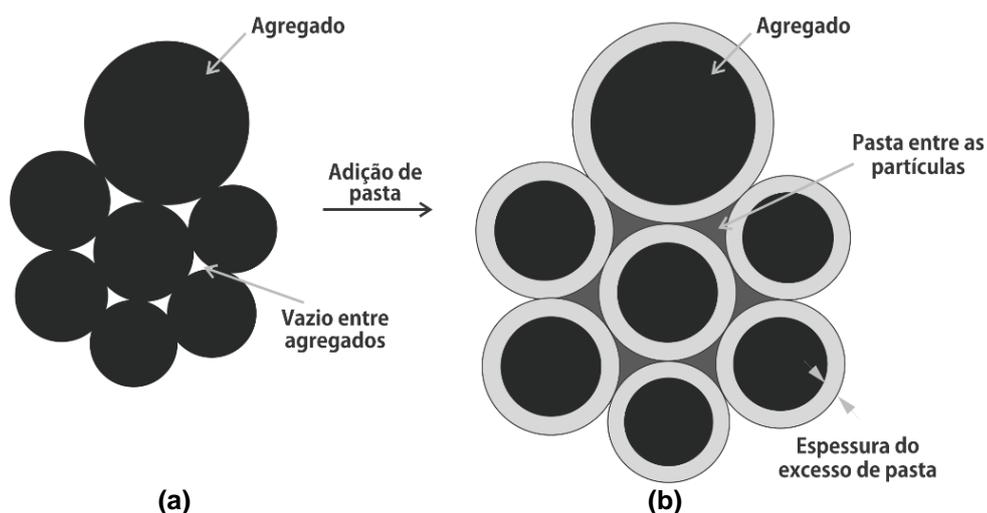


Figura 9 - Partículas próximas e envoltas por filme de pasta
Fonte: Adaptado de Oh *et al.* (1999)

Conforme demonstrado na Figura 9, a adição de pasta de cimento altera a interação entre os agregados, pois- quanto maior o volume de pasta mais os agregados são afastados uns dos outros. Sem o filme de pasta ao redor dos agregados o movimento destas partículas gera atrito e a trabalhabilidade é reduzida. Na Figura 10 são apresentadas as classes relacionadas aos percentuais de excesso de pasta.

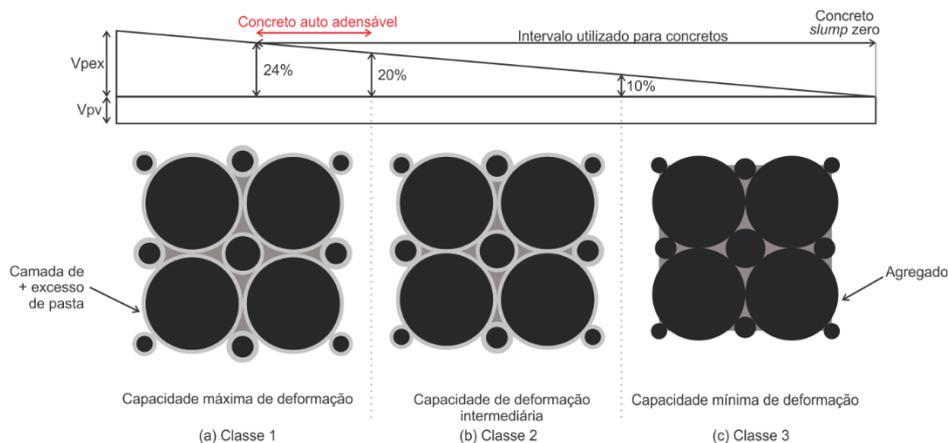


Figura 10 - Relação entre capacidade de deformação e volume de excesso de pasta
Fonte: Hoornahad (2014)

A Classe 1, apresentada na Figura 10 acima, representa concretos com elevado grau de excesso de pasta, sendo que as partículas dos agregados são completamente afastadas pela camada de pasta em excesso. A Classe 2 apresenta grau intermediário de excesso de pasta e as partículas desse material não são completamente afastadas pela camada de excesso de pasta. A Classe 3 representa um concreto com baixo grau de excesso de pasta e, neste caso, as partículas dos agregados estão em contato direto e são mantidas unidas pela pasta que preenche os espaços vazios entre os agregados (HOORNAHAD, HOOMAN, 2014).

Para o cálculo do excesso de pasta é considerado o índice de vazios dos agregados (densidade de empacotamento das partículas), ou seja, o vazio deixado entre as partículas. Isso pode ser calculado pela Equação 4:

$$\zeta = \frac{m_b}{m_a} \leq 1 \quad (4),$$

em que m_b é a massa unitária dos agregados, incluindo os vazios e, m_a corresponde à massa específica dos agregados (apenas da parte sólida).

A densidade de empacotamento depende da distribuição dos tamanhos de partículas, formato e método de empacotamento. Em um material com variados diâmetros de partículas as menores preenchem os vazios entre as maiores e desta forma diminuem os espaços vazios.

Para aumentar a trabalhabilidade do concreto é necessário a presença de uma camada adequada de pasta entre os agregados, garantindo assim a movimentação destas partículas.

Na Figura 11(a) é possível observar um concreto homogêneo, ocupando um volume total (V_t), que pode ser dividido entre duas fases: V_a (volume dos agregados) e V_p (volume de pasta). É possível observar também que na fase pasta ocorre a presença de pasta em excesso (além do volume necessário para cobrir os grãos).

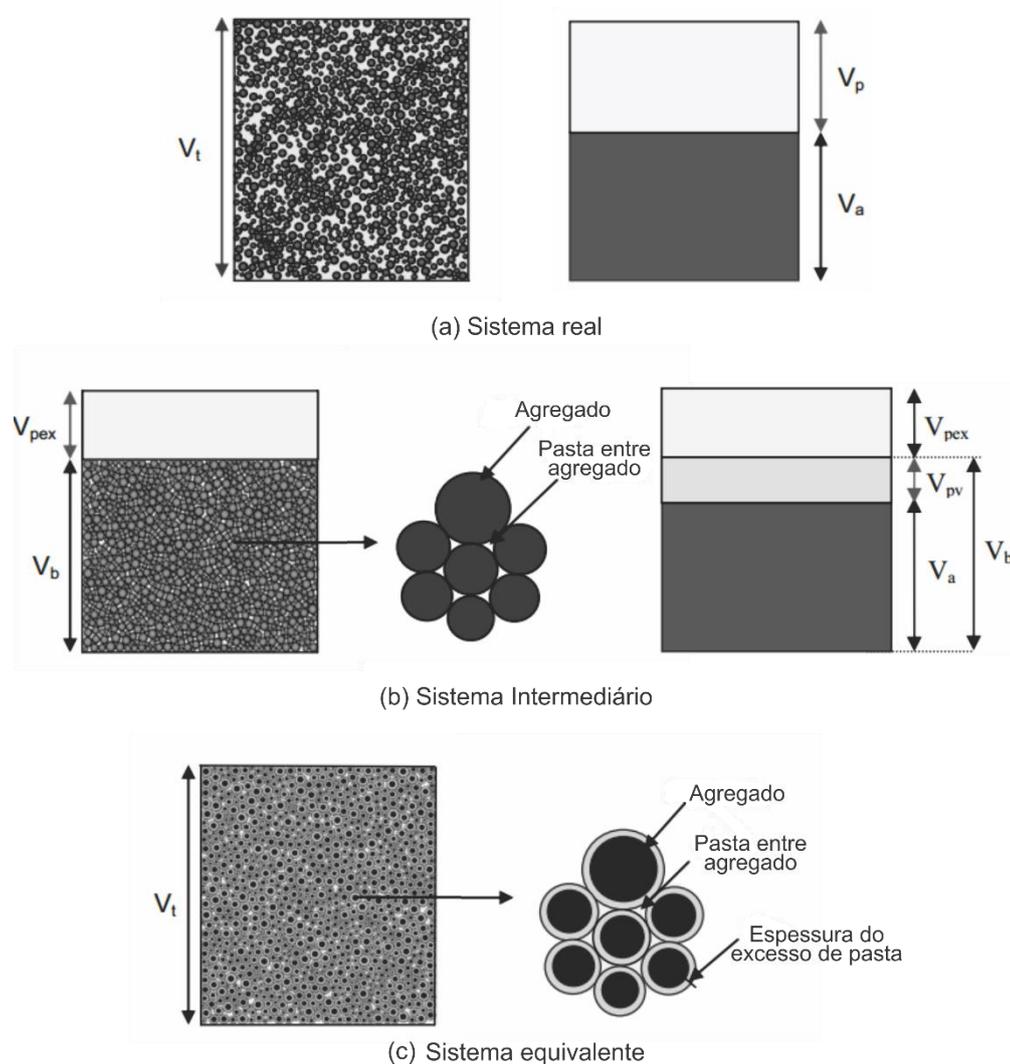


Figura 11 - Modelo de duas fases para concreto
Fonte: Adaptado de Hoornahad (2014)

Na Figura 11(b) o mesmo sistema é mostrado, porém separando-se o excesso de pasta (V_{pex}), o volume dos agregados (V_a) e o volume de vazios

preenchidos pela pasta (V_{pv}). Ao resultado da soma de V_a e V_{pv} dá-se o nome de V_b . Desta forma:

$$V_{pex} = V_p - V_{pv} \quad (5)$$

A Figura 11(c) representa o sistema de acordo com a teoria do excesso de pasta, no qual cada partícula do agregado está envolta por uma camada de excesso de pasta. Assim o volume de pasta para preencher apenas os vazios entre os agregados é V_{pv} , conforme Equação 6.

$$V_{pv} = \left(\frac{1}{\zeta} - 1 \right) V_a \quad (6)$$

Na qual ζ pode ser calculada como a razão entre a massa específica e a massa unitária da mistura de agregados. Fica claro, portanto, que qualquer volume de pasta adicionado ao sistema maior que o volume de vazios é considerado como em excesso. O cálculo da espessura de pasta (δ_{pex}), que irá envolver as partículas, pode ser calculado em função do volume de excesso de pasta.

O aumento da quantidade de excesso de pasta em relação aos agregados promove um afastamento entre eles, o que permite maior mobilidade. Desta forma nos sistemas com baixo V_{pex} , os agregados se aproximam até o limite de formarem uma estrutura contínua que impossibilita a movimentação (DAMINELI, 2013). Para concretos com V_{pex} negativo o cálculo do δ_{pex} resulta em valores também negativos, sem interpretação física.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentado o planejamento dos experimentos utilizado para estudo das composições e propriedades do concreto *no slump*.

O programa experimental pode ser basicamente dividido em seis fases: na primeira foi feita a caracterização dos materiais utilizados para a elaboração dos concretos; a segunda consistiu em um beneficiamento do agregado graúdo de ARC; a terceira foi a realização do estudo do empacotamento entre os agregados reciclados; a quarta foi um estudo para determinação da melhor taxa de pré-molhagem dos agregados reciclados; a quinta consistiu em executar um delineamento experimental para estudo das composições utilizando a teoria do excesso de pasta e a combinação entre os agregados determinada na fase 3 para a elaboração dos traços; e a sexta e última fase foi a análise das características no estado fresco e endurecido do concreto que apresentou as melhores características na quinta fase e do concreto referência. Na Figura 12 está apresentado um fluxograma do planejamento dos experimentos empregado.

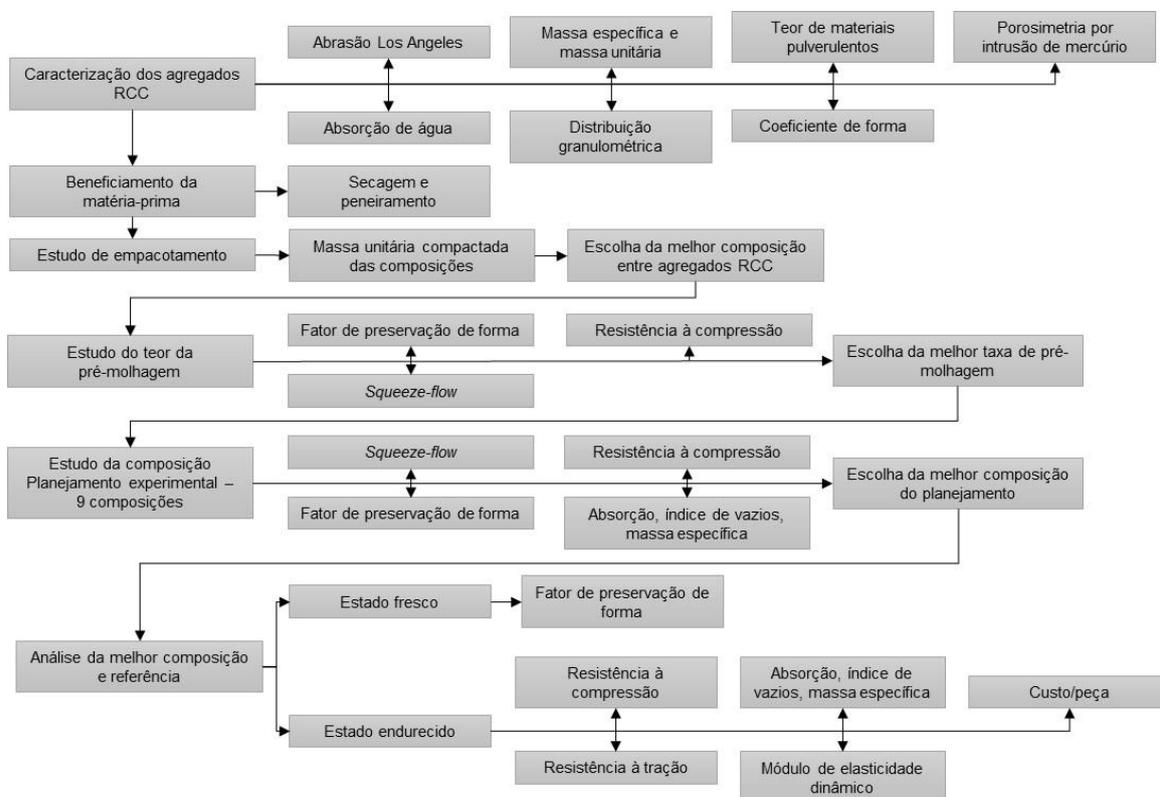


Figura 12 - Fluxograma do procedimento experimental usado na presente pesquisa
Fonte: Autoria própria (2017)

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Para os concretos utilizados nesta pesquisa foi utilizado cimento Portland CPV-ARI e agregados miúdo e graúdo (pedrisco) de origem natural e de ARC (ARC). A caracterização desses materiais está descrita neste item.

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado na pesquisa foi o CPV-ARI, por não possuir adições que possam influenciar nos resultados obtidos. As propriedades do cimento utilizado na presente pesquisa, fornecidas pelo fabricante, são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Relatório de ensaio físico-químico

QUÍMICOS										
Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Perda Fogo	CaO Livre	Resíd. Insol.	Equiv. Alcal.	
4,19	18,86	2,65	60,51	4,21	2,96	3,44	0,68	0,77	0,69	
FÍSICOS										
Exp. Quente	Tempo de Pega		Cons. Normal	Blaine	#200	#325	Resistência à Compressão 28 dias	Massa específica		
	Início	Fim								
0,27	03:21	04:03	30	4,292	0,03	0,48	53,8	3,09		

Fonte: Cimento Itambé (Março, 2016)

3.1.2 Agregados Naturais

O agregado miúdo natural utilizado na presente pesquisa tem origem em cava de rio, proveniente da região de Balsa Nova - PR e o agregado graúdo de origem granítica.

3.1.3 Agregados Reciclados de Concreto

Os agregados reciclados de concreto (ARC) foram adquiridos no mês de abril de 2016 da usina de reciclagem Soliforte, localizada na cidade de Campo Largo – PR e, são provenientes da fração cinza dos resíduos.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

3.2.1 Agregados Naturais

Na Figura 13 (a) e (b) podem ser observados o pedrisco e a areia naturais, respectivamente.

Trazer a Figura 13 (a) e (b) para cá. O mais próximo da citação no texto.

Os métodos utilizados para a caracterização dos agregados naturais utilizados nessa pesquisa são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Ensaio e normas utilizados para caracterização dos agregados naturais

Material	Ensaio/Método	Norma/Procedimento
Agregado Miúdo	Distribuição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
	Absorção de água	Leite <i>et al.</i> (2011)
	Massa específica	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
	Massa unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
	Teor de materiais pulverulentos	NBR NM 46 (ABNT, 2003)
Agregado Graúdo	Distribuição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
	Absorção de água	Leite <i>et al.</i> (2011)
	Massa específica	NBR NM 53 (ABNT, 2009)
	Massa unitária	NBR NM 53 (ABNT, 2009)
	Teor de materiais pulverulentos	NBR NM 46 (ABNT, 2003)
	Abrusão Los Angeles	NBR NM 51 (ABNT, 2001)
	Porosimetria por intrusão de mercúrio	Descrito no item 3.2.2.3
Coeficiente de forma	Descrito no item 3.2.2.1	

Fonte: Autoria própria (2017)



(a)



(b)

Figura 13 - (a) Pedrisco e (b) areia, ambos de origem natural
Fonte: Autoria própria (2017)

3.2.2 Agregados Reciclados de Concreto

Nas Figura 14 (a) e (b) podem ser observados o pedrisco e a areia reciclados de concreto, respectivamente.

Os métodos utilizados para a caracterização dos agregados reciclados de concreto utilizados nessa pesquisa serão os apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Ensaio e normas utilizados para caracterização do ARC

Material	Ensaio/Método	Norma/Procedimento
Agregado Miúdo	Distribuição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
	Absorção de água	Leite <i>et al.</i> (2011)
	Massa específica	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
	Massa unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
	Teor de materiais pulverulentos	NBR NM 46 (ABNT, 2003)
Agregado Graúdo	Distribuição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
	Absorção de água	Leite <i>et al.</i> (2011)
	Massa específica	NBR NM 53 (ABNT, 2009)
	Massa unitária	NBR NM 53 (ABNT, 2009)
	Teor de materiais pulverulentos	NBR NM 46 (ABNT, 2003)
	Abrasão Los Angeles	NBR NM 51 (ABNT, 2001)
	Porosimetria por intrusão de mercúrio	Descrito no item 3.2.2.3
Coeficiente de forma	Descrito no item 3.2.2.1	

Fonte: Autoria própria (2017)



Figura 14 - (a) Pedrisco e (b) areia reciclados de concreto
Fonte: Autoria própria (2017)

3.2.2.1 Absorção do agregado reciclado

Apesar das normas NBR NM 53 (ABNT, 2009) e NBR NM 30 (ABNT, 2001) estabelecerem procedimentos para determinação da taxa de absorção dos agregados naturais, estas não se mostram adequadas para utilização em agregados reciclados, uma vez que estes apresentam alta porosidade e podem perder material por desagregação (PADOVAN, 2013).

Desta forma, foi adotado para este estudo a metodologia proposta por Leite *et al.* (2011) para determinação da absorção por imersão dos agregados reciclados ao longo do tempo, conforme as seguintes etapas:

- secar em estufa até a estabilidade de massa (cerca de 1 kg) do agregado a ser analisado;
- manter em dessecador, com sílica gel, os agregados até estabilização da temperatura;
- montar aparato sob a balança hidrostática com recipiente vazado com malha de abertura adequada para a amostra;
- submergir cuidadosamente o recipiente com material, de forma a manter lâmina de água com aproximadamente 1 centímetro sobre o material;
- fazer leituras da massa em intervalos pré-determinados: 1, 2, 3, 5, 10, 15, 30, 60 e 90 minutos; 2, 3, 6, 24, 48, 72 horas ou até o período necessário para a estabilização do ganho de massa;
- após estabilizar o ganho de massa, retirar o material do recipiente e levar à estufa até constância de massa (a perda de material durante o ensaio não poderá ser superior a 0,05%).

As Equações 7 e 8 mostram o cálculo da taxa de absorção e da absorção de água.

$$A_{sub} = \frac{M_{subf} - M_{subi}}{M_{subi}} \times 10 \quad (7),$$

em que:

A_{sub} (%) - percentual de água absorvido pelo material submerso;

M_{subf} - massa do material submerso no instante final;

M_{subi} - massa do material submerso no instante inicial.

$$A = \frac{A_n}{A_f} \times 100 \quad (8),$$

em que:

A - absorção de água percentual no instante n ;

A_n - massa de água absorvida no instante n ;

A_f - massa de água absorvida ao final do ensaio.

3.2.2.2 Coeficiente volumétrico de forma

A forma das partículas do agregado graúdo reciclado de concreto será avaliado por meio do coeficiente volumétrico de forma.

As medidas necessárias para o cálculo do coeficiente volumétrico de forma foram realizadas de acordo com o método Gtec-UFSC apresentado por Weidmann (2008) conforme sequência exposta a seguir:

peneirar o agregado conforme recomendações da NBR NM 248 (ABNT, 2003), obtendo as frações separadas e as respectivas porcentagens retidas;

- determinar a massa específica por meio de picnômetro usando água;
- pesar a amostra de partículas (nesta pesquisa foram usadas 10 amostras de cada fração);
- dispor as partículas de forma ordenada sobre a lente do scanner para digitalização, juntamente com uma escala métrica;
- analisar o tamanho das partículas usando um programa de edição de imagens – (nesta pesquisa o programa usado foi o Adobe Photoshop CS3) obtendo-se as propriedades geométricas de cada partícula (maior dimensão);
- calcular o coeficiente de forma de cada fração conforme Equação 9, de AFNOR XP P18-540 (1997) e,

$$CF_{\text{fração}} = \frac{m_{\text{fração}}}{\frac{\pi}{6} \sum L^3} \quad (9),$$

em que:

$CF_{\text{fração}}$ = coeficiente de forma da fração granulométrica;

$m_{\text{fração}}$ = massa de total das partículas contidas na imagem;

$d_{\text{fração}}$ = massa específica da fração analisada.

L = comprimento de cada partícula determinado por análise de imagens.

- calcula-se o coeficiente de forma do agregado conforme Equação 10.

$$CF_{\text{agregado}} = \frac{\sum (CF_{\text{fração}} * \% \text{ retida})}{\sum \% \text{ retida}} \quad (10),$$

em que:

CF_{agregado} = coeficiente de forma do agregado;

$CF_{\text{fração}}$ = coeficiente de forma da fração granulométrica.

Na Figura 15 pode-se observar um exemplo de imagem analisada para o cálculo do coeficiente volumétrico de forma.

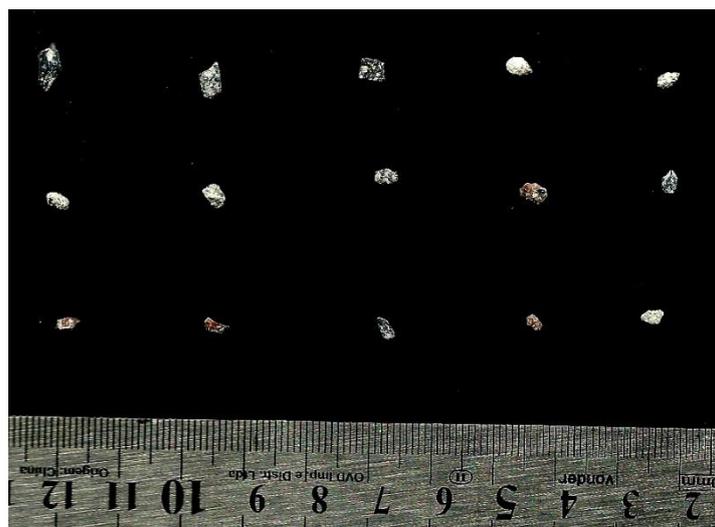


Figura 15 - Imagem obtida em escâner para cálculo do coeficiente volumétrico de forma
Fonte: Autoria própria (2017)

3.2.2.3 Porosimetria por intrusão de mercúrio

A porosimetria por intrusão de mercúrio é uma técnica utilizada para determinação de poros de tamanho médio. Fornece informações sobre a distribuição dos tamanhos e volume total de poros, superfície específica, densidade e estrutura de sólidos não compressíveis (DAL MOLIN, 2007). A medida feita pela técnica da intrusão de mercúrio é realizada pelo volume de mercúrio forçado a entrar nos poros de uma amostra em função da pressão aplicada (MACIEL, 2015). Este ensaio é baseado no fato de que um líquido que não molha um sólido poroso somente penetrará nos seus poros sob pressão e não por capilaridade (SILVA, I. J. DA, 2000).

Esta técnica foi empregada para determinar a porosidade de amostras tantos dos agregados graúdos como dos corpos de prova de concreto referência produzidos com agregados provenientes de ARC aos 7 dias, para se verificar a quantidade e tamanho dos poros e a influência do aumento do excesso de pasta nestas características.

A preparação para o ensaio do concreto foi feita retirando-se amostras dos corpos de prova submetidos à ensaios destrutivos e fazendo-se o acabamento manual, de forma a apresentarem dimensões adequadas para colocação no penetrômetro, recipiente de vidro cuja função é de porta-amostra.

O ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio foi realizado em porosímetro Quantachrome, Modelo Poromaster 33, considerando uma tensão superficial de mercúrio de 480 erg/cm^2 , ângulo de contato mercúrio/sólido de 140° , densidade do mercúrio de $13,50 \text{ g/cc}$ e temperatura de 20°C .

3.3 BENEFICIAMENTO DA MATÉRIA-PRIMA

Ao serem realizados os ensaios iniciais de caracterização dos agregados graúdos reciclado, observou-se que os agregados reciclados apresentavam quantidade de material passante na peneira de $4,8 \text{ mm}$ superior ao recomendado por norma, sendo que tais resultados serão apresentados no item 4.1

Uma possível explicação para essa quantidade grande de partículas finas no pedrisco de ARC é a condição de peneiramento na usina recicladora. Após

triturado o material é armazenado ao ar livre antes de ser peneirado e em caso de chuva ou se a umidade relativa do ar estiver muito alta nesse período de armazenamento o resíduo de construção triturado absorve parte desta água e segue úmido para o processo de peneiramento. A umidade faz com que as partículas menores fiquem aderidas às partículas maiores, o que dificulta o processo de peneiramento.

A umidade faz também com que as malhas das peneiras fiquem obstruídas e, desta forma, parte do material mais fino que deveria passar pela peneira e se integrar à areia fica retido junto com o pedrisco, alterando a distribuição esperada para esse material. Desta forma, as condições climáticas do período em que o agregado é produzido e adquirido influencia nas características do material vendido pela usina de agregados reciclados.

3.3.1 Secagem e Peneiramento

Visando minimizar essa influência e padronizar o material para a produção dos traços desta pesquisa, optou-se por secar o material em estufa a 105°C por 24 horas e depois proceder um breve peneiramento. Uma porção de 10 kg de agregado foi colocado na peneira # 4,75 mm de (500x500) mm, peneirado por aproximadamente 30 segundos, e então armazenado.

3.3.2 Lavagem

Outro fato observado durante a caracterização dos agregados graúdos de ARC foi que durante a lavagem para os ensaios de material pulverulento e coeficiente de forma, observou-se que uma grande parte da capa de argamassa que recobre as partículas do pedrisco ARC se soltava e, como consequência, havia redução do tamanho das partículas.

Como há atrito entre as partículas durante o processo de preparo do concreto, foi realizado um procedimento a fim de observar se esse atrito na betoneira também era capaz de separar a capa de argamassa dos pedriscos de ARC.

Para observar esse fato foi colocado em betoneira 10 kg de pedrisco previamente seco e peneirado juntamente com água e o equipamento foi ligado por período semelhante àquele utilizado para o preparo do concreto, 5 minutos. Após esse intervalo de tempo o material foi recolhido, seco em estufa a 105°C e então caracterizados conforme descrito na sequência.

No decorrer da pesquisa os agregados graúdos foram denominados da seguinte forma:

- pedrisco de ARC bruto - como recebido pela usina;
- pedrisco de ARC peneirado - após passar por breve peneiramento em malha # 4,8mm, e;
- pedrisco ARC lavado - após ser submetido à 5 minutos de agitação com água em betoneira.

3.4 ESTUDO DE EMPACOTAMENTO DOS AGREGADOS

O empacotamento foi estudado a fim de se determinar a proporção ideal entre areia e pedrisco reciclados. A composição ideal entre eles foi determinada conforme recomendado por Helene e Terzian (1992). Neste estudo dois agregados com composições granulométricas distintas são combinados em diversas frações e é determinada a massa unitária no estado compactado dessas combinações, de acordo com as disposições da NBR NM 45 (ABNT, 2006). A composição considerada ideal é aquela na qual a massa unitária compactada apresenta maior valor.

3.5 PLANEJAMENTO DAS COMPOSIÇÕES

O primeiro traço utilizado nesta pesquisa foi baseado nas informações disponibilizadas pela ABCP (1997) no BT-82 – (Boletim Técnico) sobre meio fio pré-moldado de concreto. O traço é recomendado para concreto com adensamento vibratório. Na Tabela 11 encontra-se o traço descrito neste boletim, identificado na presente pesquisa como REF-01.

Tabela 11 - Dados do concreto do fabricante - REF-01

Material	Traço
Cimento	1,00
Agregado miúdo	2,48
Agregado graúdo	4,05
Água	0,55

Fonte: ABCP (1997)

Aplicando-se ao traço proposto pela ABCP à teoria do excesso de pasta e, considerando a combinação de 62% de pedrisco e 38% de areia convencionais, obtém-se um volume de excesso de pasta de -16,4%. Esse valor negativo indica que a pasta presente no traço não é suficiente para preencher todos os vazios da mistura, mas apenas para manter os agregados unidos. Esse valor negativo é provavelmente o que promove o baixo valor de *slump*, pois não é o suficiente para lubrificar as partículas dos agregados e promover um maior abatimento.

Os demais traços desta pesquisa foram obtidos baseados em variações utilizando a teoria do excesso de pasta – (*excess paste thickness*) com substituição total dos agregados naturais graúdo e miúdo por agregados reciclados de concreto (ACR), tendo sido o agregado graúdo ARC seco e peneirado. Além disso, também foram executados traços com variação de *a/c*, buscando atingir características de trabalhabilidade e resistência mecânica próximas às encontradas no concreto utilizando agregados convencionais.

Primeiramente foram executados traços nos quais o *a/c* foi mantido em 0,55 e o volume de excesso de pasta em - 15% (parâmetro do concreto REF-01), e a pré-molhagem foi realizada com taxas variando entre 50 e 95%. No estudo de pré-molhagem foram realizados os ensaios de: *squeeze-flow* para medir como a variação desta etapa influencia na trabalhabilidade de concreto, de fator de preservação de forma e de resistência mecânica à compressão axial. O teor de pré-molhagem que atingiu os melhores resultados foi adotado para todos os demais traços da pesquisa.

Para o estudo da composição do concreto foi elaborado um planejamento experimental do tipo fatorial completo com 2 fatores e 3 níveis (3^2), com duas repetições do ponto central.

Para elaboração deste planejamento foi utilizado o programa STATISTICA 10 para o cálculo e análises realizados, totalizando 11 corridas, conforme apresentado na Figura 16.

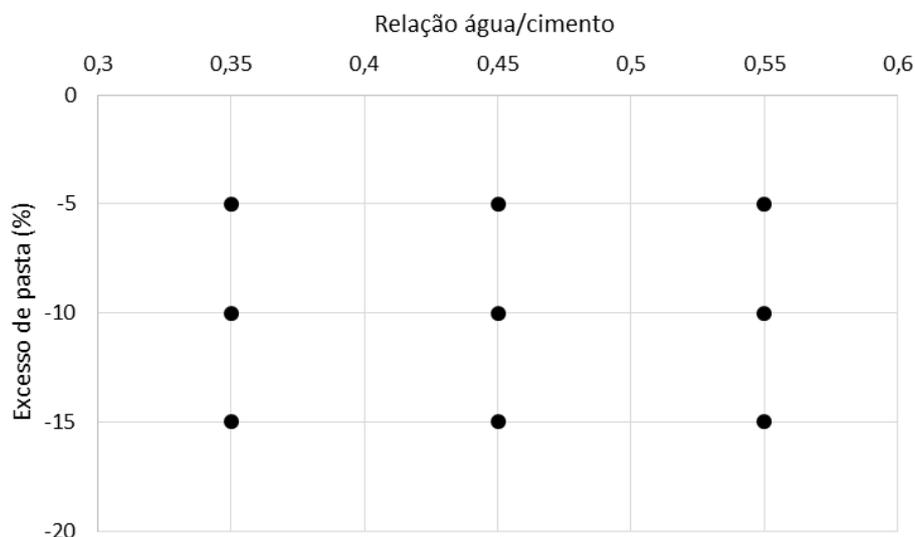


Figura 16 - Combinações entre teores de excesso de pasta vs relação água/cimento
 Fonte: Autoria própria (2017)

Considerou-se como limites de excesso de pasta os tores de - 15 a - 5%, e de relação água/cimento (a/c) de 0,35 a 0,55. Nas composições apresentadas na Figura 16 foram realizados os ensaios de *slump test*, para certificar-se que as variações propostas ainda atendiam à característica de concreto *no slump*, o ensaio de fator de preservação de forma, o *squeeze-flow*, a absorção de água, o índice de vazios, a massa específica, o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência mecânica à compressão axial.

Para todos os traços da pesquisa que continham o agregado reciclado foi utilizada a proporção de 60% de pedrisco e 40% de areia, ambos de ARC. Tal proporção foi escolhida com base nos resultados apresentados no item 4.1.1.

Nas Tabela 12 e

Tabela 13 são apresentados resumos dos traços formulados para o estudo de pré-molhagem e para a composição do concreto, bem como a nomenclatura com a qual foram identificados ao longo deste trabalho.

Tabela 12 - Identificação dos traços referentes ao estudo da pré-molhagem

Excesso de pasta (%)	Relação água/cimento	Teor de pré-molhagem (%)	Identificação do traço
- 15	0,55	50	EP - (15) - PM 50%
- 15	0,55	65	EP - (15) - PM 65%
- 15	0,55	75	EP - (15) - PM 75%
- 15	0,55	85	EP - (15) - PM 85%
- 15	0,55	95	EP - (15) - PM 95%

Fonte: Autoria própria (2017)

Tabela 13 - Identificação dos traços referentes ao estudo da composição dos concretos

Excesso de pasta (%)	Relação água/cimento	Teor de pré-molhagem (%)	Identificação do traço
- 15	0,55	75	EP - (15) - AC 0,55
- 15	0,45	75	EP - (15) - AC 0,45
- 15	0,35	75	EP - (15) - AC 0,35
- 10	0,55	75	EP - (10) - AC 0,55
- 10	0,45	75	EP - (10) - AC 0,45
- 10	0,35	75	EP - (10) - AC 0,35
- 5	0,55	75	EP - (5) - AC 0,55
- 5	0,45	75	EP - (5) - AC 0,45
- 5	0,35	75	EP - (5) - AC 0,35

Fonte: Autoria própria (2017)

3.6 MISTURA E MOLDAGEM

A preparação das misturas de concreto foi feita de acordo com o que preconiza a norma NBR 12821 (ABNT, 2009) - Preparação de concreto em laboratório - Procedimento, por meio de betoneira de eixo inclinado.

A pré-molhagem dos agregados reciclados, sendo o pedrisco previamente seco e peneirado, foi realizada aspergindo-se a água destinada a esse fim sobre os agregados e misturando os mesmos manualmente, realizando-se o procedimento de forma individual para a quantidade de material necessário para cada traço, 10 minutos antes do início da mistura.

A moldagem dos corpos de prova foi realizada sobre plataforma vibratória, sem uso de peso sobre a massa, para reproduzir a condição real de moldagem em fábricas de artefatos de concreto. Demais detalhamentos para moldagem e cura foram seguidos da NBR 5738 (ABNT, 2015) - Concreto - Procedimento para

moldagem e cura de corpos de prova. Foram utilizados corpos de prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, com desmoldagem realizada após 24 horas. Os corpos de prova foram mantidos em cura submersa até a idade do ensaio aos 7 dias. Para as análises realizadas ao longo do presente estudo, o valor da resistência à compressão axial das amostras foi ajustado de 7 para 28 dias conforme especificações da NBR 6118 (ABNT, 2014).

3.7 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

Para a avaliação das características no estado fresco dos concretos produzidos, foram utilizados os ensaios de: abatimento de tronco de cone, fator de preservação de forma e *squeeze-flow*.

3.7.1 Abatimento de Tronco de Cone

O procedimento para o ensaio de abatimento de tronco de cone foi idêntico para todos os concretos analisados e as amostras foram ensaiadas imediatamente após o término da mistura do concreto. As etapas de ensaio seguiram as determinações da NBR NM 67 (ABNT, 1998) - Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Porém, visando replicar as condições em que este concreto é utilizado na indústria, a moldagem do tronco de cone foi feita com auxílio de vibração, em duas camadas vibradas por 10 segundos.

3.7.2 Fator de Preservação de Forma

O ensaio do fator de preservação de forma foi realizado obtido após preenchimento de concreto em moldes de tronco cônico, sobre uma mesa vibratória.

Para retirar os CPs do molde deve-se apoiar um pé sobre a aleta de fixação e levantar pela alça a parte superior da mesa, até que se encontre o limitador e então, deixar a mesa cair livremente. Devem ser realizadas 15 quedas em um período de 15 segundos. O ensaio é normatizado pela NBR NM 68, Concreto – Determinação da consistência pelo espalhamento na mesa de Graff.

Para realização do ensaio, uma câmera foi posicionada em frente ao aparato para realização do *slump test* e foi registrada a imagem após desmolde. As medidas foram obtidas por meio da análise das fotos. O fator de preservação de forma (FPF) pode ser calculado pela Equação 11, sendo a razão entre a área da seção transversal do cone antes e após a desmoldagem, conforme mostra a Figura 17.

$$FPF = \frac{A_f}{A_i} \quad (11),$$

em que:

A_i = Área da seção transversal inicial, antes da queda (cm²)

A_f = Área da seção transversal final, após a queda (cm²)

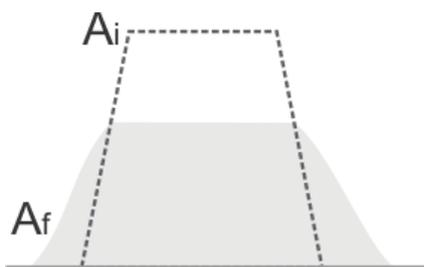


Figura 17 - Área da seção transversal antes e depois da desmoldagem
Fonte: Adaptado de Hoornahad e Koenders (2014)

Por meio desse ensaio pode-se determinar também as relações D/D_0 e H_s/H_0 conforme Figura 18.

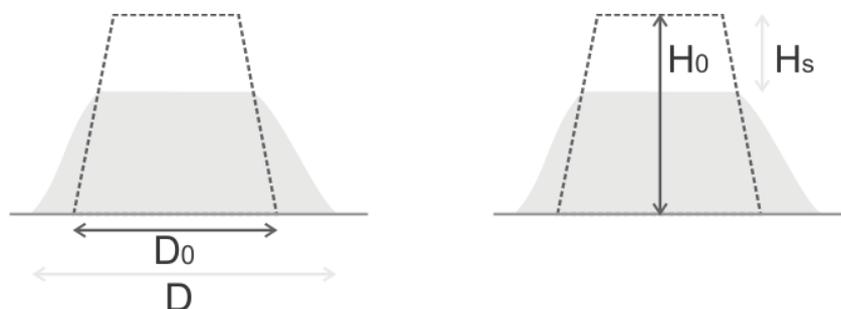


Figura 18 - Relações de espalhamento
Fonte: Adaptado de Hoornahad e Koenders (2014)

Conforme exposto na Tabela 6, concretos *no slump* apresentam fator de preservação de forma entre 0,7 e 1,0.

3.7.3 Squeeze-Flow

O ensaio *squeeze-flow* das amostras de concreto foi realizado com Máquina Universal de Ensaio (EMIC DL10000), com uma célula de carga de 2.000 N, prato superior com 10 centímetros de diâmetro e amostra com igual diâmetro. O ensaio foi realizado com deformação livre e com velocidade de aplicação de carga igual a 3 mm/s, velocidade indicada para o caso em que a aplicação do material seja feita de forma mecanizada (QUEVEDO, 2013).

O molde utilizado foi de PVC, com altura de 5 cm pois, essa foi a altura que gerou melhores resultados para concretos de consistência similar realizados por Quevedo (2013).

Foram analisadas as forças correspondentes a um deslocamento de 20 mm pois, neste ponto os agregados graúdos ainda não estão sob compressão, restando ao final do ensaio praticamente apenas uma camada de agregados.

3.8 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

3.8.1 Resistência Mecânica à Compressão Axial

Este ensaio foi realizado de acordo com as especificações da NBR 5739 (ABNT, 2007) aos 7 dias. O ensaio foi executado em corpos de prova saturados de água e com as extremidades retificadas, utilizando uma máquina universal de ensaios (EMIC, modelo PC200) com velocidade de aplicação de carga igual a 0,5 MPa/s.

3.8.2 Resistência Mecânica à Tração por Compressão Diametral

Este ensaio foi executado de acordo com as especificações da NBR 7222 (ABNT, 2011), Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos aos 7 dias. Foi utilizada

também uma Máquina universal de ensaios (EMIC, modelo DL 30000) com velocidade de aplicação de carga igual a 0,05 MPa/s.

3.8.3 Módulo de Elasticidade Dinâmico

Este ensaio foi determinado utilizando a técnica de excitação por impulso, que consiste em excitar o corpo de prova com um leve impulso mecânico e calcular os módulos de elasticidade a partir das frequências naturais de vibração e da atenuação da resposta acústica.

Foi utilizado para este ensaio o equipamento *Sonelastic® PC Based* e foram seguidas as prescrições da C - 215 (ASTM, 2008) - *Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens* Os corpos de prova foram ensaiados no estado seco após 7 dias de cura.

Para o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico E_{cd} foi utilizada a Equação 12, de acordo com a C - 215 (ASTM, 2008):

$$E_{cd} = 16mf_1^2 \left[\frac{L}{\pi D^2 K} \right] \quad (12),$$

em que:

E_{cd} : módulo de elasticidade dinâmico longitudinal (GPa);

m : massa da amostra;

L : comprimento da amostra;

f : frequência fundamental para a barra em modo longitudinal (Hz);

K : fator de correção em função da geometria;

D : diâmetro da amostra.

3.8.4 Absorção de Água, Índice de Vazios, Massa Específica e Densidade de Massa Aparente

Os ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica foram realizados aos 7 dias, seguindo as recomendações da NBR 9778 (ABNT, 2009), Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água,

índice de vazios e massa específica. O ensaio para a determinação da densidade de massa aparente foi realizado de acordo com as recomendações da NBR 13280 (ABNT, 2014), aos 7 dias.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados e discussões referente a todo o estudo experimental realizado nos agregados e no concreto.

As tabelas com os resultados completos dos ensaios realizados estão contidas no Apêndice A e B.

4.1 ESTUDO DA FASE AGREGADO

Na Figura 19 são apresentadas as curvas granulométricas dos agregados miúdos, bem como os limites ótimo e utilizável segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009).

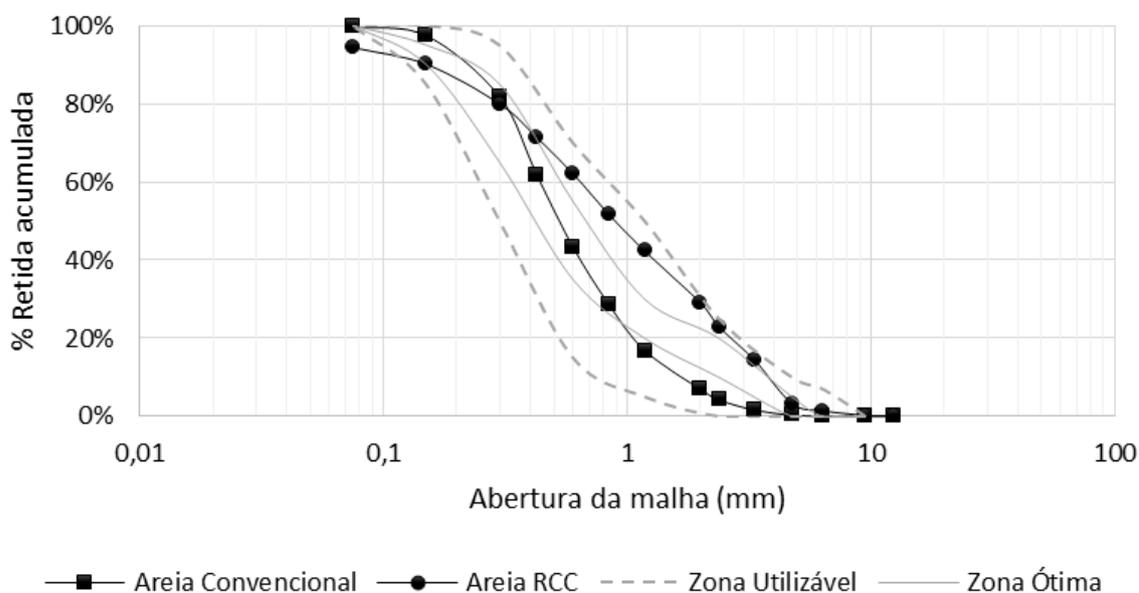


Figura 19 - Distribuição granulométrica dos agregados miúdos
Fonte: Autoria própria (2017)

Tanto a curva granulométrica referente ao agregado miúdo natural quanto a referente ao agregado miúdo de ARC apresentam uma distribuição de tamanho de partículas contínua, ou seja, bem distribuídas. Segundo Neville (1995), uma distribuição contínua dos agregados é desejável para a produção de concreto por permitir um melhor arranjo e empacotamento entre as partículas.

Da análise do gráfico pode se observar que ambas as areias se encontram dentro dos limites utilizáveis para concretos, sendo que a areia natural apresenta

grande parte da distribuição situada entre os limites da zona ótima, exceto para diâmetros maiores, com desvio na zona utilizável.

De forma semelhante, a areia de ARC tem apenas uma pequena faixa dentro dos limites da zona ótima, a maior parte da distribuição está contida na zona utilizável superior. Há na distribuição da areia ARC, ainda, um ponto correspondente ao material passante na peneira de 0,15 mm, fora da zona utilizável. Este comportamento evidencia uma porcentagem de materiais finos acima do desejável para a distribuição granulométrica deste material.

Uma maior quantidade de partículas finas exerce influência na trabalhabilidade do concreto. Devido ao fato do agregado apresentar maior área superficial, o concreto necessita de mais pasta para manter a trabalhabilidade adequada.

O gráfico com a curva granulométrica do agregado graúdo natural está apresentado na Figura 20.

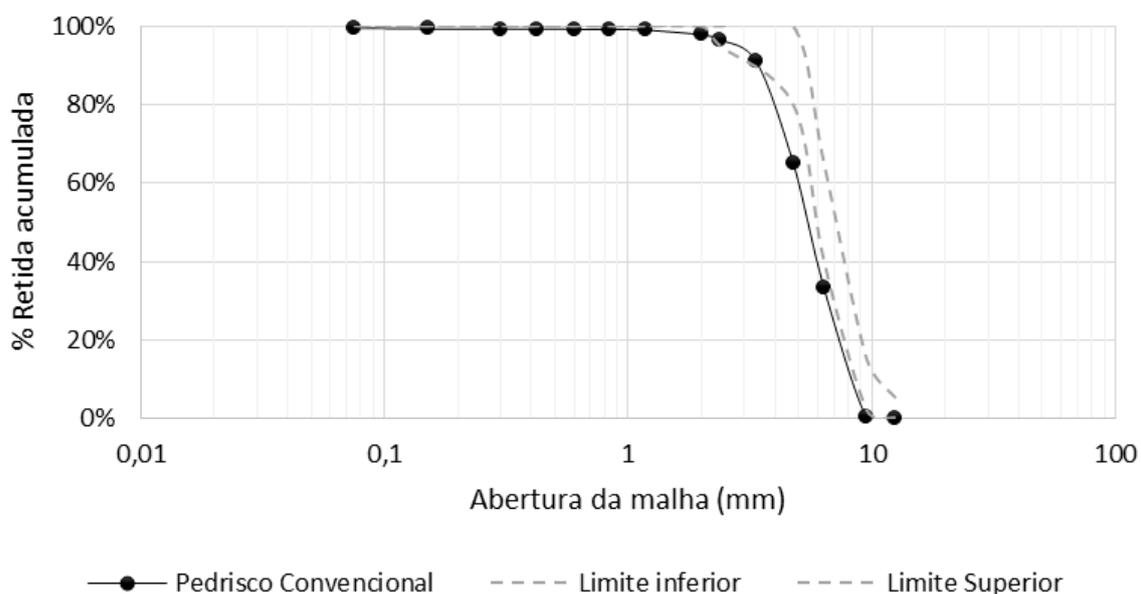


Figura 20 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo natural
Fonte: Autoria própria (2017)

Apesar da curva granulométrica do pedrisco natural evidenciar uma distribuição contínua das partículas, observa-se que parte não está compreendida dentro dos limites inferior e superior da NBR 7211 (ABNT, 2009) para brita 0

(pedrisco). Isso evidencia um agregado graúdo com tamanho de partículas menor do que o esperado pela norma.

De forma semelhante, o gráfico com a curva granulométrica do agregado graúdo de ARC está apresentado na Figura 21, no qual pode-se observar três curvas granulométricas referentes ao pedrisco ARC: bruto, peneirado e lavado.

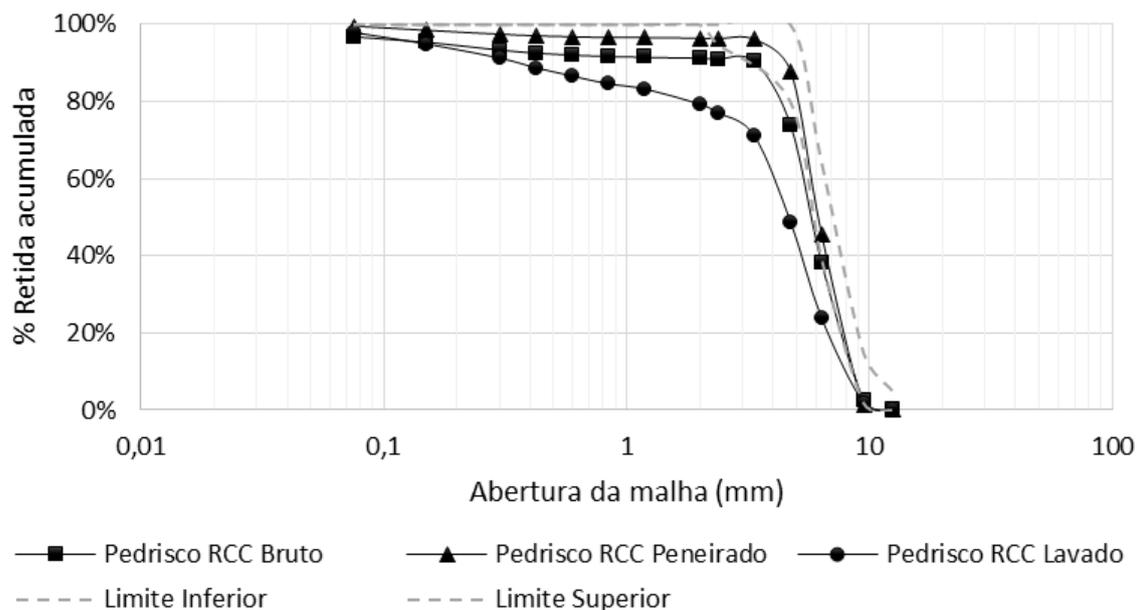


Figura 21 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo de ARC
 Fonte: Autoria própria (2017)

A curva correspondente ao pedrisco ARC bruto é a caracterização do material tal como entregue pela usina produtora. É possível observar que não atende às porcentagens retidas acumuladas mínimas necessárias, apresentando uma distribuição com grande quantidade de finos, enquanto a norma estabelece como limite 20% do material passante na peneira com abertura de 4,75 mm. O pedrisco de ARC bruto apresenta 34,73% do material passante nesta peneira.

A distribuição do pedrisco ARC encontra-se, após peneirado, na maior parte dentro das limites inferior e superior da NBR 7211 (ABNT, 2009), se aproximando de 95% de material retido na peneira # 2,38 mm. Isto atende ao estipulado como limite inferior da norma, o que evidencia uma quantidade de partículas finas mais adequada.

É possível observar na curva granulométrica do pedrisco ARC lavado que houve uma diminuição do tamanho das partículas e redução fez com que, em

nenhuma peneira, o agregado após lavado apresentasse a porcentagem retida acumulada mínima descrita pela norma.

Na Figura 22 pode-se observar a diferença das porcentagens retidas acumuladas dos três agregados reciclado: bruto, peneirado e lavado.

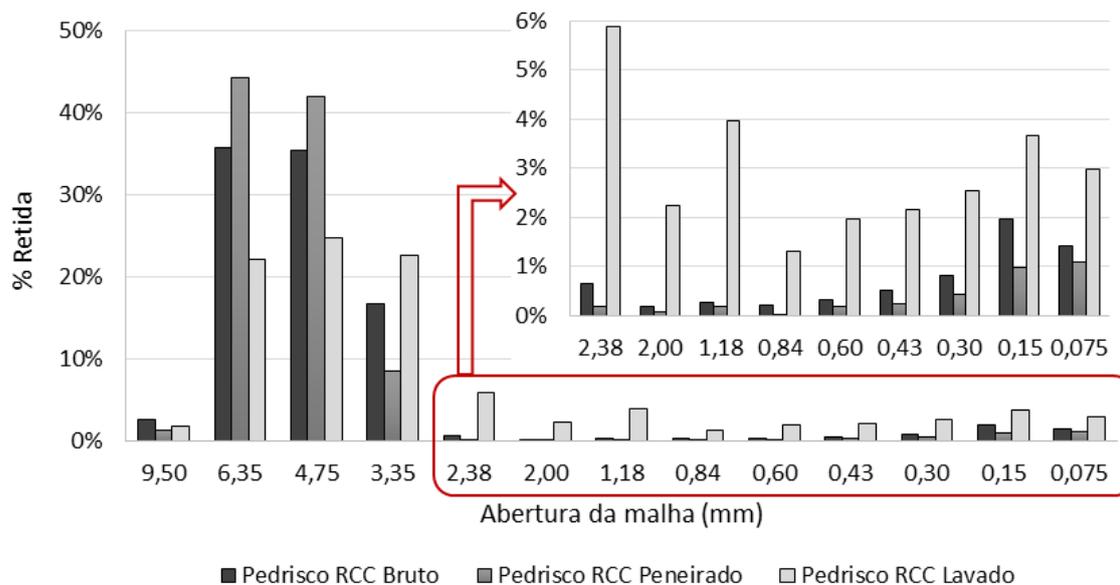


Figura 22 - Comparação da %retida dos agregados graúdos de ARC
Fonte: Autoria própria (2017)

Da análise do gráfico apresentado na Figura 22 pode-se perceber que houve um aumento da quantidade de partículas retidas na fase mais grossa do agregado, entre as peneiras # 9,50 mm e # 3,35 mm e, diminuição da porcentagem retida nas peneiras mais finas, entre # 2,38 mm e # 0,075 mm, do agregado bruto para o peneirado. Este fato está ligado justamente ao processo de secagem / peneiramento pelo qual o agregado bruto foi submetido. Quando comparado ao agregado peneirado e lavado, o comportamento foi o inverso, houve uma diminuição da porcentagem retida de partículas mais grossas e aumento da porcentagem retida de partículas mais finas, fato ligado à quebra da capa de argamassa durante o processo de lavagem dos agregados.

Com a quebra da capa de argamassa e a diminuição do diâmetro das partículas, a quantidade de finos no material aumentou, passando de 1,56 % de passante na peneira # 0,150 mm no pedrisco ARC peneirado (limite para que uma partícula seja considerada agregado miúdo), para 5,11% no pedrisco lavado, valor superior inclusive aos 4,68 % passante encontrado no pedrisco bruto.

A partir do estudo da composição granulométrica dos agregados naturais e reciclados, miúdo e graúdo, foram calculados os módulos de finura dos agregados conforme apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Módulo de finura - Agregados miúdos

Agregado Miúdo	Módulo de finura	Classificação módulo de finura conforme NBR 7211 (ABNT, 2009)
Natural	2,44	Ótima
ARC	3,00	Zona utilizável superior

Fonte: Autoria própria (2017)

Sabe-se que quanto maior o módulo de finura de um material, maiores são as dimensões de suas partículas. Desta forma, essa característica resulta em uma menor superfície específica e, uma menor necessidade de pasta para lubrificar as partículas.

O agregado miúdo natural apresentou módulo de finura menor que o agregado miúdo reciclado, contudo, esse resultado isolado não é suficiente para concluir que há uma necessidade menor de pasta no concreto produzido com o agregado reciclado. Outras propriedades como a distribuição granulométrica, índice de forma, massa específica e absorção também influenciam nessa necessidade.

Com base nos resultados obtidos, foi definido que os traços da presente pesquisa utilizam na composição o pedrisco peneirado, uma vez que o processo de peneiramento conferiu a esse material características mais próximas às exigidas por norma para pedriscos.

Na Tabela 15 são apresentados os resultados da caracterização dos agregados miúdos natural e ARC.

Tabela 15 - Massa específica real e aparente dos agregados miúdos

Parâmetro	Agregado Miúdo	
	Natural	ARC
Massa específica real (g/cm ³)	2,68 ± 0,002	2,54 ± 0,002
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,57 ± 0,003	2,48 ± 0,012

Fonte: Autoria própria (2017)

Os resultados de massa específica aparente para ambos os agregados apresentaram valores próximos, sendo que a massa específica real da areia ARC permaneceu ligeiramente menor do que a referente a areia natural, em cerca de 5%. Os valores obtidos estão dentro da faixa encontrada por alguns autores para massa específica, que costuma variar entre 2,12 e 2,52 g/cm³ (BARROS; FUCALE, 2016; CORINALDESI, 2010; GONÇALVES, 2001; HERMANN, 2016; LEITE, 2001)

Na Tabela 16 são apresentados os resultados de massa específica real e aparente dos agregados graúdos.

Tabela 16 - Massa específica real e aparente dos agregados graúdos

Parâmetro	Agregado Graúdo		
	Natural	ARC peneirado	ARC lavado
Massa específica real (g/cm ³)	2,81 ± 0,001	2,66 ± 0,006	2,67 ± 0,006
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,81 ± 0,003	2,49 ± 0,007	2,59 ± 0,000

Fonte: Autoria própria (2017)

A massa específica real é a massa de uma unidade de volume, excluindo-se os vazios internos permeáveis e os vazios entre as partículas. A massa específica aparente é a relação entre a massa de um determinado volume, incluindo os vazios permeáveis e impermeáveis e excluindo-se os vazios entre as partículas (ABNT, 2009). A massa específica real foi determinada por meio do picnômetro de hélio, enquanto a massa específica aparente foi determinada utilizando-se o picnômetro de água.

Analisando-se os resultados de massa específica real e aparente do agregado graúdo natural, pode-se deduzir que este material apresenta porosidade muito baixa, uma vez que os valores de massa específica real e aparente não diferiram entre si. Os valores encontram-se dentro do intervalo indicado por outros autores, entre 2,23 e 2,83 g/cm³ (ARAÚJO *et al.*, 2016; BAZUCO, 1999; BUTTLER, 2007; CORINALDESI, 2010; FOLINO; XARGAY, 2014; GONÇALVES, 2001; HERMANN, 2016; LEITE, 2001; PELISSARI, 2016; ZEGA, 2016).

O agregado graúdo ARC peneirado apresentou massa específica real cerca de 5% menor em relação ao agregado natural. O resultado de massa específica aparente foi cerca de 11% menor que a real. Essa diminuição se deve,

provavelmente, à diferença de composição entre os agregados, uma vez que o agregado de ARC apresenta a capa de argamassa ao redor das partículas

Houve ainda pequena variação entre a massa específica real do agregado graúdo ARC lavado e peneirado, de aproximadamente 1%. Porém, houve uma diferença de 4% entre os valores de massa específica aparente, resultado que pode indicar a quebra da capa de argamassa que envolve as partículas durante a lavagem do pedrisco em betoneira, a qual expôs a superfície do pedrisco natural, provavelmente menos porosa. Desta forma, os resultados sugerem a diminuição da porosidade das partículas durante a mistura do concreto.

A maior massa específica real do agregado graúdo ARC quando comparada com o agregado miúdo ARC pode ser explicada possivelmente pelo fato de que os agregados graúdos possuem proporcionalmente maior volume de agregado graúdo natural em sua composição, que costuma apresentar uma densidade elevada quando comparada aos materiais como a argamassa.

Os resultados encontrados para massa específica real e aparente dos agregados miúdos confirmam a menor densidade dos materiais provenientes de reciclagem apontados pela literatura.

O ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio permitiu avaliar a porosidade dos pedriscos natural, peneirado e lavado. Os valores de porosidade total e do volume de mercúrio intrudido são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Resultados da porosimetria por intrusão de mercúrio para os agregados graúdos

Característica	Agregado graúdo		
	Natural	ARC peneirado	ARC lavado
Volume intrudido (cc/g)	0,0242	0,2620	0,1196
Porosidade total (%)	5,1985	43,7064	20,4801

Fonte: Autoria própria (2017)

Verifica-se com os resultados apresentados na Tabela 17 que existem diferenças entre a porosidade das amostras relacionadas à composição de cada material. O agregado graúdo natural apresentou porosidade total significativamente menor do que os agregados reciclados, cerca de 8 vezes menor quando comparado com o agregado ARC peneirado e 4 vezes menor que o ARC lavado. Essa característica, conforme discutido anteriormente, está intimamente ligada à capa

de argamassa presente nos agregados reciclados, que apresenta porosidade maior que o agregado natural, e corrobora com os resultados de massa específica dos agregados reciclados menor que do agregado natural.

A Figura 23 mostra o volume acumulado de intrusão de mercúrio para cada um dos pedriscos analisados.

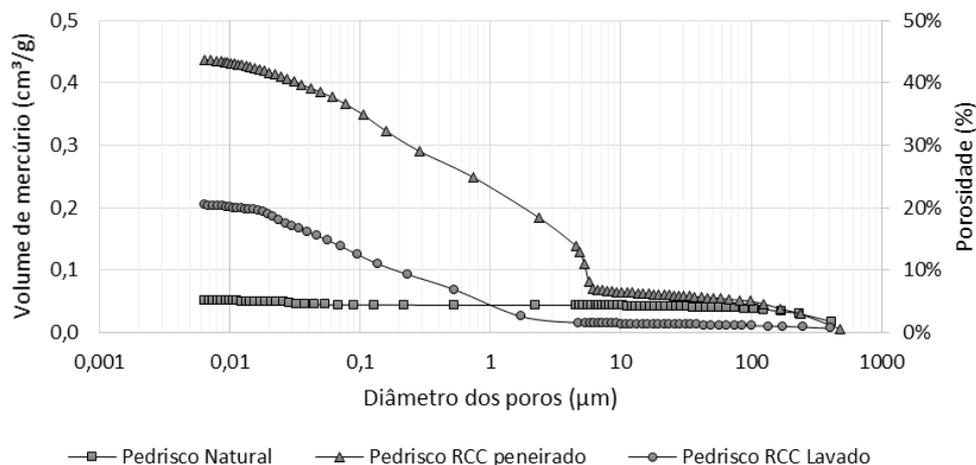


Figura 23 - Volume de mercúrio intrudido (cm³/g)

Fonte: Autoria própria (2017)

No gráfico apresentado na Figura 23 pode-se observar aumento apreciável na quantidade de poros nos agregados reciclados quando comparados ao agregado natural. Entre o agregado ARC peneirado e lavado também é possível observar uma grande diferença, sendo que o agregado ARC lavado apresentou um volume intrudido menor do que o agregado ARC peneirado.

A Figura 24 mostra o volume de mercúrio incremental vs diâmetro dos poros.

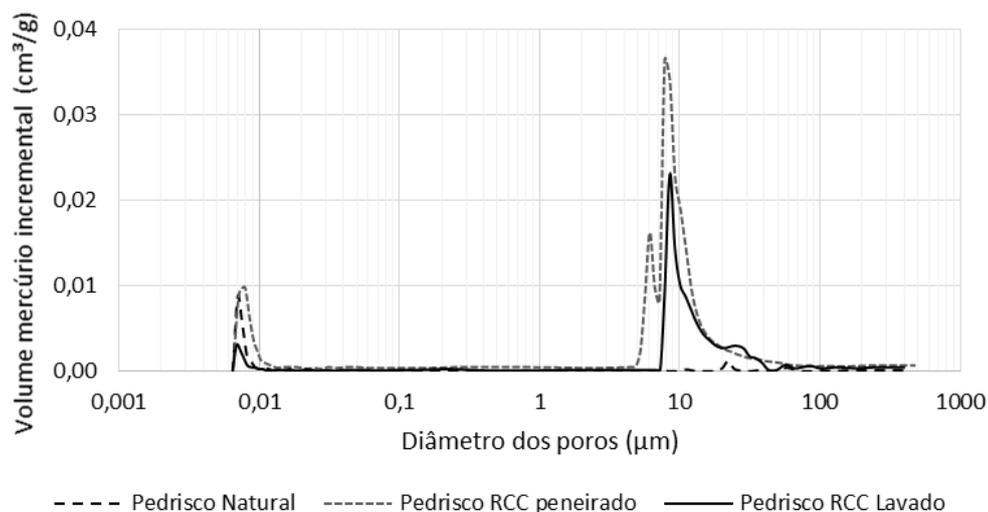


Figura 24 - Volume de mercúrio incremental (cm³/g)
Fonte: Autoria própria (2017)

Dos resultados da Figura 24 pode-se observar que o pedrisco ARC natural apresenta maior quantidade de poros principalmente nos diâmetros maiores, como o pico em 10 µm. Esses resultados estão de acordo com os encontrados no estudo das massas específicas destes materiais e também com os resultados de absorção, que são apresentados a seguir.

Na Figura 25 pode-se observar os resultados para absorção de água dos agregados miúdos natural e ARC bem como limite estabelecido pela NBR 15116 (ABNT, 2004) para agregados graúdos.

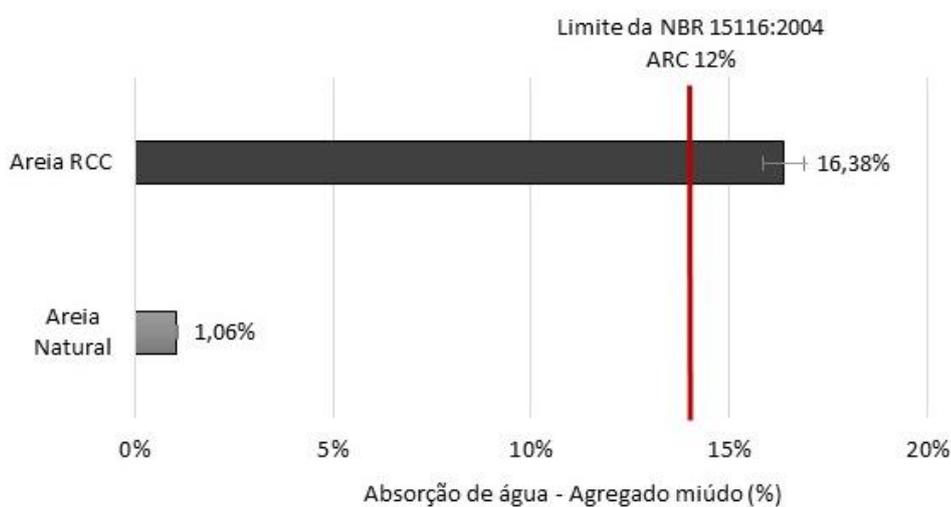


Figura 25 - Valores de absorção de água dos agregados miúdos
Fonte: Autoria própria (2017)

Pode-se observar que, conforme indica a literatura (BARROS; FUCALE, 2016; CORINALDESI, 2010; HERMANN, 2016; LEITE, 2001), o valor de absorção da areia ARC é maior do que a areia natural. Essa diferença para os materiais analisados chegou a mais de 15 vezes.

Segundo Leite (2001), os valores de absorção geralmente encontrados para agregados miúdos convencionais variam de 1,0 a 2,5%, logo o valor de 1,06% encontrado no material em questão está dentro do esperado.

A areia ARC apresentou absorção maior que o limite recomendado pela norma para agregados reciclados de concreto. Uma possível justificativa para a maior absorção desse material é a presença de argamassa nas partículas que, pela natureza porosa, aumenta a absorção do agregado.

Na Figura 26 são apresentados os resultados referentes à absorção dos agregados graúdos.

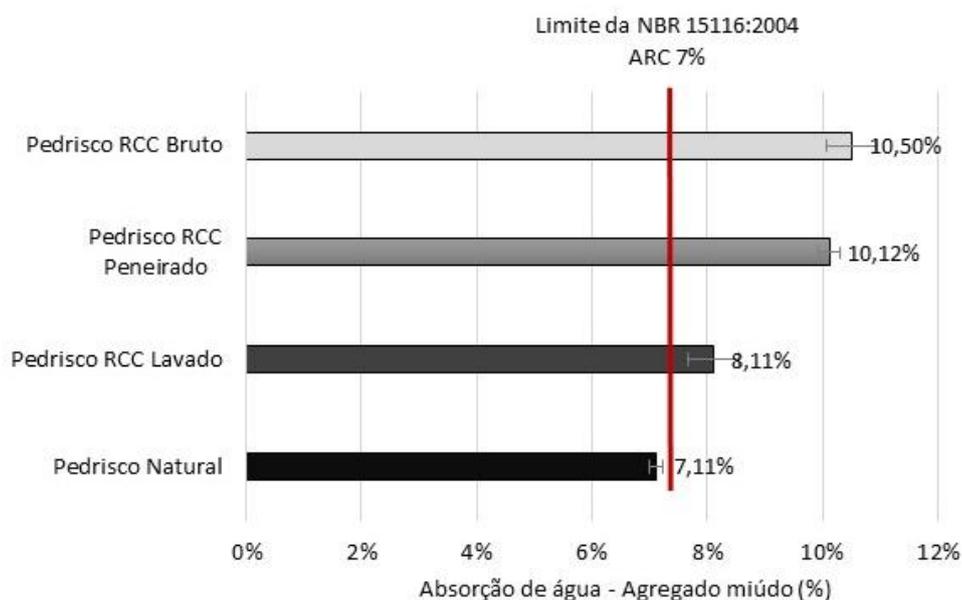


Figura 26 - Valores de absorção de água dos agregados graúdos
Fonte: Autoria própria (2017)

Da mesma forma que ocorreu com os agregados miúdos ARC, os agregados graúdos reciclados também apresentaram absorção maior do que o agregado graúdo natural.

Houve diferença entre as taxas de absorção dos agregados graúdo ARC bruto, lavado e peneirado. A diferença entre o primeiro e o segundo deu-se, pois,

ao ser peneirado o pedrisco ARC bruto deixou de apresentar parcela significativa de partículas passantes na peneira 4,75 mm, a qual tem maior probabilidade de serem compostas por argamassas porosas, diminuindo assim a absorção.

A diminuição da absorção encontrada entre o pedrisco de ARC peneirado e lavado ocorreu pois, no processo de lavagem dos agregados em betoneira, parte da camada de argamassa das partículas, a qual é mais porosa que o restante do material se desprende. A diminuição da porosidade no pedrisco de ARC lavado em relação ao peneirado pode ser observada também no ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio.

Porém, observa-se que os valores encontrados para absorção dos agregados graúdos de ARC não atendem ao limite de 7% estabelecido pela norma NBR 15116 (ABNT, 2004) para o agregado reciclado de concreto.

Outras normas internacionais impõem limites ainda mais rígidos dependendo do uso pretendido para o agregado graúdo reciclado. A norma japonesa estabelece limites para três classes de agregado reciclado:

- classe I, com limite de absorção de água de 3%, é recomendada para uso em concreto estrutural;
- classe II, com limite de absorção de 5%, recomendada para concretos não estruturais, e;
- classe III para concretos não estruturais e material base para pavimentos, com limite de absorção de 7% (JUAN, 2004; KASAI, 1996; TOMOSAWA; NOGUCHI, 2000).

O material pulverulento é a fração com dimensão inferior a 0,075 mm. Na Figura 27 é possível observar os resultados obtidos a partir dos ensaios de teor de materiais pulverulentos para o agregado miúdo.

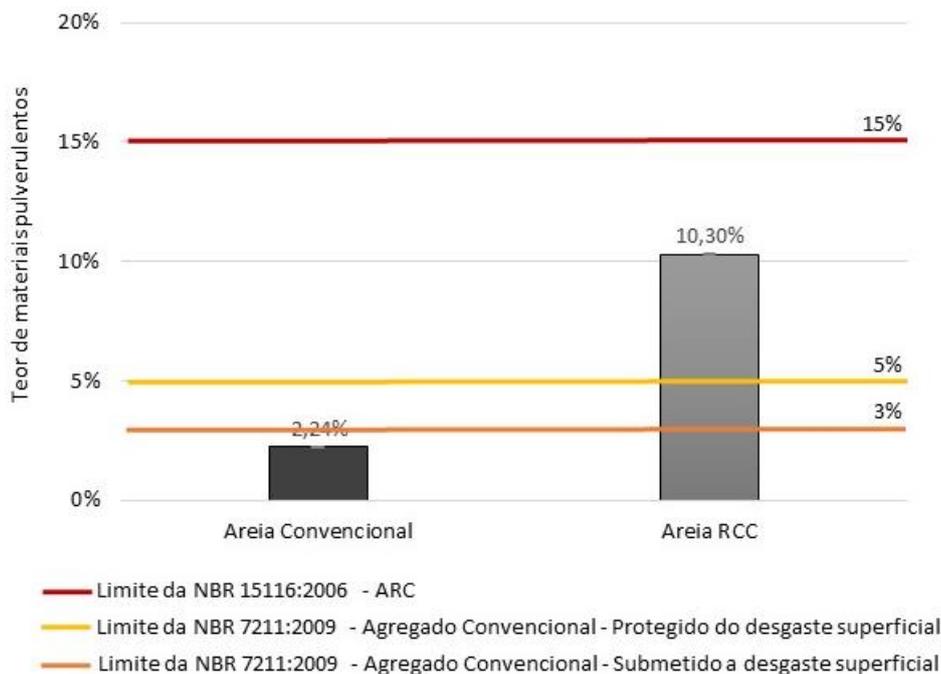


Figura 27 - Teor de materiais pulverulentos dos agregados miúdos
Fonte: Autoria própria (2017)

Pode-se observar que quando comparados aos limites impostos pelas normas quanto ao teor de material pulverulento, tanto a areia natural quanto a areia ARC atendem aos respectivos teores máximos exigidos de 3% e 5% para agregado convencional, respectivamente submetido a desgaste superficial e protegido de desgaste superficial, quanto o de 15% para agregado reciclado de concreto. Porém, observa-se que o teor de materiais pulverulentos da areia ARC apresenta maior valor em comparação a areia natural, fato que confirma o exposto na literatura sobre o elevado teor de materiais pulverulentos em agregados reciclados.

Na Figura 28 são apresentados os resultados obtidos para os ensaios de material pulverulento dos agregados graúdos.

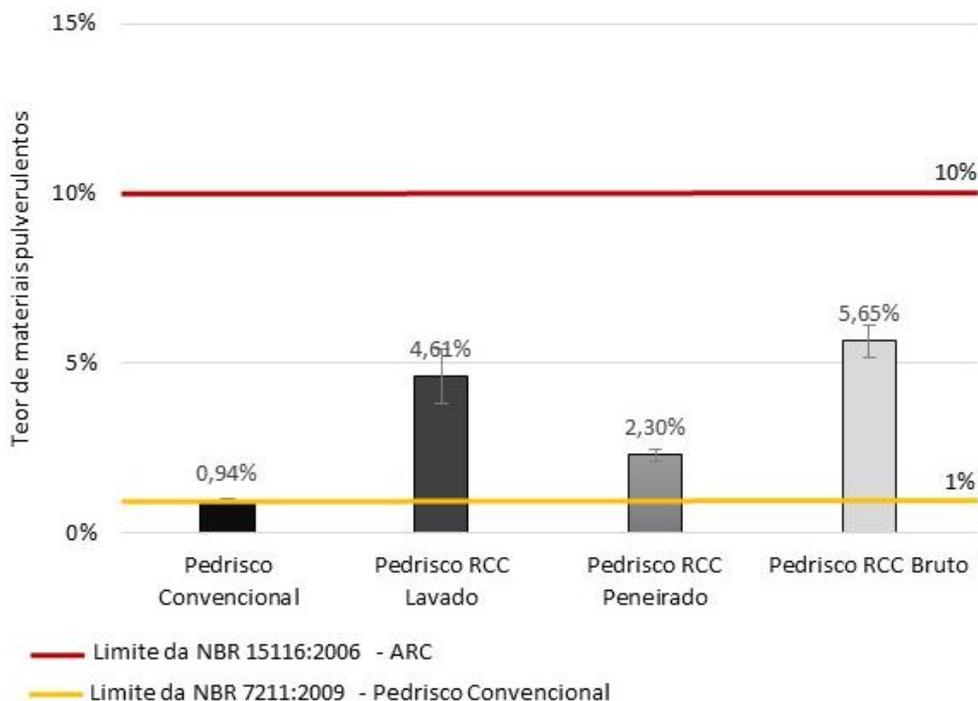


Figura 28 - Teor de materiais pulverulentos dos agregados graúdos
Fonte: Autoria própria (2017)

Observa-se que, de modo similar aos agregados miúdos, tanto o pedrisco natural quanto o pedrisco ARC apresentaram valores de material pulverulento que atendem ao estabelecido para cada um pelas normas brasileiras.

Quando o pedrisco bruto foi peneirado houve uma queda de 5,61 % para 2,30 % no material pulverulento. Esse resultado era esperado, pois no processo de peneiramento foi retirado do pedrisco grande parte da fração passante na peneira 4,75 mm, ficando apenas a parte das partículas que se encontrava aderida no agregado graúdo.

Conforme previsto houve um aumento no teor de material pulverulento do pedrisco peneirado para o lavado, de 2,30% para 4,63%. Isso ocorreu, provavelmente devido ao processo de lavagem com remoção de parte da capa de argamassa, que recobre as partículas do agregado graúdo se soltou e quebrou com o atrito, gerando desta forma partículas mais finas. Todos permaneceram dentro dos limites da NBR 15116 (ABNT, 2004).

A maior quantidade de finos encontrado em agregados provenientes de ARC, desde que não apresentem características prejudiciais, podem beneficiar algumas características do concreto: os microfins podem ajudar no empacotamento e melhorar a interface das partículas com a pasta. Porém pode ser

prejudicial nos concretos submetidos à abrasão ou a ciclos de gelo e degelo (NEVILLE, 1995).

Um teor elevado de material pulverulento pode demandar maior necessidade de água no concreto para manter a trabalhabilidade, o que pode resultar em uma diminuição da resistência e um aumento no custo, devido ao maior consumo de cimento. Outros autores (BARROS; FUCALE, 2016; BUTTLER, 2007; HERMANN, 2016) encontraram teores de material pulverulento variando entre 0,5 e 12,5%. Logo, os valores encontrados nesta pesquisa estão dentro da faixa encontrada na literatura.

Nas Figura 29 e Figura 30 pode-se observar os resultados obtidos para massa unitária no estado solto e compactado dos agregados miúdo e graúdo, respectivamente.

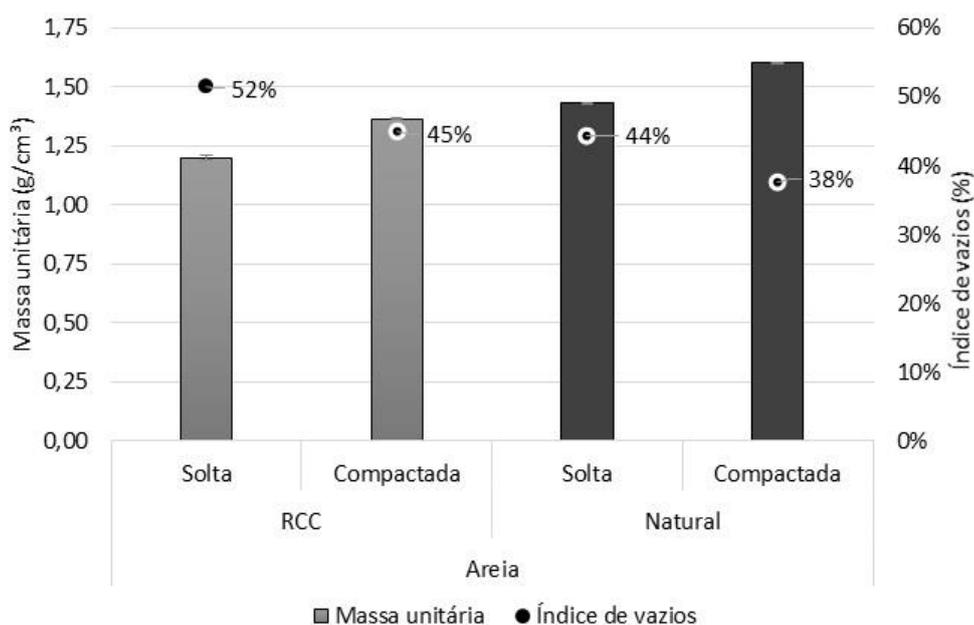


Figura 29 - Massa unitária no estado solto e compactado dos agregados miúdos
Fonte: Autoria própria (2017)

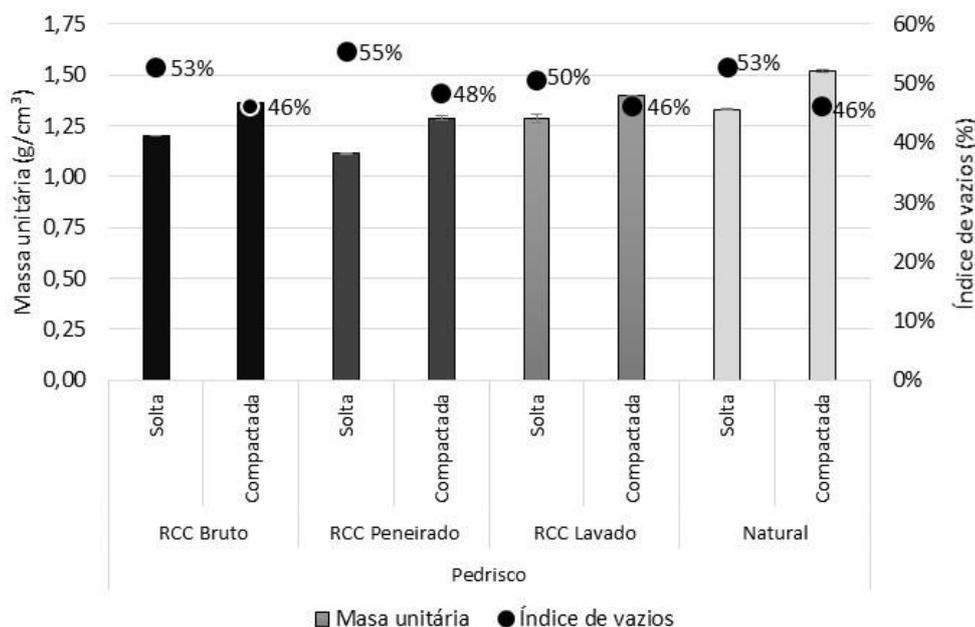


Figura 30 - Massa unitária no estado solto e compactado dos agregados graúdos
Fonte: Autoria própria (2017)

É consenso na literatura que a massa unitária dos agregados reciclados apresentam, em geral, valores um pouco menores do que os apresentados pelos agregados naturais (LEITE, 2001), em geral de 5 a 10% menores, podendo esse percentual variar dependendo da origem e granulometria do material britado (BAZUCO, 1999).

Desta forma, a massa unitária da areia de ARC apresentou valores menores que a areia natural, tanto no estado solto quanto no estado compactado, cerca de 15% menor. O mesmo ocorreu com o pedrisco de ARC em comparação com o pedrisco natural, de 8 a 15% menor.

O pedrisco ARC nos estados bruto e lavado apresentaram maior massa unitária do que peneirado. Isso se deve ao fato do pedrisco bruto e lavado apresentarem maior quantidade de partículas de menor dimensão, fato que promove melhor acomodação de partículas em uma mesma unidade de volume.

A areia natural apresenta um menor índice de vazios tanto no estado solto quanto no estado compactado quando comparada à areia ARC. Porém, a diferença entre o índice de vazios do estado solto para o estado compactado da areia ARC é maior. Isto pode indicar que um concreto com este material tenha um melhor empacotamento e travamento quando submetido à processos de vibração, como o caso do concreto em estudo. Essa diminuição do índice de vazios no estado

compactado pode estar relacionada com a baixa resistência da camada de argamassa que envolve as partículas. Ao ser compactada a argamassa quebra em partículas menores, as quais preenchem os espaços entre as partículas de areia.

Para os agregados graúdos, tanto natural quanto as variações de ARC (bruto, peneirado e lavado) não houve diferença significativa, a um índice de 5% de significância, entre os valores de índice de vazios tanto no estado solto quanto no compactado.

Os valores próximos de índice de vazios indicam que as quantidades de pasta necessária para garantir a trabalhabilidade seriam próximas quando alternados os materiais.

De posse dos resultados obtidos por meio das imagens das partículas das frações de 2,38 mm; 4,75 mm; 6,35 mm, e; 9,50 mm, foi possível calcular o coeficiente de forma dos agregados, como são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Coeficiente de forma dos agregados graúdos

Fração	Natural		Bruto		Peneirado		Lavado	
	% retida	CF da fração	% retida	CF da fração	% retida	CF da fração	% retida	CF da fração
2,38	5,47 %	0,148	0,65 %	0,301	0,20 %	0,307	5,88 %	0,189
4,75	31,96 %	0,114	35,37 %	0,302	42,03 %	0,308	24,66 %	0,209
6,35	33,06 %	0,174	35,73 %	0,191	44,32 %	0,195	23,11 %	0,188
9,5	0,25 %	0,124	2,51 %	0,244	1,33 %	0,249	1,78 %	0,200
CF Médio agregado graúdo		0,145		0,247		0,250		0,198

Fonte: Autoria própria (2017)

Considerando-se que, quanto mais próximo a 1,0, mais arredondada é a forma da partícula, a partir dos resultados obtidos pode-se concluir que o pedrisco ARC peneirado é o agregado graúdo que apresenta o formato mais arredondado. Isso se deve à camada de argamassa que fica aderida às partículas e suavizam as arestas, tornando-os com formato mais próximos ao de esferas.

A norma francesa XP P18-540 (AFNOR, 1997) recomenda o limite mínimo para o coeficiente volumétrico de forma igual a 0,20 para concretos estruturais armados e 0,15 para concretos pouco ou não armados. Desta forma, o agregado graúdo ARC peneirado atende às exigências desta norma, podendo ser usado para qualquer aplicação. Outras normas, como a espanhola UNE 7.238:1971, que utiliza

a mesma metodologia da norma francesa para obtenção do coeficiente de forma, aponta o mesmo limite de 0,20 para concretos estruturais armados.

O agregado natural, por apresentar forma mais lamelar e arestas mais definidas, apresentou coeficiente volumétrico de forma inferior aos apresentados pelos agregados reciclados. O detalhe do formato pode ser observado na Figura 31.



Figura 31 - (a) Partículas do agregado gráúdo natural e (b) detalhe do formato das partículas.

Fonte: Autoria própria (2017)

Houve uma diminuição do coeficiente de forma do pedrisco ARC peneirado para o lavado, e esse fato provavelmente se deve a quebra da capa de argamassa que envolve as partículas, o que faz com que o agregado natural mais anguloso abaixo da capa fique mais visível, conforme pode ser observado nas Figura 32 e Figura 33.



Figura 32 - (a) Partículas do agregado gráúdo ARC peneirado e (b) detalhe do formato e capa de argamassa ao redor das partículas.

Fonte: Autoria própria (2017)



Figura 33 - (a) Partículas do agregado graúdo ARC lavado e (b) detalhe do formato e menor capa de argamassa ao redor das partículas.
Fonte: Autoria própria (2017)

Em uma imagem ampliada dos agregados reciclados peneirado e lavado é possível observar a diferença na quantidade de argamassa aderida às partículas, conforme apresentado na Figura 34.

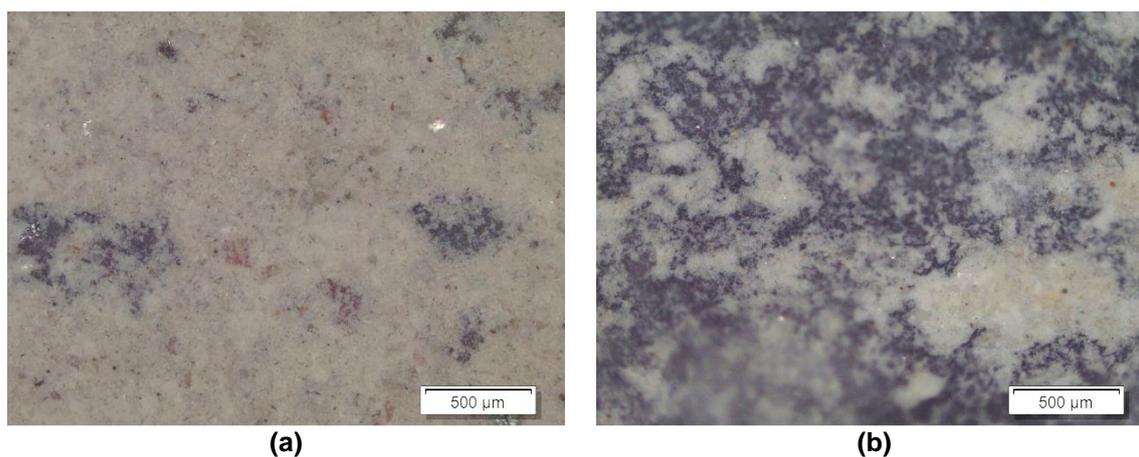


Figura 34 - Detalhe da partícula do agregado natural (a) peneirado e (b) lavado.
Fonte: Autoria própria (2017)

Na Tabela 19 são apresentados os resultados do ensaio de perda de massa por abrasão Los Angeles.

Tabela 19 - Porcentagem de perda de massa por abrasão Los Angeles

Material	Perda
Pedrisco Natural	27,98 %
Pedrisco ARC Bruto	38,00 %
Pedrisco ARC Peneirado	38,00 %
Pedrisco ARC Lavado	33,93 %

Fonte: Autoria própria (2017)

Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009) a máxima perda de massa permitida por abrasão Los Angeles é de 50%. Desta forma todos os agregados estudados encontram-se dentro do determinado pela referida norma. Analisando-se a Tabela 19 pode-se observar que há diferença entre os valores de perda de massa por abrasão Los Angeles apresentado pelo agregado natural e os agregados reciclados. O pedrisco ARC bruto e peneirado apresentaram perda por abrasão Los Angeles cerca de 36% maior do que a encontrada para o agregado natural. Esse valor está dentro do intervalo encontrado na literatura, que relata valores de abrasão Los Angeles de 20 a 50% maiores para os agregados reciclados em relação aos agregados naturais (BAZUCO, 1999; HANSEN; NARUD, 1983; LEVY, 1997).

Quanto ao agregado lavado, a perda por abrasão foi 21% maior que o agregado natural. Porém, 10% menor que a apresentada pelos demais agregados reciclados, fato devido à previa quebra da capa de argamassa, que ocorreu no próprio processo de lavagem do agregado, como foi possível observar nos ensaios anteriores já apresentados. Desta forma, o ensaio de perda de massa por abrasão Los Angeles reforça a teoria que ocorre a quebra da capa de argamassa dos agregados durante o processo de produção do concreto.

Fica demonstrado nas figuras apresentadas que após passar pelo processo de lavagem na betoneira a capa de argamassa realmente se quebra e as partículas ficam menos arredondas, como evidenciado também pelos resultados obtidos na distribuição granulométrica, material pulverulento, massa unitária e abrasão Los Angeles. Também fica evidente a diferença de forma entre os agregados reciclados e o natural, o que corrobora os cálculos apresentados para o coeficiente volumétrico de forma.

4.1.1 Composição entre Agregados

Nesta fase da pesquisa foi determinado o melhor empacotamento entre os agregados de ARC. Para isso foi avaliada a massa unitária compactada com diversas composições entre os agregados.

Como demonstrado na distribuição granulométrica do pedrisco (Figura 21), no processo de mistura do concreto parte da capa de argamassa dos agregados

graúdos se desprende das partículas, alterando a distribuição granulométrica deste agregado. Visando contemplar esse fato um estudo da composição entre agregados também foi realizado com o pedrisco ARC lavado, que representa da melhor forma a distribuição e forma do agregado dentro da mistura do concreto.

São apresentadas, na Figura 35, as diversas combinações realizadas entre areia e pedrisco peneirado, ambos ARC e, na Figura 36, as composições entre a areia e pedrisco lavado, também ambos ARC, bem como a massa unitária e índice de vazios no estado compactado para cada uma delas.

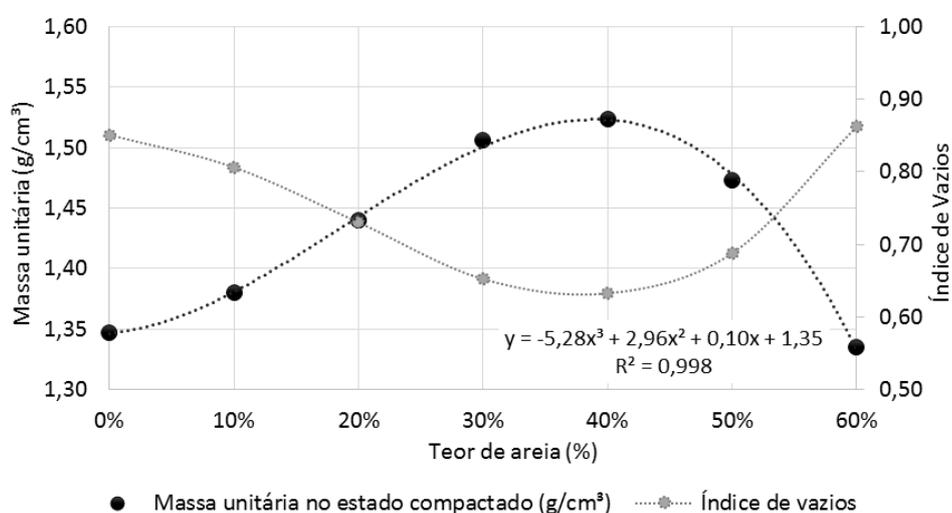


Figura 35 - Massa unitária compactada das composições entre areia e pedrisco peneirado, ambos de ARC
Fonte: Autoria própria (2017)

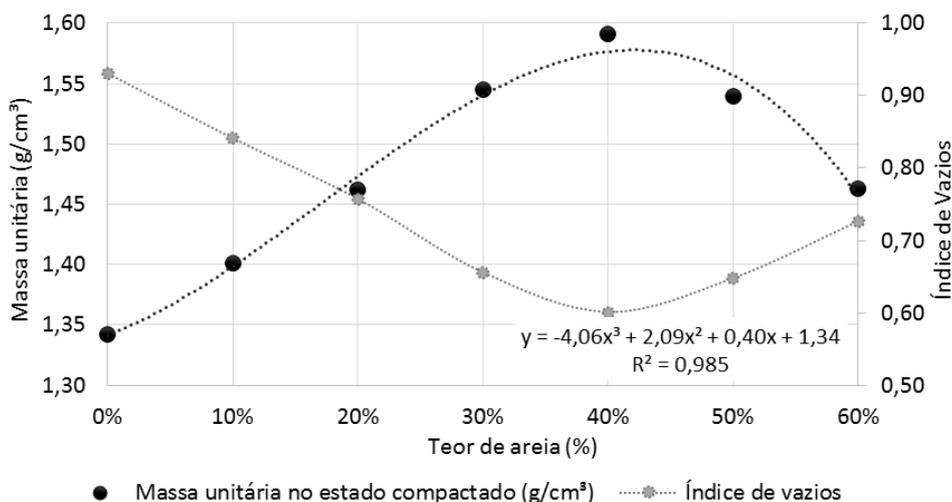


Figura 36 - Massa unitária compactada das composições entre areia e pedrisco ARC lavado
Fonte: Autoria própria (2017)

A análise da Figura 35, a qual representa a combinação de areia com pedrisco peneirado, é possível observar que houve um aumento gradual do valor da massa unitária no estado compactado com o aumento do teor de areia, por este ocupar os vazios entre as partículas maiores, até atingir um valor máximo. Após o teor de 40% ocorreu a tendência de redução da massa unitária devido ao agregado miúdo não mais ocupar somente os vazios deixados pelo agregado graúdo, mas afastar as partículas. Observa-se ainda que as massas unitárias compactadas da combinação entre 60% de pedrisco com 40% de areia foi a que apresentou o maior valor, de 1,52 g/cm³. Observa-se ainda uma equação com boa correção ($R^2 > 0,99$) para os pontos experimentais. O mesmo comportamento pode ser observado na Figura 36, relativo a composição de areia com pedrisco lavado. A correlação entre os pontos também foi elevada ($R^2 > 0,98$), com maior valor de massa unitária em 1,59 g/cm³, relativo a composição de 60% pedrisco ARC e 40% areia ARC. O aumento do valor da massa unitária se deve à diferença entre as distribuições granulométricas dos pedriscos. Como o pedrisco lavado apresenta maior quantidade de partículas mais finas, apresentou maior massa unitária compactada que a composição com o pedrisco peneirado.

Pode-se observar tanto na Figura 35 como na Figura 36, que o índice de vazios acompanha a variação da massa unitária obtida: decresce a partir do valor referente a 0% de areia até atingir um ponto mínimo, a partir do qual volta a aumentar. O valor mínimo encontrado para o índice de vazios refere-se ao ponto da combinação entre 60% de pedrisco de com 40% de areia, tanto para o pedrisco lavado como para o peneirado. Desta forma, e considerando-se que a combinação ideal entre agregados é aquela que possui o maior valor de massa unitária no estado compactado e menor valor para o índice de vazios, a combinação de 60% de pedrisco com 40% de areia, de acordo com esses parâmetros, seria a mais recomendada e foi a utilizada para a produção dos concretos.

4.2 ESTUDO DA PRÉ-MOLHAGEM

Para a definição de qual o teor de pré-molhagem mais adequado para o presente estudo, foi inicialmente definido que seriam realizados testes com os teores de pré-molhagem de 0, 25, 50, 65, 75, 85 e 95%, com o excesso de pasta

de - 15% e a/c de 0,55. Esse teor de pasta e relação a/c foram escolhidos para esse estudo pois é o mais próximo do apresentado pelo traço do concreto referência e, desta forma, seria possível fazer uma comparação da trabalhabilidade.

Ao iniciar os ensaios observou-se que, por se tratar de um concreto com alta porcentagem de agregados e de *no slump*, ao se produzir os traços referente aos teores de 0 e 25% de pasta não foi possível realizar a moldagem, pois o concreto ficou extremamente seco.

Em função destes valores, serão apenas apresentados os resultados referentes aos teores de pré-molhagem de 50, 65, 75, 85 e 95%, que apresentaram melhores condições de serem estudados.

Todas as amostras apresentaram *slump* zero e preservaram a forma após retirado o molde, não sendo observada alteração nas dimensões.

Primeiramente foi avaliado o fator de preservação de forma para os teores de pré-molhagem estudados. O valor referente ao abatimento do tronco de cone foi de 0 mm para todos os teores estudados, caracterizando os traços como *no slump*, conforme apresentado na Figura 37.

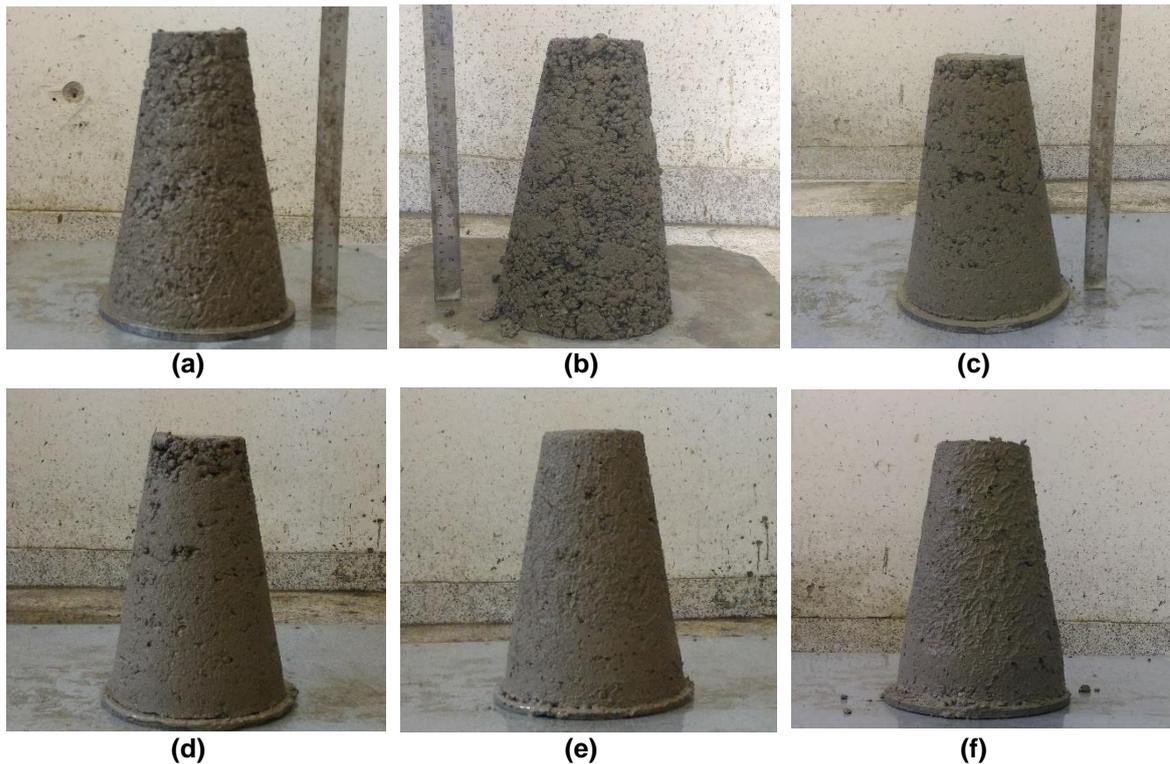


Figura 37 - Slump test para concretos (a) de referência e com pré-molhagem de (b) 50%, (c) 65%, (d) 75%, (e) 85% e (f) 95%
Fonte: Autoria própria (2017)

Fazendo uma análise visual, as cinco composições de concreto com agregados reciclados apresentaram características bastante distintas. O concreto com teor de pré-molhagem de 50%, Figura 37(b) apresentou bastante vazios na superfície da amostra, além de pouca coesão entre as partículas. O concreto com taxa de pré-molhagem de 65%, apesar de apresentar melhor acabamento superficial, ainda assim, apresentou muitas falhas na superfície.

Essa característica pode ser atribuída como consequência do adensamento feito apenas por vibração, e não vibrocompactação, como é realizado em concretos extremamente secos. A energia aplicada nesse caso não foi suficiente para obter uma superfície sem falhas e completo preenchimento dos vazios.

O concreto com pré-molhagem de 75% apresentou menos imperfeições e poros na superfície, indicando um melhor adensamento do concreto, e visualmente não apresenta excesso de umidade. Os concretos com taxas de pré-molhagem de 85% e 95% apresentaram superfície mais uniforme no aspecto de acabamento. Contudo, o excesso de argamassa na base do tronco de cone após a vibração e

aspecto bastante úmido, indicam ar migração da água de pré-molhagem para a matriz do concreto durante o processo de mistura e vibração.

Na Figura 38 podem ser observados os perfis dos troncos de cone após a realização do ensaio do fator de preservação de forma.

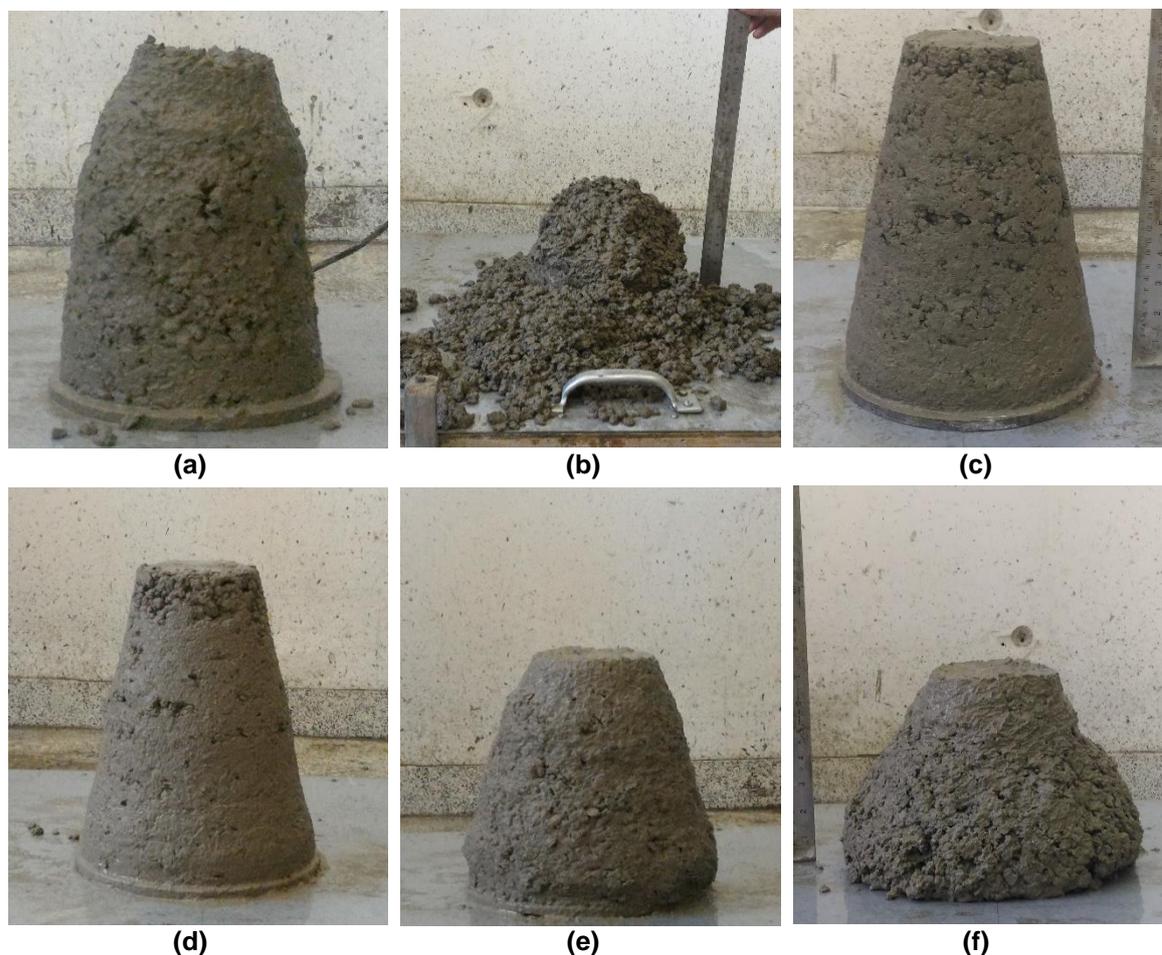


Figura 38 - Ensaio do fator de preservação de forma para concretos (a) referência e com pré-molhagem de (b) 50%, (c) 65%, (d) 75%, (e) 85% e (f) 95%
Fonte: Autoria própria (2017)

Como pode ser observado na Figura 38, o concreto produzido com teor de pré-molhagem de 50% entrou em colapso durante o ensaio, não sendo possível fazer a medida da deformação para o fator de preservação de forma. Este comportamento indica a falta de água de amassamento da mistura e impossibilidade da aplicação, causada possivelmente pela absorção de parte dessa água pelos agregados reciclados. Os valores relativos ao fator de preservação de forma dos demais concretos são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Resultados do ensaio de fator de preservação de forma para diferentes teores de pré-molhagem

Medida	REF - 01	EP- (15) PM 65	EP- (15) PM 75	EP- (15) PM 85	EP- (15) PM 95
FPF	0,94	0,97	0,96	0,88	0,87
Hs/Hi	0,18	0,14	0,12	0,27	0,39
Df/Di	1,04	1,04	1,05	1,07	1,33

Fonte: Autoria própria (2017)

Os quatro teores de pré-molhagem apresentados na Tabela 20 apresentaram $0,7 < \text{FPF} < 1,0$, enquadrando-se na categoria de concreto *no slump*, bem como o valor de FPF obtido para o concreto referência. Os teores de pré-molhagem de 65 e 75% apresentaram valores mais altos de FPF (0,97 e 0,96, respectivamente) e mais próximos ao valor do concreto referência. De acordo com a classificação da Tabela 6, excelente capacidade de preservação de forma após desmolde e necessidade de energia externa para compactação. Essas características são ideais para a produção de artefatos de concreto com vibração, caso do material em estudo.

Os concretos com taxa de pré-molhagem de 85 e 95% também necessitam de energia externa para compactação, porém não apresentam capacidade de preservação de forma similar aquelas com pré-molhagem de 65 e 75%.

Os valores de escoamento (H_s/H_o e D_f/D_o) também demonstram que os teores de pré-molhagem de 65 e 75% são mais adequados para manutenção de forma do concreto, por apresentarem menores valores de escoamento. Os valores obtidos para a relação H_s/H_o foram ainda menores que os encontrados para o concreto referência, demonstrando que esses concretos têm maior capacidade de manter a forma e maior aderência entre as partículas.

Foi realizado também o ensaio de *squeeze-flow* nas amostras com variação no teor de pré-molhagem a fim de verificar como a quantidade de água da pré-molhagem influencia o comportamento reológico do concreto.

A Figura 39 apresenta as curvas de força versus deslocamento das amostras submetidas a uma velocidade de deslocamento do cabeçote de 3 mm/s. Essas curvas foram comparadas à do concreto produzido com agregado natural.

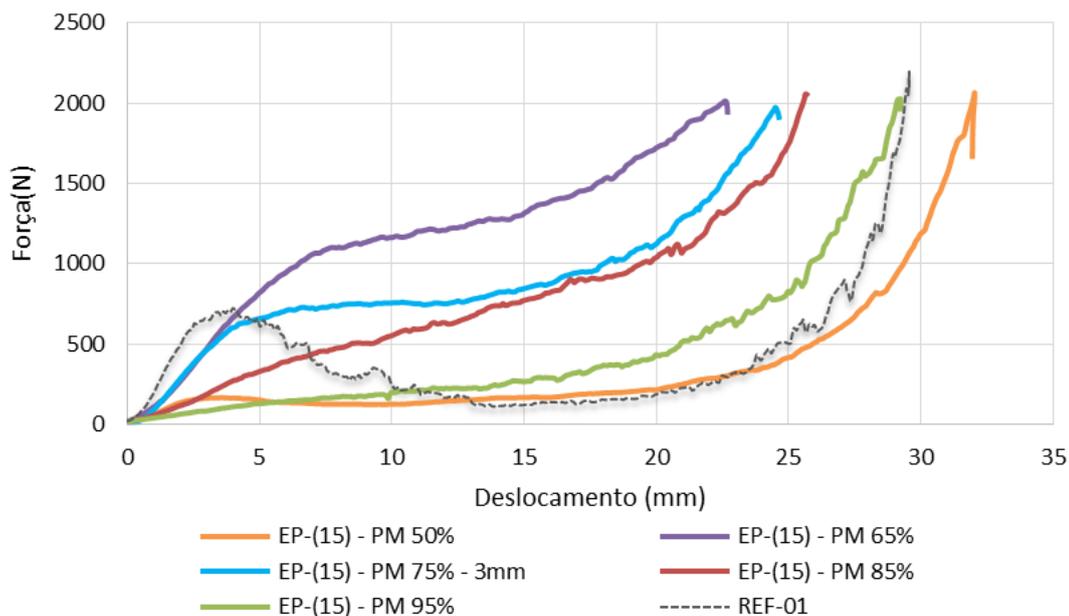


Figura 39 - Perfil da curva força vs deslocamento com velocidade de deslocamento do prato de 3 mm/s para concretos com diferentes teores de pré-molhagem
Fonte: Autoria própria (2017)

O perfil relativo ao concreto referência apresenta no início da curva um pico próximo ao deslocamento de 5 mm. Uma hipótese para esse comportamento é que, após o deslocamento de 5 mm o material desagrega e desmorona, o que causa a queda da força. Com a continuidade do ensaio há novo aumento da força com o deslocamento, que pode ser atribuído à resistência entre as partículas do concreto.

Os concretos contendo agregados reciclados e pré-molhados nas taxas de 50, 65, 75, 85 e 95% apresentaram comportamento semelhante entre si, sem presença de um pico como na amostra referência e um comportamento de aumento crescente na força aplicada ao longo do deslocamento. Esse comportamento de queda da resistência logo no início do ensaio, que não foi observado nos concretos com agregados reciclados, pode estar ligado a maior porosidade dos agregados de ARC, que promovem um maior ancoramento com a pasta.

Na amostra referência, nota-se um grande ruído na leitura da carga, fato que sugere ocorrência de altos níveis de cisalhamento interno no material. No caso das amostras com ARC, foi observada a interferência da umidade no atrito entre as partículas, pois o ruído atribuído ao atrito foi reduzido com o aumento do teor da pré-molhagem.

A Tabela 21 apresenta força necessária para deslocamento de 20 mm das amostras estudadas.

Tabela 21 - Carga no ensaio *squeeze-flow* para um deslocamento de 20 mm

Amostra	Força (N)
EP - (15) - PM 50%	218,66
EP - (15) - PM 65%	1727,90
EP - (15) - PM 75%	1123,60
EP - (15) - PM 85%	1046,50
EP - (15) - PM 95%	435,25

Fonte: Autoria própria (2017)

Analisando a Tabela 21, percebe-se que a necessidade de força para o deslocamento de 20 mm na amostra com PM 50 % é muito menor que as demais. Este fato é devido à falta de coesão entre as partículas, fazendo com que o material não mantenha a integridade durante o ensaio, como demonstrado na Figura 40. Neste caso, o baixo teor de pré-molhagem fez com que o agregado reciclado absorvesse grande parte da água de amassamento, sendo que a água que ficou livre para a pasta não foi suficiente para manter a integridade do material.

Com o aumento dos teores de pré-molhagem há um aumento na força para o deslocamento proposto, sendo a PM 65% aquela que apresentou maior resistência ao deslocamento. A partir desse ponto é possível que a água de pré-molhagem já esteja presente na superfície dos agregados e até mesmo migre para a pasta, fazendo com que haja maior deslizamento entre os agregados. Esse deslizamento facilita a mobilidade da massa de concreto, fazendo com que a força necessária diminua gradativamente, sendo que para a PM 95% reduz bruscamente.

A maior resistência ao deslocamento apresentada pela PM 65% pode ser indicativo do baixo teor de pré-molhagem, permitindo que os agregados absorvam parte da água de amassamento. Isto faz com que a ligação entre eles e a pasta seja mais forte. Porém já sendo uma taxa de pré-molhagem suficiente para manter a integridade da amostra. Apesar desta maior resistência ao deslocamento, esse fenômeno pode contribuir negativamente para a resistência mecânica do concreto, pois haverá menor quantidade de água para as reações de hidratação de concreto, fator que será discutido nos ensaios de resistência à compressão.

A análise visual das amostras foi de fundamental importância na interpretação das curvas resultantes do ensaio de *squeeze-flow*. No caso do concreto com pré-molhagem de 50%, observa-se que no ensaio a amostra atingiu a força máxima de 2.000 N para um elevado deslocamento ,32 mm. Esse fato, conforme já apresentado, pode ser justificado pela tendência de desagregação do concreto devido à falta de aderência entre as partículas, observada na Figura 40.

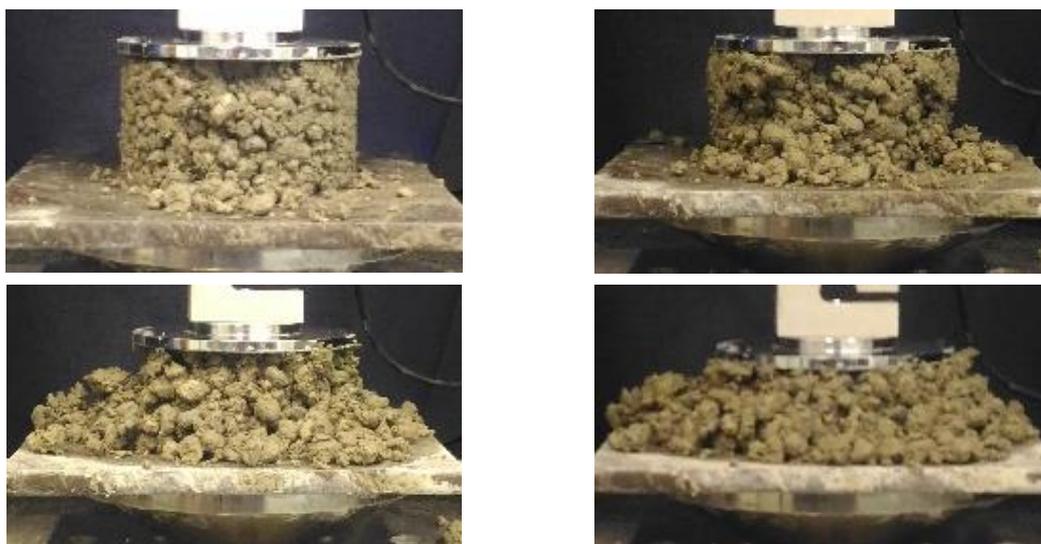


Figura 40 - Evolução do ensaio *squeeze-flow* do concreto com teor de pré-molhagem de 50%

Fonte: Autoria própria (2017).

Portanto pode-se concluir que a pré-molhagem de 50% não foi suficiente para dar trabalhabilidade ao concreto e garantir que as partículas do concreto permanecessem unidas durante o ensaio.

O concreto produzido com a taxa de pré-molhagem de 65% apresentou aspecto seco e algumas falhas na superfície tanto durante a moldagem do tronco de cone para o ensaio de *slump test*, como na superfície dos corpos de prova. No ensaio de *squeeze-flow*, o comportamento do concreto demandou uma elevada relação força / deformação, representado por uma grande inclinação na curva, ao contrário dos concretos com maiores taxas de pré-molhagem. A parte da curva relativa à deformação plástica (estágio II) apresentou maior inclinação do que a referente ao concreto com pré-molhagem de 50%, e visualmente durante o ensaio não houve desagregação. Esses fatos indicam que, com a pré-molhagem de 65%, o concreto não apresentou capacidade de escoar com baixas forças aplicadas, o

que, juntamente com o aspecto superficial e com a alta da força necessária para deslocamento, apresentada na Tabela 21, indicam que este seria um concreto apresentaria uma possível dificuldade de moldagem apenas com vibração, método de moldagem do concreto em estudo.

O concreto com taxa de pré-molhagem de 75% foi o que apresentou visualmente as características mais semelhantes ao concreto referência. A superfície apresentou-se mais uniforme e com menos falhas, e sem excesso de umidade ou de pasta. A Figura 41 apresenta o comportamento da amostra durante o ensaio de *squeeze-flow*.



Figura 41 - Evolução do ensaio *squeeze-flow* do concreto com teor de pré-molhagem de 75%

Fonte: Autoria própria (2017).

Como pode ser observado na Figura 41, durante o ensaio o concreto nesta condição não apresentou elevada plasticidade ou escoamento, e também não sofreu desagregação logo no início do ensaio. Nota-se, ainda, que esta amostra necessitou de uma aplicação de força média para um deslocamento de 20 mm, não tão alta quanto a necessária para a PM 65%, nem tão baixa quanto para a PM 95%. Este comportamento comprova que esta taxa de pré-molhagem possibilita um concreto com alta compacidade após vibrado e boa adesão entre as partículas da amostra, o que favorece a moldagem das peças e posterior manutenção das

dimensões após a retirada da forma, características importantes para produção de pré-fabricados.

O concreto com taxa de pré-molhagem de 85% apresentou perfil de comportamento muito próximo àquele 75%. Porém, visualmente apresentou aspecto mais úmido e excesso de pasta, principalmente durante o processo de vibração quando houve, inclusive, expulsão de parte da pasta pela extremidade inferior do molde. A força necessária para o deslocamento foi menor, devido à maior lubrificação entre as partículas. Esses fatores indicam que possivelmente parte da água de pré-molhagem migrou para a pasta do concreto, aumentando a relação a/c , o que pode influenciar negativamente na resistência à compressão do concreto no estado endurecido.

No concreto com taxa de pré-molhagem de 95% fica ainda mais evidente a hipótese de que parte da água utilizada para pré-molhagem dos agregados migra para a matriz, uma vez que apresentou maior trabalhabilidade e aspecto mais úmido que o concreto referência. Nesta condição, quantidade de pasta expulsa pela parte inferior do molde durante o processo de vibração foi a maior entre todas. Essa característica pode ser observada na sequência das fotos do ensaio, mostradas na Figura 42.

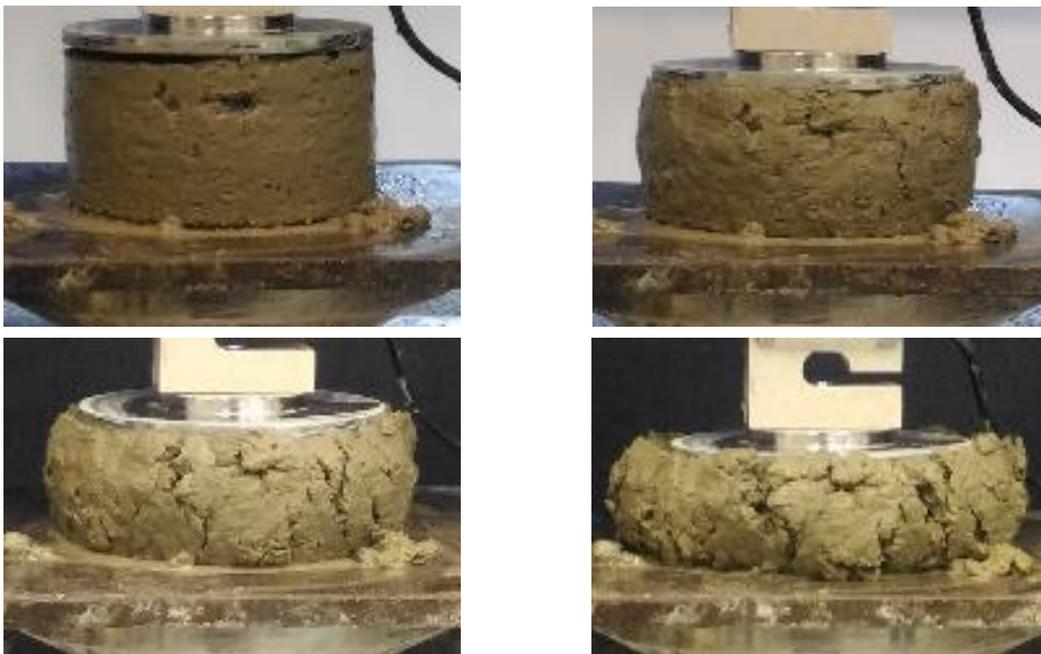


Figura 42 - Evolução do ensaio *squeeze-flow* do concreto com teor de pré-molhagem de 95%

Fonte: Autoria própria (2017)

O concreto com teor pré-molhagem de 95% sofreu grande deformação e a força necessária para o deslocamento de 20 mm sofreu uma queda brusca em relação à PM 85% (de 1046,50N para 435,25N), mas não apresentou desagregação das partículas. A água de pré-molhagem, que possivelmente migrou em maior quantidade para a pasta, faz com que o concreto PM 95% sofra um escoamento maior devido a facilidade que os agregados têm em se movimentarem devido à lubrificação promovida por esse acréscimo de água.

A comparação entre as curvas relativas às taxas de pré-molhagem de 75, 85 e 95% mostram que houve uma redução de carga aplicada para um mesmo deslocamento do prato superior. Isso indica um aumento da plasticidade devido a diminuição do atrito entre partículas, causado provavelmente pela maior quantidade de água nos capilares e na superfície, o que diminui a viscosidade da pasta.

O ensaio de resistência mecânica à compressão foi realizado a fim de verificar como a pré-molhagem influencia na resistência mecânica das amostras.

A resistência mecânica à compressão axial em função do teor de pré-molhagem é apresentada na Figura 43. Devido à dificuldade de adensamento, as amostras da pré-molhagem de 50% não apresentaram desempenho mecânico após desmoldagem, desta forma, os valores não são apresentados.

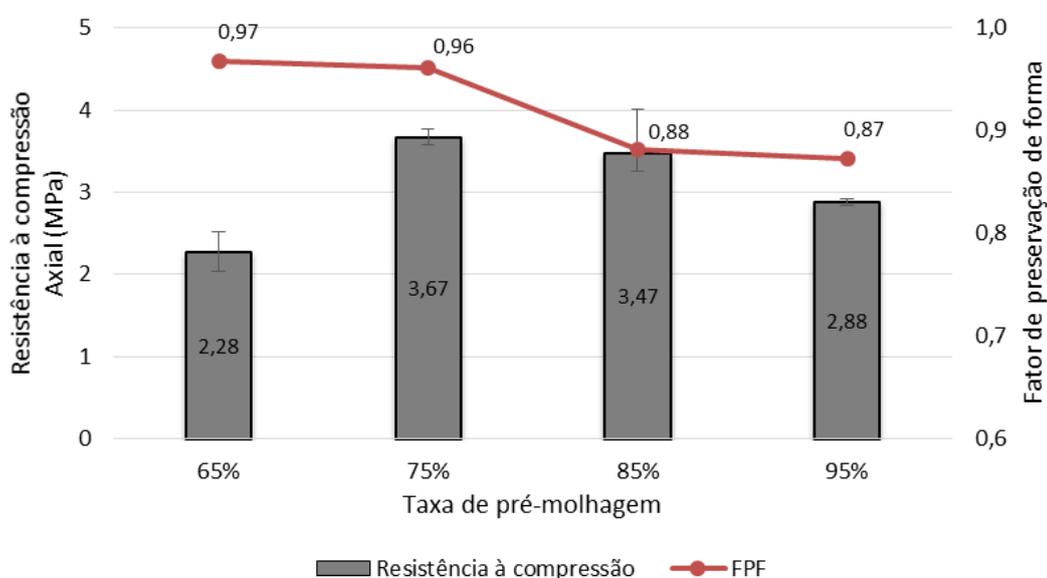


Figura 43 - Resistência à compressão e fator de preservação de forma axial para diferentes taxas de pré-molhagem
 Fonte: Autoria própria (2017)

A partir dos resultados de resistência à compressão apresentados na Figura 43, nota-se que a resistência mecânica tem um aumento com o incremento da taxa de pré-molhagem de 65 para 75%, e reduz quando a pré-molhagem aumenta de 85 para 95%. Na análise multivariada (ANOVA), para um nível de significância de 5%, comprova-se que a taxa de pré-molhagem influencia nos resultados de resistência à compressão axial. As tabelas com as análises estatísticas realizadas no trabalho são apresentadas nos apêndices. Para identificar quais resistências são estatisticamente diferentes, foi realizada a comparação múltipla de médias (dois a dois) pelo teste Tukey, com nível de significância também de 5%, conforme apresentado na Tabela 22.

Tabela 22 - Resultados do teste de Tukey para a resistência à compressão das amostras pré-molhadas

Teor de pré-molhagem	Média (MPa)	Grupo Tukey	
75%	3,67	a	
85%	3,47	a	b
95%	2,88	b	c
65%	2,28		c

Fonte: Autoria própria (2017)

Neste teste os resultados são apresentados em forma de agrupamentos de categorias que não são consideradas estatisticamente diferentes entre si. As análises estatísticas deste trabalho foram realizadas com o uso do software STATISTICA 10.

Da análise da Tabela 22 pode-se observar que o teor de pré-molhagem de 75% foi o que resultou em uma média de resistência mecânica maior que 65% e 95%, porém não é significativamente diferente do resultado alcançado pela PM 85%. Os teores de 85% e 95% podem ser considerados iguais entre si, ou seja, as médias não diferem significativamente entre elas. O mesmo se pode dizer dos teores de pré-molhagem de 95% e 65%, pois não podem ser considerados significativamente diferentes entre si. Uma hipótese para os menores valores de resistência à compressão encontradas para os concretos com essas taxas de pré-molhagem está ligada com a água: na PM65 é possível que os agregados tenham absorvido parte da água de amassamento, não sendo a água restante suficiente para as reações de hidratação, o que pode ter influenciado na queda da resistência. Para a PM95 é provável que parte da água de pré-molhagem tenha migrado para

a matriz do concreto, aumentando a relação a/c e diminuindo, desta forma, a resistência à compressão axial. Esse comportamento de migração da água também foi observado no ensaio de *squeeze-flow*.

Quando analisados conjuntamente os resultados de resistência à compressão axial com o fator de preservação de forma pode-se perceber que não há uma correlação direta. Pode-se encontrar um FPF alto para uma resistência mais baixa, como é o caso da PM 65%, e um FPF baixo para uma resistência à compressão mais alta, caso da PM 85%. Dessa forma, conclui-se que os ensaios de *slump test* e o do fator de preservação de forma não são, isoladamente, indicativos de desempenho mecânico. Porém, a análise desses ensaios em conjunto com o de resistência à compressão axial fornece subsídios para a determinação de qual taxa de pré-molhagem é mais adequada para o agregado reciclado.

No *squeeze-flow*, por tratar-se de um ensaio reológico de dois pontos, mostrou-se mais sensível à variação da trabalhabilidade do concreto, sendo mais completo na informação de parâmetros para a decisão de qual a taxa de pré-molhagem mais adequada.

A Figura 44 mostra a correlação entre os ensaios de *squeeze-flow* e o fator de preservação de forma.

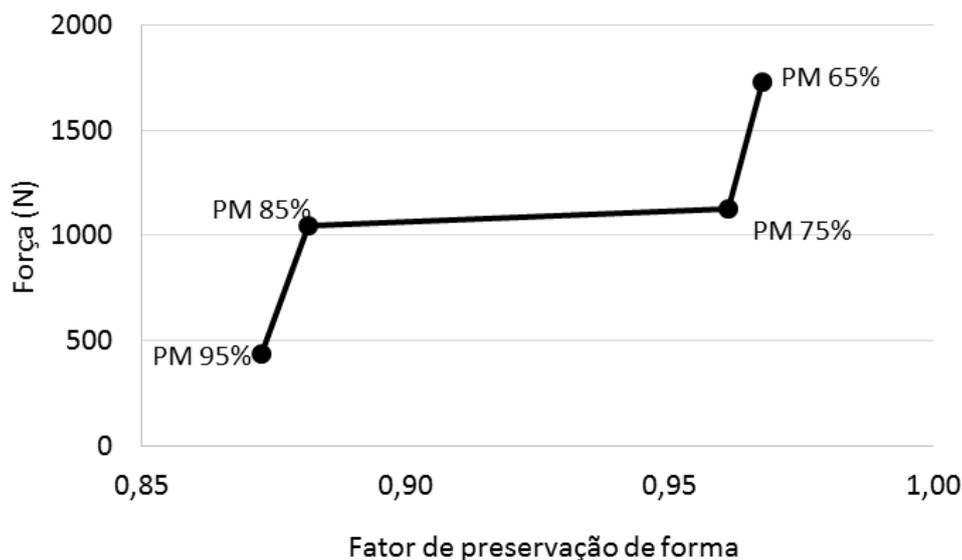


Figura 44 - Força aplicada para deslocamento de 20mm no ensaio de *squeeze-flow* vs fator de preservação de forma para diferentes taxas de pré-molhagem
 Fonte: Autoria própria (2017)

No gráfico apresentado na Figura 44 os valores de fator de preservação de forma foram correlacionados com os apresentados na Tabela 21. Da análise da Figura 44 é possível observar que existe uma tendência de aumento da força necessária no ensaio de *squeeze-flow* com o aumento do FPF. Associando os resultados da Figura 44 com os da Tabela 25, têm-se uma correlação, uma vez que tanto o aumento da força como o aumento do FPF estão atrelados ao menor teor de água e a maior aderência entre as partículas. Contudo, é possível observar que para a faixa referente ao FPF de 0,88 a 0,96 a força aplicada no ensaio de *squeeze-flow* foi praticamente constante. Dessa forma, é possível concluir que o ensaio do fator de preservação de forma possui sensibilidade para caracterizar o concreto *no slump*. Porém, isoladamente não fornece subsídios suficientes para a análise do comportamento do concreto, podendo ser utilizado como ensaio auxiliar na interpretação do *squeeze-flow*, o qual fornece resultados mais sensíveis sobre o comportamento do concreto no estado fresco.

Analisando os resultados apresentados e as características do processo de fabricação de artefatos de concreto, com a retirada imediata da forma após a vibração do concreto, a pré-molhagem utilizando a compensação de 75% da absorção dos agregados é a potencialmente mais favorável, uma vez que apresenta alto fator de preservação da forma e não apresentou desagregação durante o ensaio de *squeeze-flow*. Além disso, foi o teor que resultou em maior valor de resistência à compressão e bom acabamento superficial, o que garante boas características às peças pré-fabricadas. Outros teores de pré-molhagem apresentaram características não favoráveis, como segregação dos agregados e baixa resistência. Desta forma, a taxa de pré-molhagem de 75% foi adotada para todos os concretos produzidos para o estudo da composição.

4.3 ESTUDO DA COMPOSIÇÃO

Para o estudo de qual combinação entre relação água/cimento e porcentagem de excesso de pasta traria melhores resultados de compressão e manteriam a trabalhabilidade e acabamento superficial necessários, foram desenvolvidos nove traços, baseados na teoria do excesso de pasta, para

realização dos ensaios de *slump test*, fator de preservação de forma, *squeeze-flow* e resistência à compressão.

Os resultados desses ensaios são apresentados e discutidos nos tópicos seguintes.

Para todos os traços estudados o valor de abatimento no *slump test* foi nulo, caracterizando os concretos estudados como *no slump*, conforme apresentado na Figura 45.

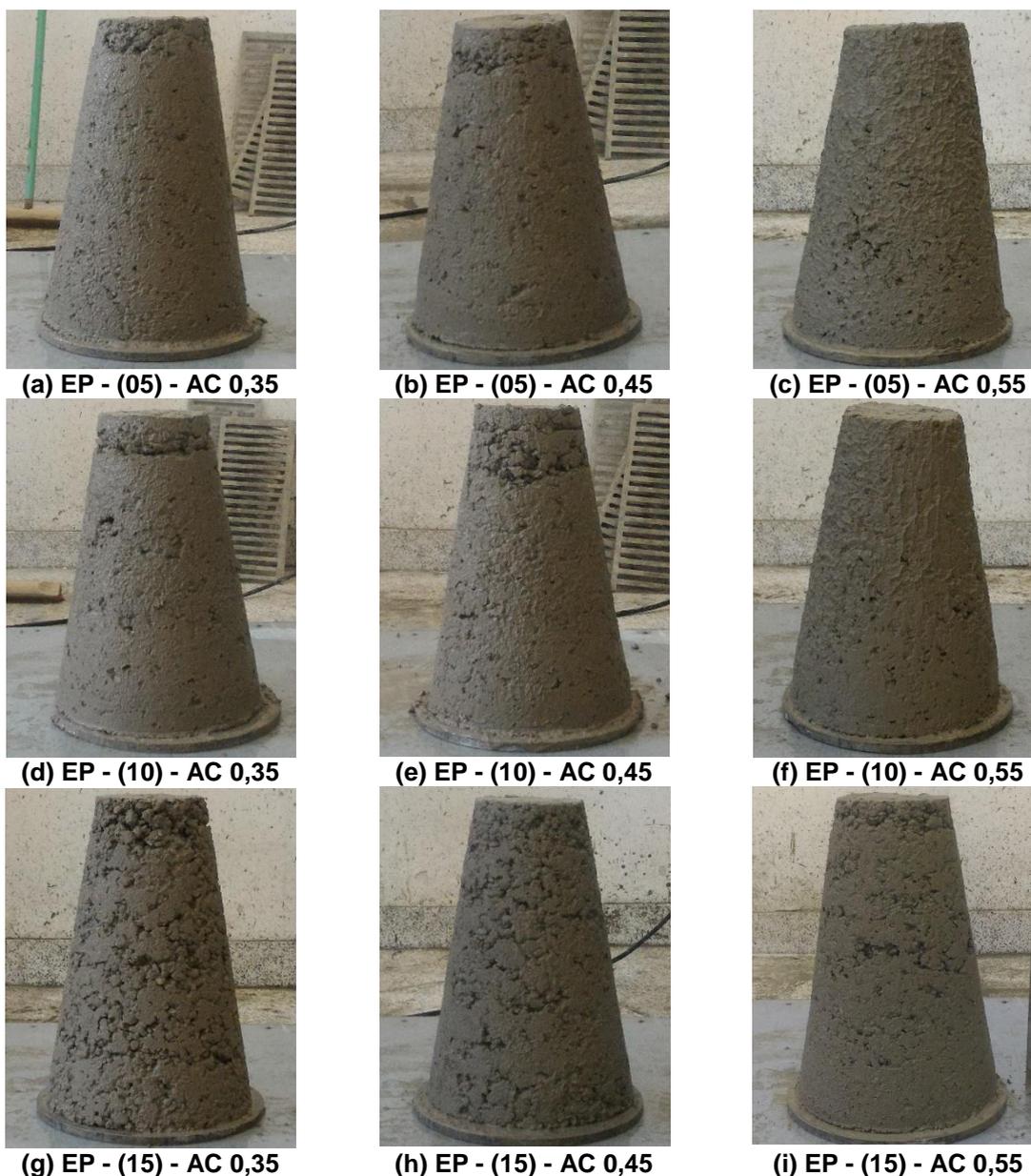


Figura 45 - *Slump test* para concretos com diferentes *a/c* e teores de excesso de pasta
Fonte: Autoria própria (2017)

Da análise das imagens da Figura 45 pode-se perceber que, apesar de todos os traços estudados não apresentarem abatimento após a retirada do tronco de cone, o aspecto superficial e acabamento dos diferentes tipos de concreto é bastante diferente.

Na Figura 45(c) observa-se que este concreto, que contém a maior porcentagem de excesso de pasta (-5%) e maior relação a/c (0,55), apresenta poucas imperfeições em na superfície. É possível observar também que existe, visualmente, mais pasta na superfície, conferindo a este concreto um aspecto mais úmido do que os demais.

A Figura 45(g), referente ao concreto com menor porcentagem de excesso de pasta (-15%) e menor relação a/c (0,35), mostra um concreto com considerável presença de vazios na superfície, fato que dificulta o um bom acabamento superficial. A presença desses vazios também demonstra uma maior necessidade de energia para adensamento, uma vez que a vibração a que foi submetido não foi suficiente para preencher todos os espaços. Uma alternativa seria adensar esse concreto por vibrocompactação, já que é mais seco do que os demais.

Os demais concreto apresentam variações no aspecto superficial, logo, de forma geral, pode-se confirmar que quanto maior o a/c e o percentual de excesso de pasta menores são os vazios na superfície e melhor é o acabamento.

Após a finalização dos ensaios de *slump* procedeu-se os ensaios de fator de preservação de forma, que apresentaram os abatimentos mostrados na Figura 46.

Por meio do ensaio de fator de preservação de forma, foi possível observar que os concretos produzidos com -15% de excesso de pasta foram os que apresentaram maior conservação de sua forma, após as 15 quedas da mesa de Graff, independente da relação a/c.

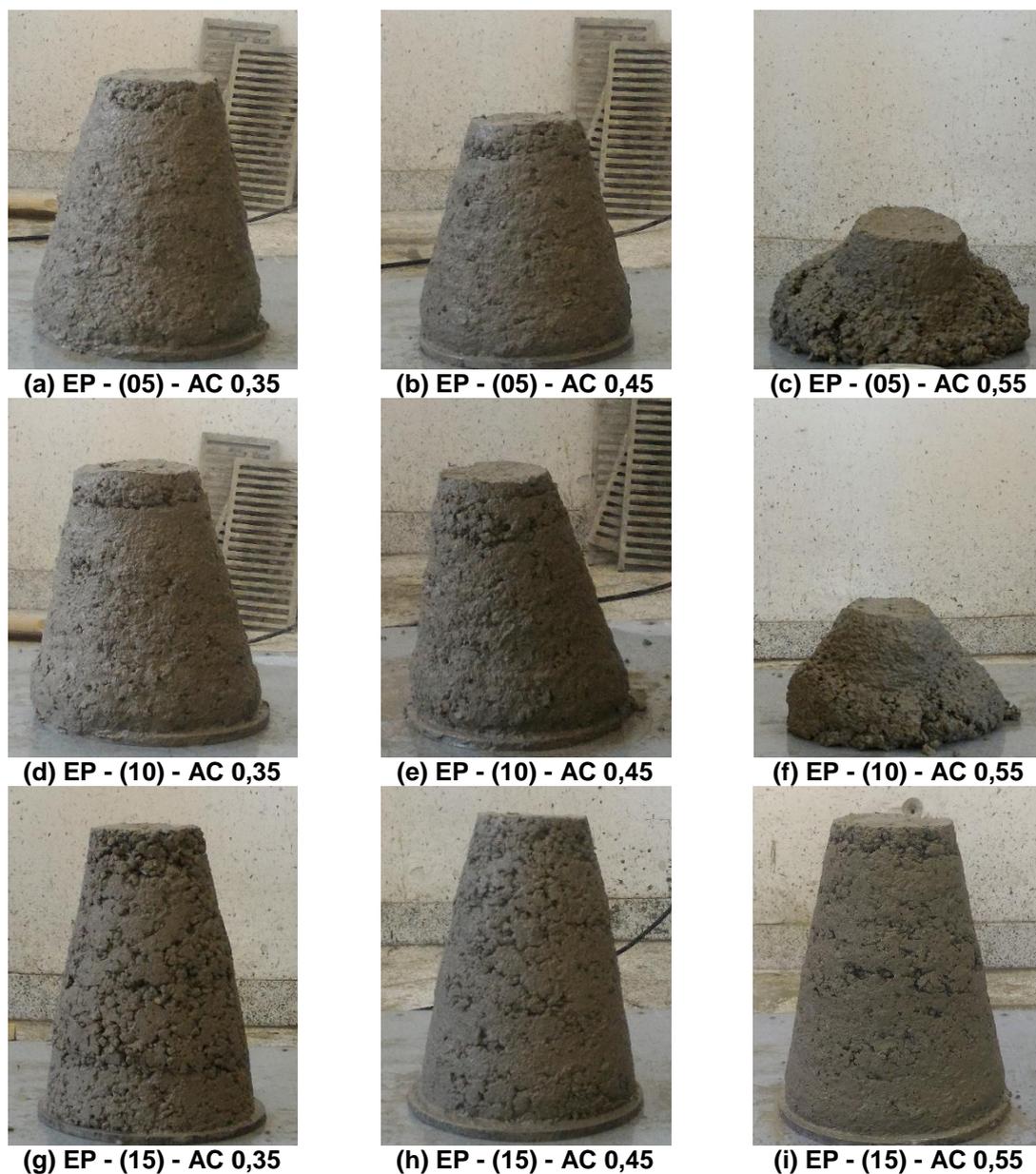


Figura 46 - Fator de preservação de forma para concretos com diferentes a/c e teores de excesso de pasta

Fonte: Autoria própria (2017)

Da análise das imagens pode-se constatar que o concreto EP - (05) - a/c 0,55 (Figura 46(c)), concreto com a maior porcentagem de pasta e maior a/c dentre os estudados, foi o que apresentou maior alteração da forma após o ensaio. Na Figura 47 pode-se observar a relação entre as composições e o FPF.

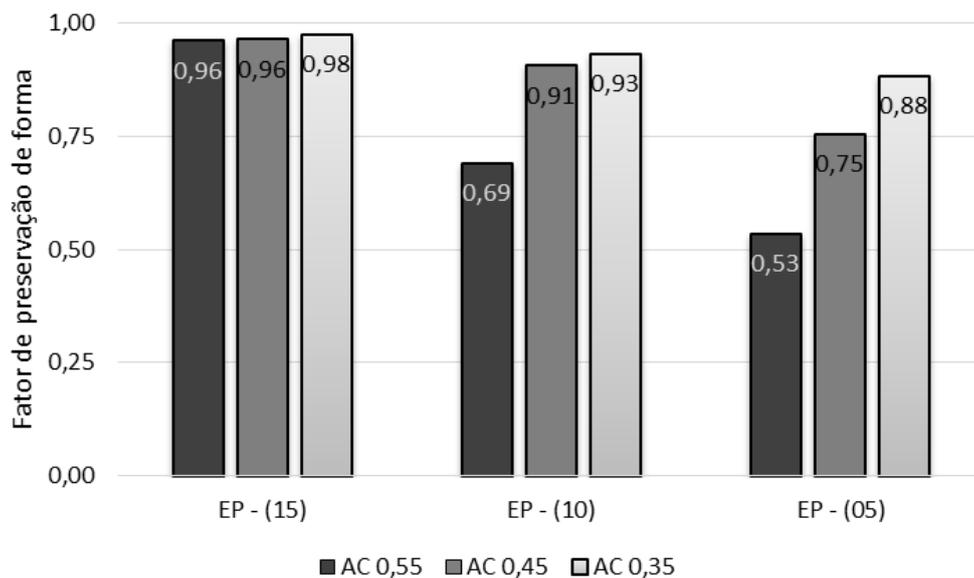


Figura 47 - Fator de preservação de forma para os diferentes traços de concreto estudados
Fonte: Autoria própria (2017)

Pode-se concluir, na análise da Figura 47 que, para todas as relações de a/c estudadas, quanto menor o excesso de pasta maior é o fator de preservação de forma. Esse fato deve-se ao maior intertravamento entre as partículas, o qual ocorre com a menor presença de água, conforme exposto no item 2.4.1.1, uma vez que a pasta atua como lubrificante entre as partículas, facilitando o movimento. Desta forma, quanto maior a quantidade de pasta, maior é o deslizamento entre os agregado e menor é a capacidade de o concreto manter a forma.

Percebe-se ainda que quanto maior o a/c maior é a influência do excesso de pasta no FPF. Para o a/c de 0,35, no qual já há menor quantidade de água no sistema, o que dificulta o abatimento, a mudança do teor de excesso de pasta exerce menor influência que nos concretos com a/c maiores. Outro fato que pode ser observado é que a diferença entre os FPF dos concretos com EP - (15) foi muito baixa, reforçando a hipótese de que quanto menor a quantidade de pasta, maior é o intertravamento entre as partículas e maior é a capacidade de preservação da forma. No caso desse teor de pasta, a mudança da relação a/c não teve tanto impacto quanto nos demais teores estudados.

Foi elaborada uma superfície de resposta para o FPF em razão do excesso de pasta e a/c, conforme apresentado na Figura 48. Foi obtida, a partir da análise da regressão dos dados experimentais, a Equação 13, que descreve o modelo ajustado de fator de preservação de forma dos concretos com agregados reciclado.

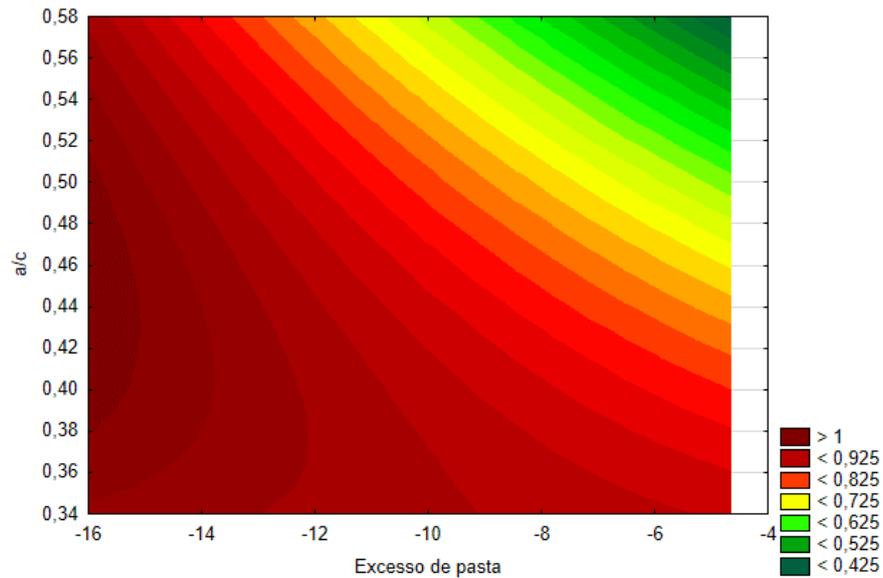


Figura 48 - Superfície de resposta - fator de preservação de forma
Fonte: Autoria própria (2017)

$$z = 0,91 + 0,05x + 1,38y - 4,50y^2 - 0,165xy \quad (13),$$

em que:

z = Fator de preservação de forma;

x = Excesso de pasta (%);

y = Relação a/c.

Da análise do gráfico pode-se concluir que há uma tendência de aumento no fator de preservação de forma com a diminuição do excesso de pasta e o a/c. Pela Equação 13 é possível também observar que os efeitos significativos são as variáveis excesso de pasta e a/c isoladamente, bem como a combinação entre elas. O modelo possui coeficiente de determinação R^2 igual a 0,9734.

Na Tabela 23 estão os valores encontrados para o FPF, bem como para as relações H_s/H_0 e D_f/D_0 .

Tabela 23 - Resultados do ensaio de fator de preservação de forma para diferentes traços de concreto estudados

Medida	EP - (15)			EP - (10)			EP - (05)		
	AC 0,55	AC 0,45	AC 0,35	AC 0,55	AC 0,45	AC 0,35	AC 0,55	AC 0,45	AC 0,35
FPF	0,96	0,96	0,98	0,69	0,91	0,93	0,53	0,75	0,88
H _s /H _i	0,12	0,10	0,09	0,51	0,21	0,22	0,56	0,31	0,22
D _f /D _i	1,05	1,02	1,01	1,37	1,11	1,13	1,43	1,02	1,04

Fonte: Autoria própria (2017)

Todos os concretos com relação a/c de 0,45 e 0,35 apresentaram $0,7 < \text{FPF} < 1,0$. Desta forma, esses concretos podem ser enquadrados na categoria de concreto *no slump*, com elevada capacidade de manter a forma e elevada necessidade de energia externa para adequada compactação. Nessa categoria encaixa-se também o concreto produzido com a/c 0,55 e excesso de pasta de -15%.

Para os concretos com relação a/c de 0,55 e excessos de pasta de -10 e -5% apresentaram $0,4 < \text{FPF} < 0,7$, não podendo, por esse critério, ser classificados como concreto *no slump*. Segundo esse ensaio, esses concretos apresentam apenas média capacidade de manter a forma e não necessitam de energia externa como vibração ou compactação para seu adensamento.

Os valores de H_s/H₀ e D_f/D₀ também indicam que a menor quantidade de pasta presente nos traços EP - (15) favorece que o concreto mantenha a forma. Por apresentarem valores mais baixos demonstram que houve menor variação de base e altura nesses concretos, fato esse atribuído novamente ao menor deslizamento entre as partículas e devido a menor quantidade de pasta. Os concretos produzidos com a/c de 0,55 foram os que apresentaram maiores valores de H_s/H_i e D_f/D_i, o que reafirma a importância desta relação na trabalhabilidade do concreto.

O ensaio *squeeze-flow* foi realizado nas amostras com diferentes porcentagens de excesso de pasta e a/c, conforme exposto no item 3.4, a fim de verificar como essas variações influenciam no comportamento reológico do concreto.

Após serem moldadas e ao ser retirado o anel usado como molde as amostras preservaram as dimensões, não tendo sido notada alteração em sua forma.

A Figura 49 apresenta as curvas força versus deslocamento para todas as amostras ensaiadas à velocidade de 3 mm/s, bem como o do concreto referência.

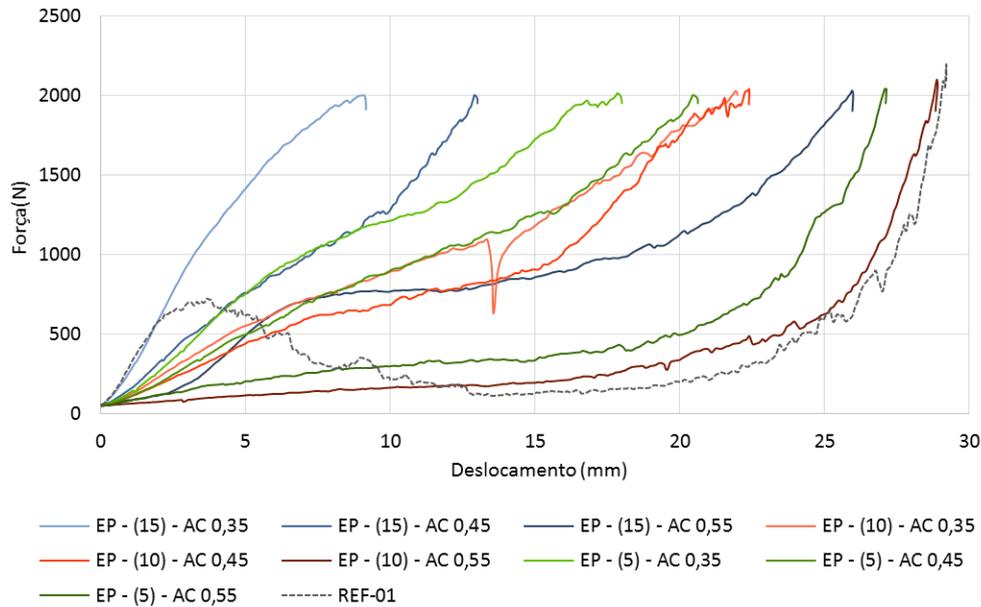


Figura 49 - Perfil da curva força vs deslocamento com velocidade de 3mm/s para diferentes teores de excesso de pasta e a/c
Fonte: Autoria própria (2017)

Na análise das curvas apresentadas na Figura 49 pode-se concluir que há uma variação nos perfis, desde uma falta de comportamento elástico até uma curva com a fase de deformação plástica bastante extensa sem grande incremento de carga.

Nas Figura 50, Figura 52 e Figura 53 as curvas do ensaio de *squeeze-flow* foram divididas, para ajudar na análise da influência do a/c no comportamento do concreto.

Na Figura 50 são expostas as curvas correspondentes ao volume de excesso de pasta de - 15% para diferentes relações de água/cimento.

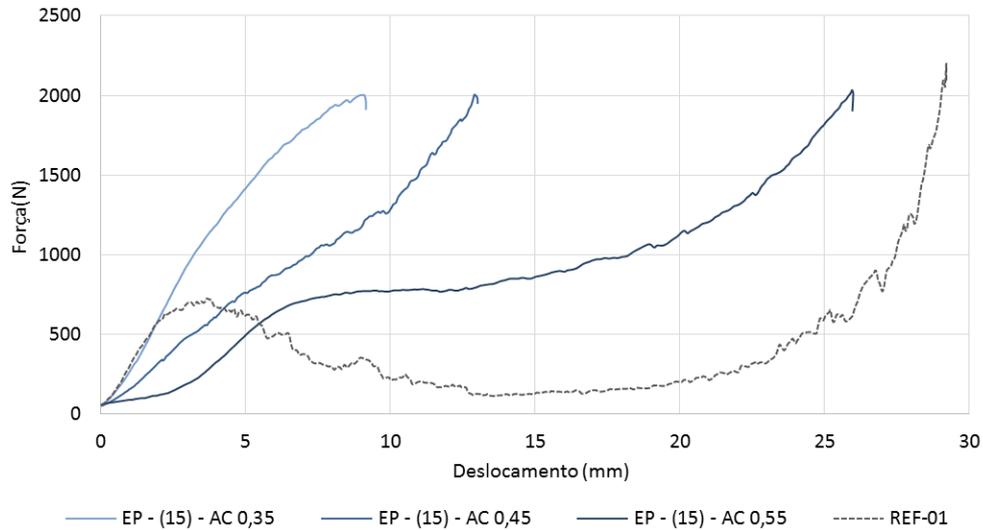


Figura 50 - Perfil da curva força vs deslocamento com velocidade de 3 mm/s para teor de excesso de pasta de -15%
Fonte: Autoria própria (2017)

Comparando-se o perfil da curva para o a/c de 0,35 com o comportamento típico ilustrado na Figura 5, pode-se perceber que o concreto apresenta alta relação força/deslocamento, pouca deformação plástica e uma rápida ruptura. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que, como esse é o concreto mais “seco” dentre os três, ou seja, menor a/c, há um maior atrito entre as partículas devido a composição mais seca da pasta. A composição das pastas dos concretos estudados pode ser observada na Figura 51.

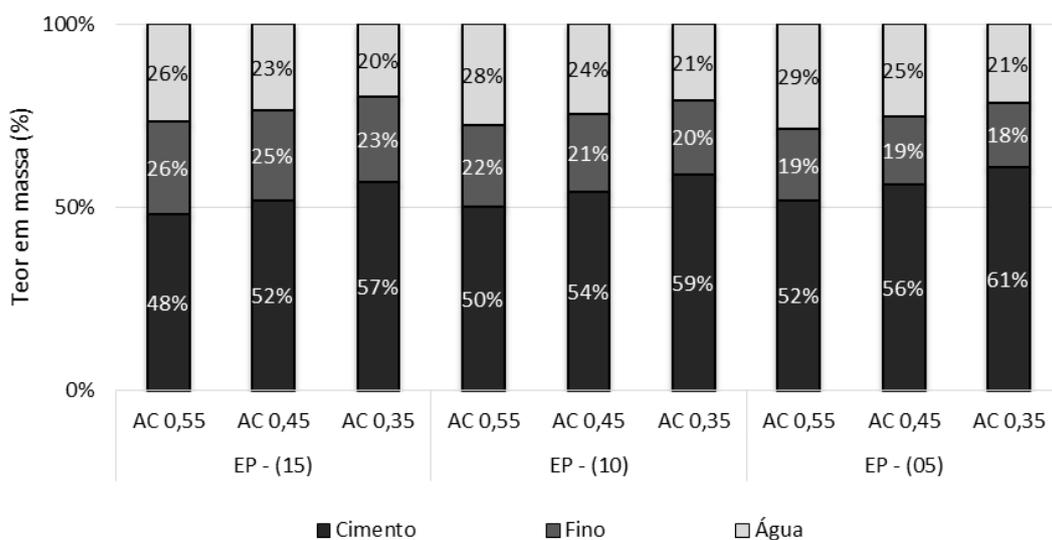


Figura 51 - Composição da pasta dos traços estudados
Fonte: Autoria própria (2017)

Assim, os agregados que representam a maior parte do concreto, estavam relativamente próximos entre si e separados por uma pasta com menor proporção de água. Como pode ser observado na Figura 51, há uma dificuldade em facilitar o escorregamento entre os agregados, o que provocou o colapso da amostra durante a realização do ensaio. Com o aumento do a/c para 0,45 e 0,55 nota-se uma redução das cargas necessárias para deformação, atribuída ao aumento de água no sistema. Esse aumento do teor de água possivelmente facilitou o escorregamento relativo entre os agregados. Desta forma, essas curvas apresentaram consideráveis estágios de deformação plástica e fluxo viscoso. Esses resultados permitem concluir que o comportamento reológico do concreto, para um mesmo teor de excesso de pasta, é bastante influenciado pela relação água/cimento utilizada.

O mesmo comportamento pode ser visto nas Figura 52 e Figura 53, nas quais o aumento da relação a/c alterou a composição da pasta, tornando-a menos viscosa e facilitando o escorregamento relativo entre os agregados e, diminuindo a força necessária para deslocamento.

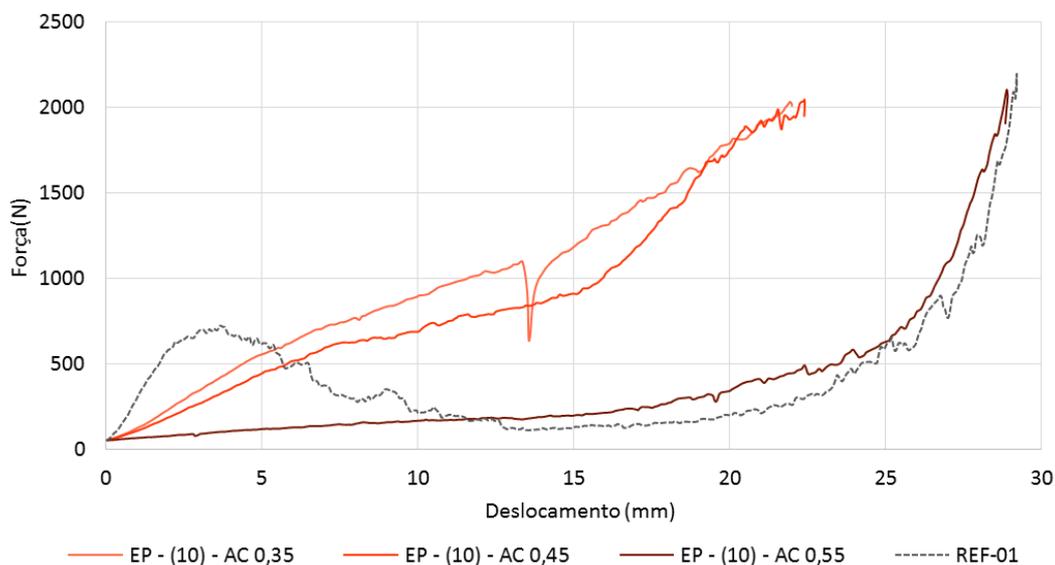


Figura 52 - Perfil da curva força vs deslocamento com velocidade de 3mm/s para teor de excesso de pasta de -10%
Fonte: Autoria própria (2017)

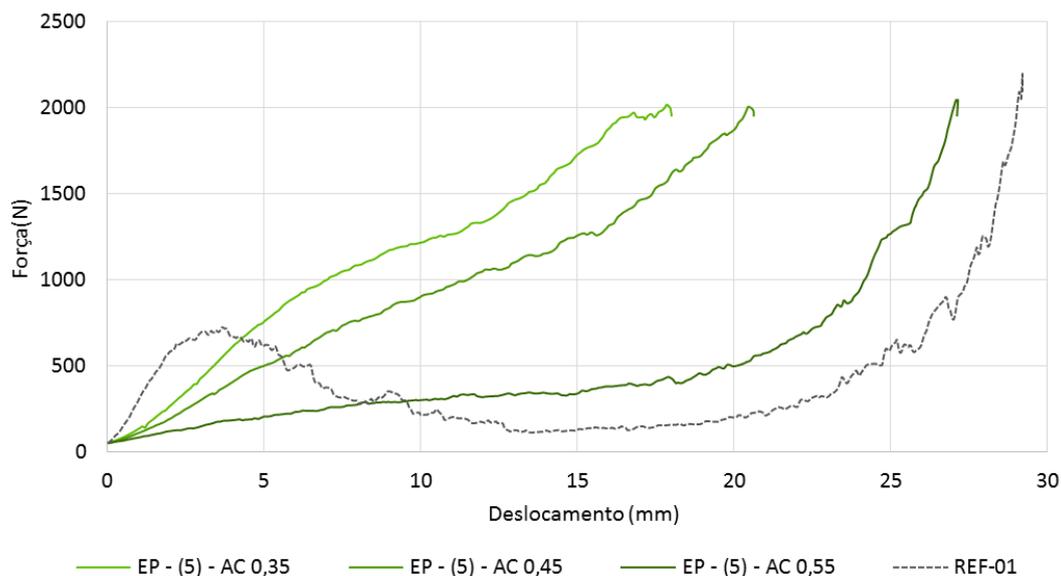


Figura 53 - Perfil da curva força vs deslocamento com velocidade de 3mm/s para teor de excesso de pasta de -05%
Fonte: Autoria própria (2017)

Pode-se concluir, da análise das Figura 52 e Figura 53, que o aumento da relação a/c foi capaz de alterar consideravelmente as características reológicas do material para um mesmo teor de excesso de pasta. Logo não se pode atribuir simplesmente ao excesso de pasta o comportamento do concreto no estado fresco, depende também da composição e, conseqüentemente, da consistência da pasta.

Na indústria, os diferentes comportamentos observados para distintos teores de excesso de pasta e a/c causam diferenças significativas na facilidade de moldagem e qualidade superficial das peças produzidas com concretos *no slump*. Os traços com - 15% de excesso de pasta e a/c de 0,35 provavelmente apresentariam dificuldades de moldagem e um acabamento superficial insatisfatório, pois apresenta estágio de fluxo viscoso praticamente inexistente e enrijecimento por deformação bastante pronunciado. Por outro lado, traços com a/c de 0,55 para - 10 e - 5% de excesso de pasta apresentam o estágio de deformação plástica muito extenso, o que poderia resultar em dificuldade desses concretos manterem a forma após desmoldados. Os demais traços apresentam estágio de deformação plástica médio e enrijecimento pouco intenso, sendo provavelmente mais adequados por facilitarem o adensamento e terem maior capacidade de manter a estabilidade de forma, aliado ao fato de possuírem aspecto superficial satisfatório, conforme apresentado na Figura 46.

Na Figura 54 é apresentado um comportamento de dispersão que procura correlacionar os resultados referentes aos ensaios do fator de preservação de forma e coeficiente angular do *squeeze-flow*.

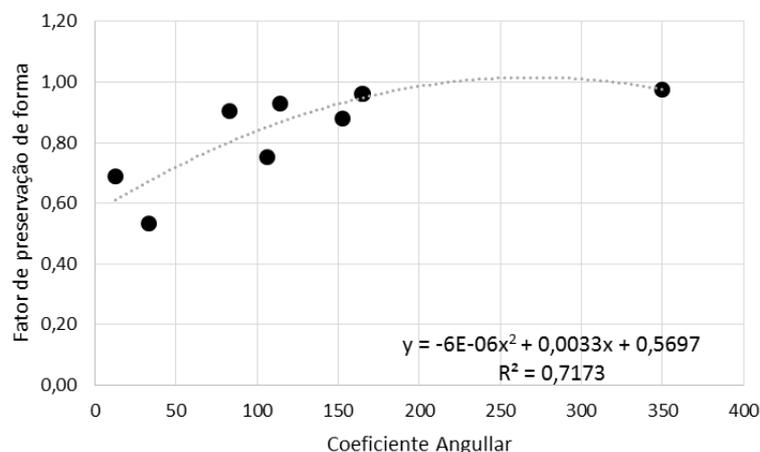


Figura 54 - Correlação entre os ensaios de *squeeze-flow* e fator de preservação de forma.
Fonte: Autoria própria (2017)

A correlação entre os ensaios no estado fresco obteve R^2 de 0,7173 e, desta forma, o ensaio de FPF apresenta sensibilidade às diferenças entre os concretos podendo ser mais facilmente aplicado em campo. O ensaio de *squeeze-flow*, por correlacionar força e deslocamento, traz informações mais completas e complementa o ensaio do FPF para escolha do concreto, porém é necessário um laboratório para a execução.

Na Figura 55 são apresentados os resultados referentes a massa específica real, aquela que considera apenas a relação do material seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis.

Conforme exposto no item 2.1.3.2, a massa específica do concreto tem correlação com a massa específica dos agregados reciclados. Desta forma, essa propriedade tende a ser menor que a dos concretos produzidos com agregados naturais.

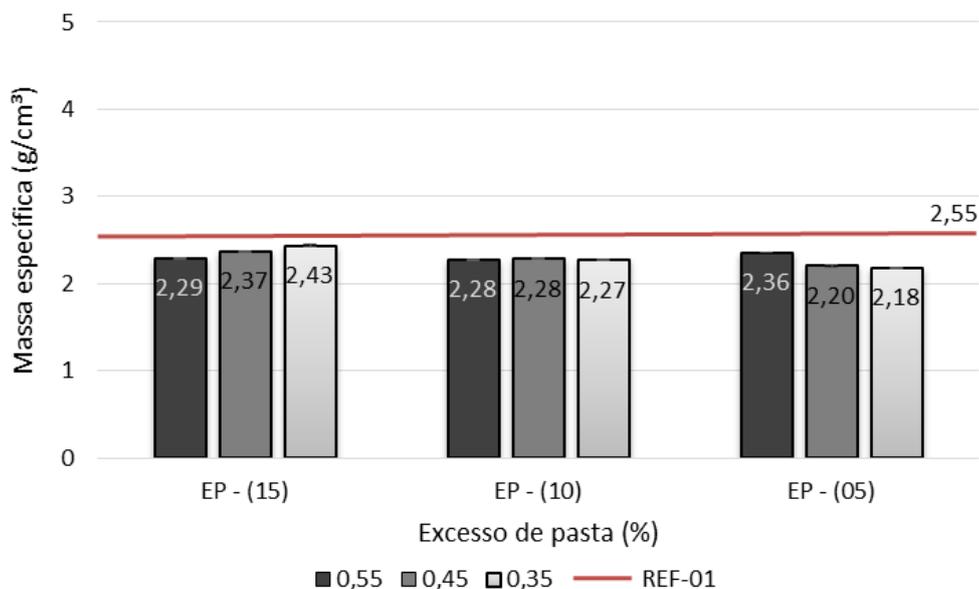


Figura 55 - Massa específica dos diferentes traços de concreto estudados
Fonte: Autoria própria (2017)

Logo, os resultados apresentados na Figura 55 corroboram essa afirmação, pois todos apresentaram massa específica menor do que a encontrada para o concreto referência, que atingiu o valor de $2,55 \text{ g/cm}^3$.

A massas específicas encontradas para os concretos com agregados reciclados foram de 5 a 14% menores do que a apresentada pelo concreto referência, valor dentro do intervalo de 5 a 17% e menores que os encontrado por diversos autores (DEVENNY; KHALAF, 1999; HANSEN, 1992; LATTERZA, 1998; LEITE, 2001; LEVY, 1997; OLIVEIRA, 1997).

Os maiores valores encontrados para massa específica foram no concreto com EP - (15). Um dos fatores que influenciam nesse fato é a maior proporção de agregados graúdos e miúdos na mistura, o que eleva a massa específica do concreto, conforme apresentado na Figura 56.

Outro fator relevante para a maior massa específica apresentada pelos concretos com EP - (15) é a menor quantidade de água nesses concretos. A água, ao evaporar, deixa vazios na estrutura do concreto que diminuem a massa específica e, portanto, os concretos com menos pasta e menos água tendem a apresentar maior massa específica que os demais.

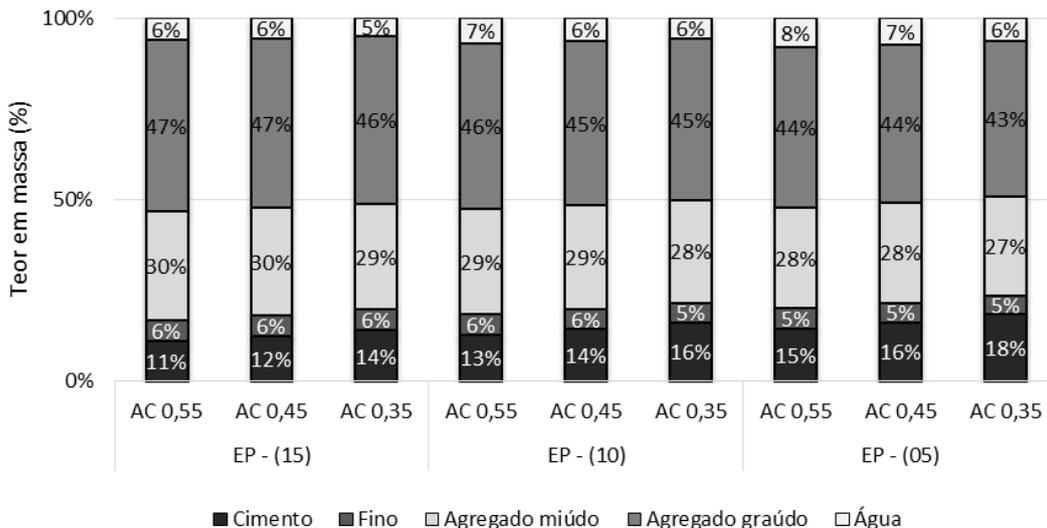


Figura 56 - Composição dos traços
Fonte: Autoria própria (2017)

Foi elaborada a superfície de resposta para a massa específica em razão do excesso de pasta e a/c, conforme apresentado na Figura 57. Foi obtida, a partir da análise da regressão dos dados experimentais, a Equação 14, que descreve o modelo ajustado de massa específica dos concretos com agregados reciclado.

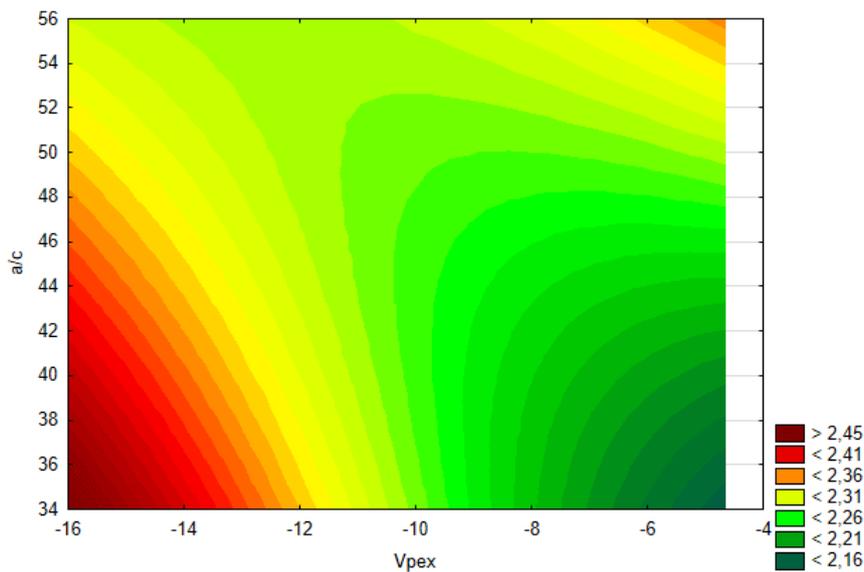


Figura 57 - Superfície de resposta - massa específica
Fonte: Autoria própria (2017)

$$z = 1,830 - 0,060x + 0,003y + 0,002xy \tag{14},$$

em que:

z = massa específica (g/cm^3);

x = Excesso de pasta (%);

y = Relação a/c.

Da análise da Figura 57 pode-se concluir que há uma tendência de aumento da massa específica com a diminuição do excesso de pasta e o a/c. Pela Equação 14 é possível também observar que os efeitos significativos são as variáveis excesso de pasta e a/c isoladamente, bem como a combinação entre elas. O modelo possui coeficiente de determinação R^2 igual a 0,8665

Ao realizar uma análise estatística dos resultados obtidos para a massa específica pode-se concluir, por meio da análise ANOVA, que tanto o excesso de pasta quando a relação a/c e a interação entre eles são significativos, ou seja, influenciam no valor de massa específica.

Para identificar quais valores de massa específica são estatisticamente diferentes, foi realizada a comparação múltipla de médias (dois a dois) pelo teste Tukey, com nível de significância também de 5%, conforme apresentado na Tabela 24.

Tabela 24 - Resultados do teste de Tukey para massa específica, considerando excesso de pasta e a/c

Excesso de pasta	a/c	Massa específica (g/cm^3)	Grupo Tukey
- 15%	0,35	2,43	a
- 15%	0,45	2,37	b
- 5%	0,55	2,36	b
- 15%	0,55	2,29	c
- 10%	0,45	2,28	c
- 10%	0,55	2,28	c
- 10%	0,35	2,27	c
- 5%	0,45	2,20	d
- 5%	0,35	2,18	d

Fonte: Autoria própria (2017)

Neste teste os resultados são apresentados em forma de agrupamentos de categorias que não são consideradas estatisticamente diferentes entre si.

Da análise da Tabela 24 pode-se observar que a combinação entre excesso de pasta de - 15% e a/c de 0,35 foi o que resultou na maior média da

massa específica, e mostrou-se significativamente distinto dos demais resultados. Todas as combinações representadas como Grupo Tukey b podem ser considerados iguais entre si, ou seja, as médias não diferem significativamente entre elas. O mesmo ocorre para os Grupos Tukey c e d.

Na Figura 58 são apresentados os resultados referentes ao teor de absorção de água dos corpos de prova.

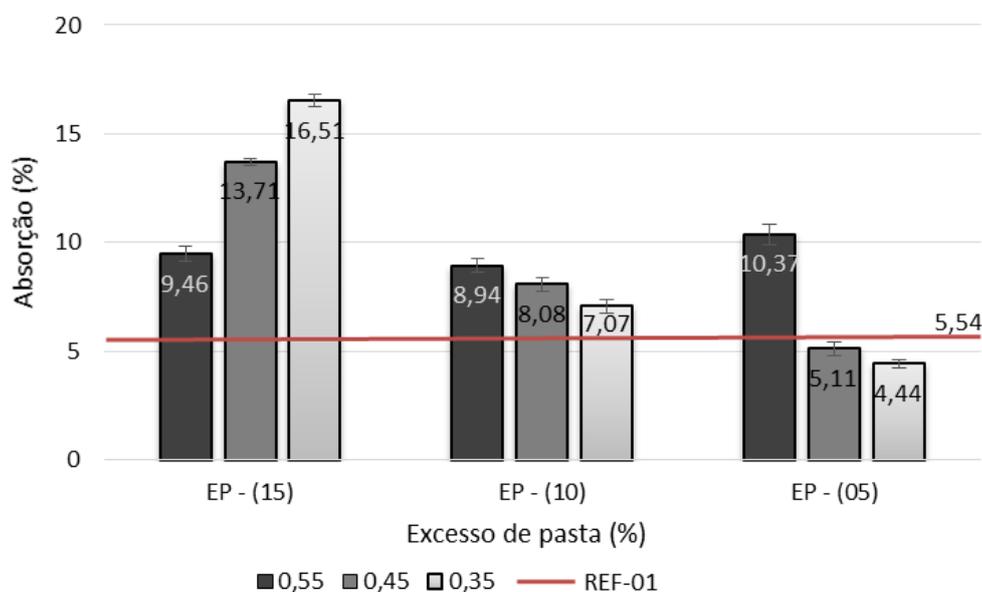


Figura 58 - Absorção dos diferentes traços de concreto estudados
Fonte: Autoria própria (2017)

Observa-se que apenas os concretos EP - (05) com AC 0,45 e EP - (05) com AC 0,35 apresentaram taxas de absorção menores que o concreto referência. Todos os demais traços estudados apresentaram valores de absorção mais altos, sendo que o concreto EP - (15) com AC 0,35 foi o que apresentou a mais elevada taxa de absorção, cerca de três vezes superior que o concreto referência.

Nos concretos produzidos com EP - (15) a diminuição do a/c provocou um aumento na absorção, enquanto nos demais concretos, produzidos com EP - (10) e EP - (05) a diminuição da relação a/c diminuiu a absorção.

Uma hipótese para esse fato é que os concretos com menor excesso de pasta apresentaram uma maior dificuldade de adensamento, resultando em um maior índice de vazios e menor densidade de massa aparente, conforme apresentado na Figura 59. Para os concretos produzidos com maior teor de pasta apresentaram melhor compactação, não tendo tantos vazios resultantes de mau

adensamento, porém os a/c mais elevados representam uma pasta com mais água que, ao evaporar, pode deixar vazios, aumentando desta forma a absorção.

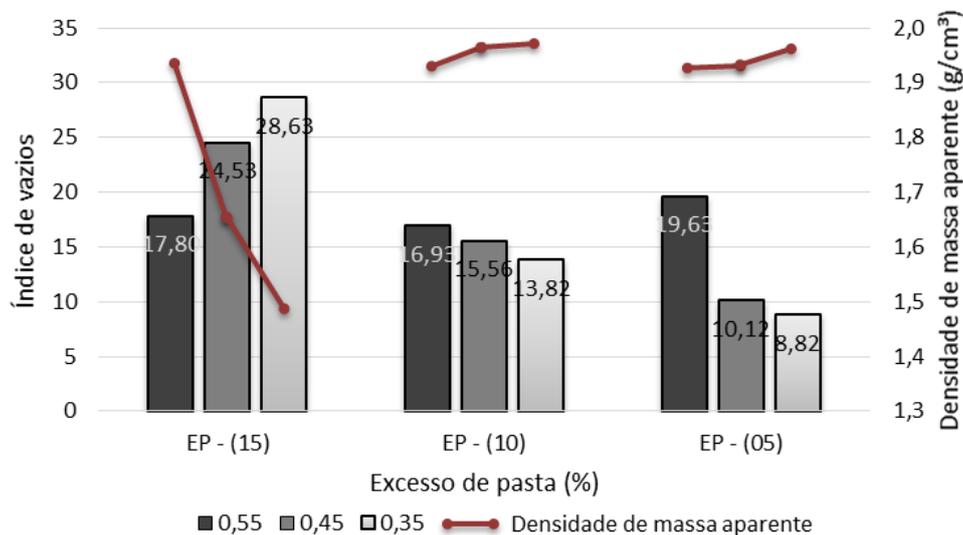


Figura 59 - Índice de vazios dos diferentes traços de concreto estudados
Fonte: Autoria própria (2017)

Pode-se correlacionar os resultados de índice de vazios e densidade de massa aparente com o acabamento na superfície dos corpos-de-prova após desmoldados, conforme apresentado na Figura 60.

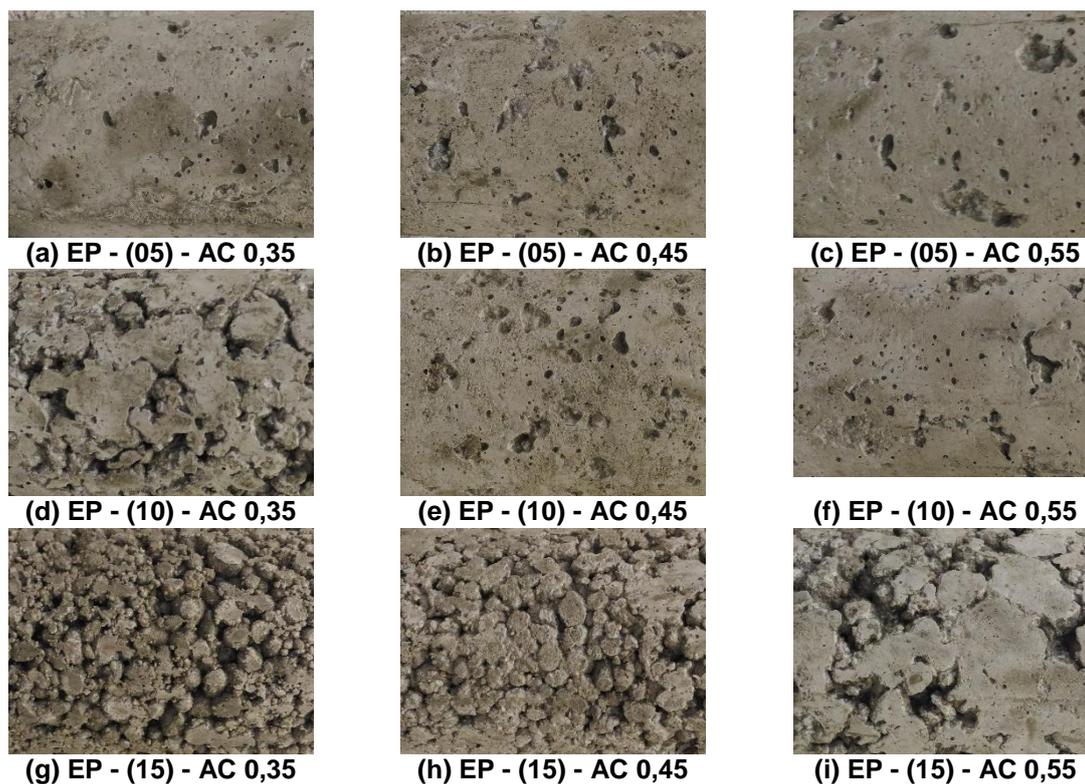


Figura 60 - Aspecto superficial dos corpos de prova com diferentes a/c e teores de excesso de pasta

Fonte: Autoria própria (2017)

Observando a superfície dos corpos de prova apresentada na Figura 60, pode-se perceber que o teor de excesso de pasta de - 15% confere ao concreto uma superfície com presença de imperfeições, o que é um aspecto negativo para as peças de concreto. Esses defeitos na superfície resultam em um maior valor de índice de vazios e baixa densidade de massa aparente. Com o aumento do teor de excesso de pasta, a qualidade do acabamento superficial aumenta, sendo que o EP - (05) apresentou, para todos os a/c estudados, um acabamento superficial satisfatório.

Na ANOVA, para determinar quais fatores foram mais influentes para a absorção, o teor de excesso de pasta e a interação entre com a relação a/c foram significativamente influentes para os resultados de absorção. A variável a/c apresentou valor de $p > 0,05$, o que indica que este fator não contribuiu significativamente para os resultados.

O teste Tukey foi realizado para um nível de significância também de 5%, conforme apresentado na Tabela 25.

Tabela 25 - Resultados do teste de Tukey para absorção

Excesso de pasta	a/c	Absorção (%)	Grupo Tukey	
-15	0,35	16,50	a	
-15	0,45	13,72	b	
-05	0,55	10,38	c	
-15	0,55	9,47	c	d
-10	0,55	8,96	c	d
-10	0,45	8,09	d e	
-10	0,35	7,09	e	
-05	0,45	5,11	f	
-05	0,35	4,44	f	

Fonte: Autoria própria (2017)

Ao analisar a comparação de médias de absorção dos concretos apresentada na Tabela 25, pode-se notar que o teor de - 15% com a/c de 0,35 e de 0,45 foi o que produziu concretos com o maior valor médio de absorção de água, sendo ambos distintos entre si. Esse resultado confirma as análises anteriores as quais mostram que os concretos com menor quantidade de pasta apresentam maior dificuldade de adensamento, o que resulta em um maior número de vazios em seu interior. Desta forma, os concretos com maior quantidade de pasta conseguem atingir um nível de adensamento maior com a energia aplicada, diminuindo assim os valores de absorção de água e aumentando os valores de densidade de massa aparente.

A Figura 61 apresenta os resultados encontrados para o ensaio de módulo de elasticidade.

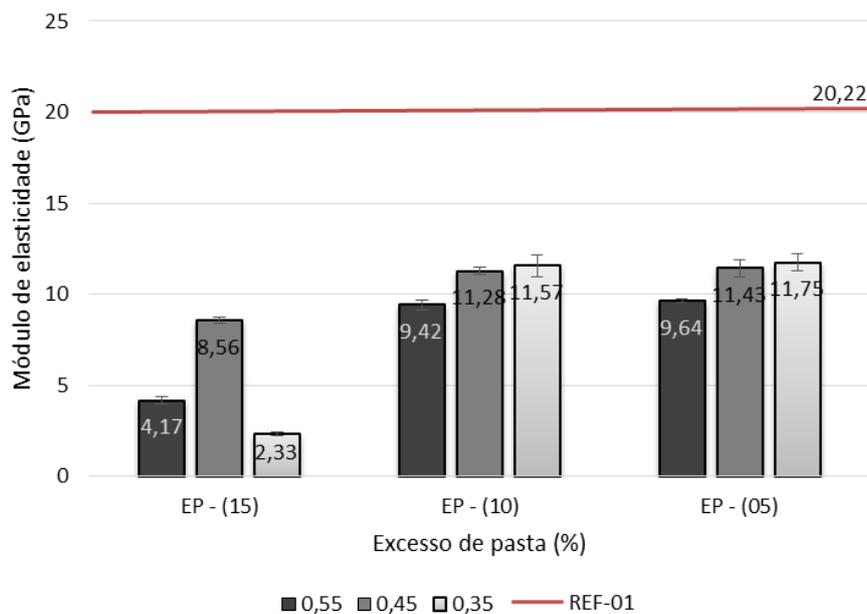


Figura 61 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade
Fonte: Autoria própria (2017).

O módulo de elasticidade do concreto depende de vários fatores como a matriz da pasta, ligação pasta/agregado, das características do próprio agregado e principalmente à porosidade (LEITE, 2001).

Como pode-se observar na Figura 61, os concretos produzidos com - 15% de excesso de pasta foram os que mais se distanciaram dos resultados obtidos para o concreto referência. Um dos fatores que influencia nesse resultado é que esse é o grupo de concretos que possui, proporcionalmente, maior porcentagem de agregados reciclados. Desta forma, as características desses materiais, tais como: porosidade, granulometria, textura, morfologia, composição e demais características apresentadas e discutidas no item 4.1, exercem maior influência nesse grupo de concreto que nos demais. Outro fator relevante é a dificuldade no adensamento dos concretos com EP - (15), principalmente na menor relação a/c, que resultou em corpos-de-prova com baixa densidade de massa e descontinuidades no interior.

Para os concretos com teores de excesso de pasta de - 10 e - 5, a medida em que a relação a/c aumenta, o módulo de elasticidade do concreto tende a diminuir. Um dos fatores que pode ter influenciado nesse resultado é o valor do módulo estar ligado com a porosidade da pasta, a qual aumenta com o aumento da relação a/c.

Foi realizada, para as medidas de módulo de elasticidade dinâmico, a análise de variância e foram encontradas evidências de diferenças significativas entre os teores de excesso de pasta, a/c e da interação entre ambos.

Para identificar quais valores de módulo de elasticidade são estatisticamente diferentes entre si, foi realizada a comparação múltipla de médias (dois a dois) pelo teste Tukey, com nível de significância também de 5%, conforme apresentado na Tabela 26.

Neste teste, os resultados foram apresentados em forma de agrupamentos de categorias que não são consideradas estatisticamente diferentes entre si.

Tabela 26 - Resultados do teste de Tukey para módulo de elasticidade, considerando excesso de pasta e a/c

Excesso de pasta	a/c	Módulo (GPa)	Grupo Tukey
-5%	0,35	17,32	a
-10%	0,35	17,04	a
-5%	0,45	16,84	a
-10%	0,45	16,62	a
-5%	0,55	14,21	b
-10%	0,55	13,89	b
-15%	0,35	12,61	b
-15%	0,45	6,14	c
-15%	0,55	3,44	d

Fonte: Autoria própria (2017)

Da análise da Tabela 26 pode-se observar que a combinação entre excesso de pasta de - 5% e a/c de 0,35 foi o que resultou na maior média de módulo de elasticidade, e mostrou-se significativamente igual aos resultados encontrados para EP - (5) - AC 0,45 e para os excessos de pasta de -10% com a/c de 0,35 e 0,45. O menor teor de excesso de pasta (- 15%) com as maiores relações a/c (0,45 e 0,55) foram as que apresentaram as menores médias de valor para módulo de elasticidade, devido aos fatores expostos anteriormente. Estes resultados foram significativamente distintos dos demais.

A partir dos traços calculados dos pontos do planejamento experimental foram preparados corpos de prova para avaliação da resistência mecânica à compressão aos 7 dias, conforme apresentado na Figura 62.

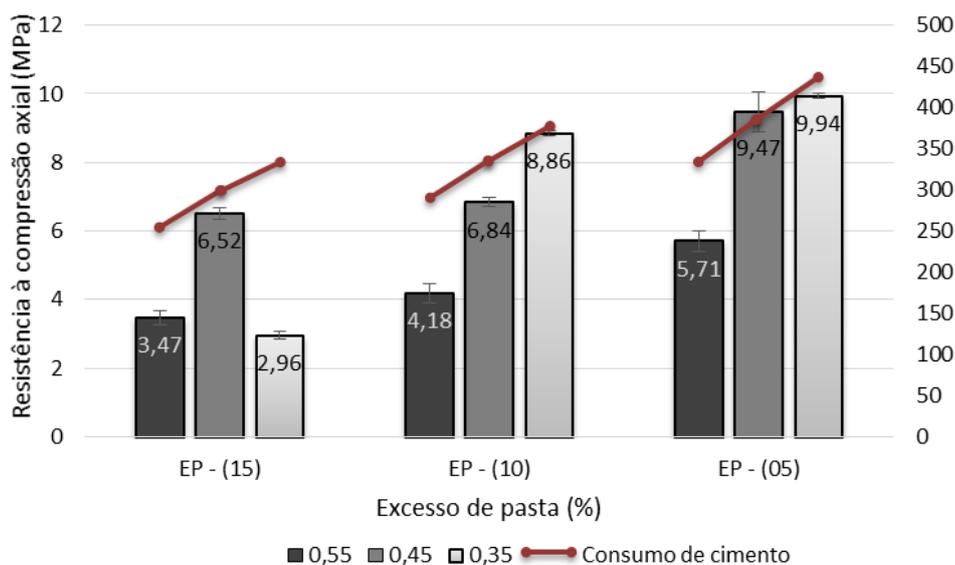


Figura 62 - Resistência à compressão axial, comparação entre traços
Fonte: Autoria própria (2017)

Observa-se na Figura 62, conforme esperado, que há um aumento do valor de resistência com a diminuição da relação a/c com exceção do concreto EP - (5) com AC 0,35, que apresentou queda na resistência. Apenas os concretos EP - (5) com AC 0,45 e EP - (5) com AC 0,35 atingiram mínimo de 11 MPa, valor estabelecido como mínimo para a execução de meios fios de acordo com a DNER ES-290 (1997).

Além disso, pode-se observar que para um mesmo teor de excesso de pasta houve dois comportamentos distintos: para o EP - (15) a resistência aumentou com a diminuição do a/c de 0,55 para 0,45. Porém, nova diminuição do a/c de 0,45 para 0,35 resultou em uma queda da resistência mecânica à compressão. Esse fato pode ser explicado pela falta de água no sistema para completa hidratação do cimento, bem como pela dificuldade de adensamento, moldagem e alta ocorrência de vazios no corpo de prova deste último traço, fatores estes que podem ter influenciado na queda da resistência.

Para os excessos de pasta maiores, de - 10 e - 5%, houve uma tendência uniforme de redução da resistência à compressão com o aumento da relação a/c . O aumento da relação a/c resulta no enfraquecimento da matriz do concreto, pois aumenta a porosidade. A redução da resistência à compressão também está diretamente relacionada com o aumento do consumo de cimento destes traços, conforme exposto na Figura 62.

Como pode-se observar, o aumento do consumo de cimento também está diretamente ligado ao aumento da resistência à compressão. Apesar disto, nenhum dos concretos produzidos com agregados reciclados atingiu a resistência do concreto referência, que foi de 14,81 MPa, nem mesmo aqueles produzidos com consumo de cimento bastante superior ao do concreto referência (300 kg/m³).

A conhecida maior resistência, maior densidade e menor porosidade dos agregados naturais (BAZUCO, 1999; LEITE, 2001; TAVAKOLI; SOROUSHIAN, 1996a, b) fazem com que essa parcela, no concreto convencional, exerça menor influência na resistência à compressão. Porém as características do agregado reciclado fazem com que estas características influenciem no resultado da resistência à compressão.

Uma possível explicação para esse fato é que a resistência está estritamente relacionada à porosidade dos materiais pois, quanto mais porosos os materiais, menor tende a ser a resistência. Logo, a maior porosidade dos agregados reciclados, conforme exposto no item 4.1, influencia negativamente nessa característica.

Outro fato a ser considerado é a porosidade da zona de transição entre a matriz de cimento e o agregado. Quando se considera os agregados naturais, a zona de transição é influenciada quase que exclusivamente pela matriz do concreto. Porém, quanto trata-se de concretos com agregados reciclados essa porosidade da zona de transição passa a desempenhar papel relevante na resistência mecânica. A partícula do agregado reciclado possui uma capa de argamassa que é mais frágil e essa característica pode impactar na resistência de todo o sistema.

Ao correlacionar os resultados de resistência à compressão axial com os ensaios de fator de preservação de forma e coeficiente angular do *squeeze-flow* pode-se notar que ambos apresentaram uma baixa correlação. Desta forma não se pode afirmar, a partir dos resultados obtidos, que a partir do comportamento do concreto no estado fresco pode-se prever qual será sua resistência após endurecido.

A fim de verificar a influência da variação do a/c e teor de excesso de pasta na resistência mecânica à compressão do concreto foram feitos alguns testes estatísticos. Inicialmente foi verificado, por meio do *software* STATISTICA 10, se as

amostras estudadas obedeciam a uma distribuição normal. Foi verificado também, se as variáveis possuíam características de variáveis independentes. Os resultados dos testes estão expostos nas Figura 63 e Figura 64.

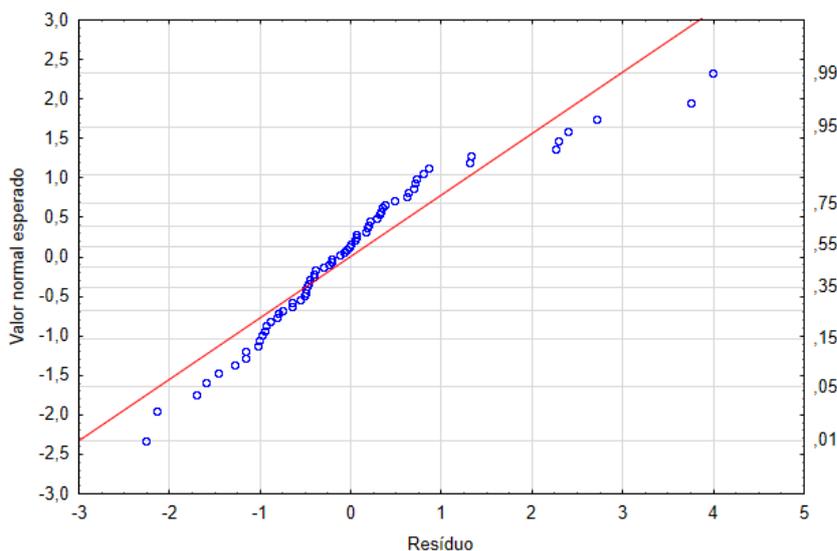


Figura 63 - Teste de normalidade para as composições
Fonte: Autoria própria (2017)

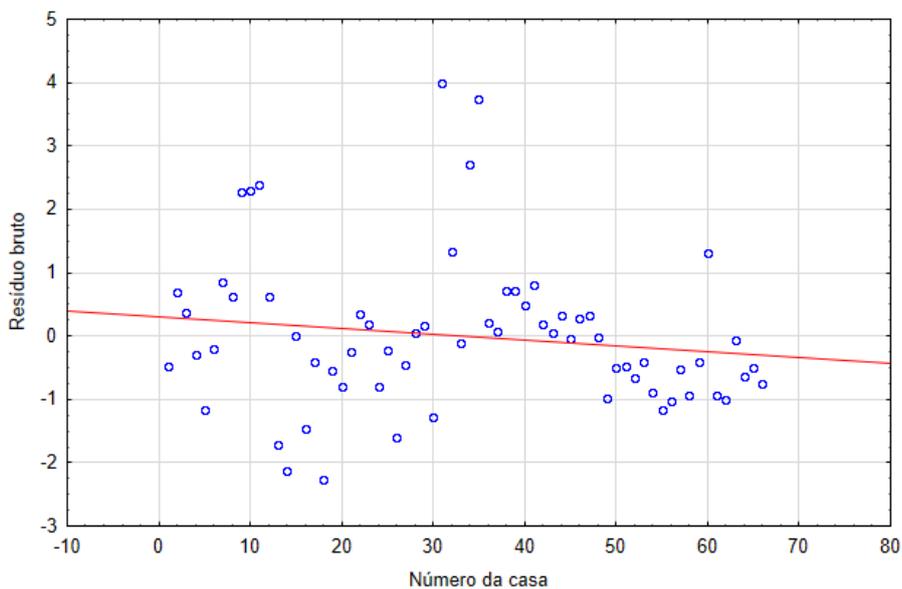


Figura 64 - Teste de independência de variáveis
Fonte: Autoria própria (2017)

Na análise da Figura 63 pode-se observar que há uma boa aderência dos dados à distribuição Normal, pois os pontos estão próximos à reta de referência apresentada no gráfico. Na Figura 64 observa-se grande dispersão entre os pontos

e a linha de referência do gráfico, o que comprova que as variáveis em estudo (teor de excesso de pasta e relação a/c) são independentes.

Com os resultados de resistência à compressão apresentados na Figura 62 foi realizada análise multivariada (ANOVA), com um nível de significância de 5%. Por meio dessa análise comprova-se que o teor de excesso de pasta e a relação a/c, bem como a interação entre elas, exerceram influência nos resultados de resistência à compressão obtidos.

Dando sequência à avaliação estatística dos dados foi realizada uma análise multivariada dos resultados. O diagrama de Pareto das variáveis é apresentado na Figura 65, sendo L - linear e Q - quadrática.

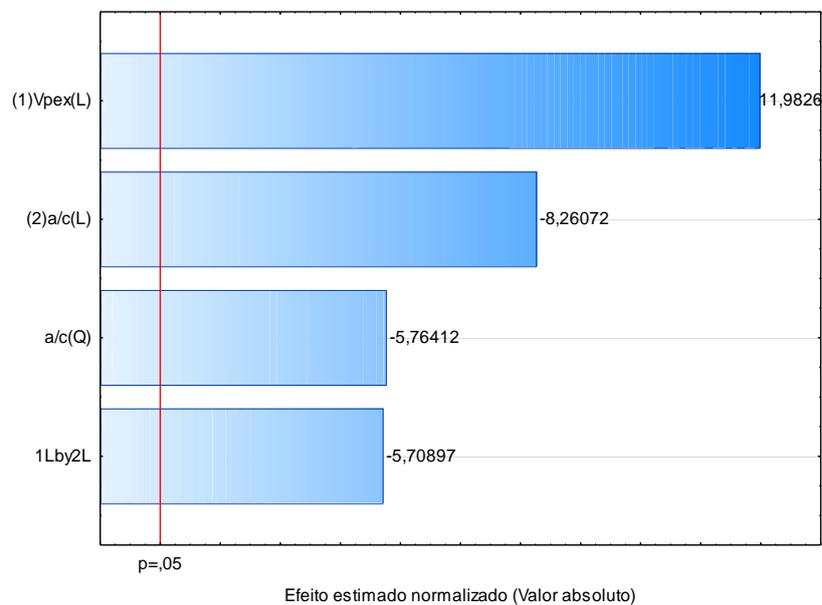


Figura 65 - Diagrama de Pareto - Resistência a compressão
Fonte: Autoria própria (2017)

Nesta análise foi verificado que a variável quadrática do excesso de pasta não apresentou influência nos resultados, sendo desconsiderada do modelo, mantendo-se apenas a parcela linear desta variável.

É possível observar na Figura 65 que a parcela linear do excesso de pasta e a/c, a parcela quadrática do a/c e a interação entre elas (linear) exercem influência nos resultados obtidos, a última positivamente e as demais negativamente.

Desta forma, o modelo em estudo apresenta a superfície de resposta apresentada na Figura 66. Foi obtida, a partir da análise da regressão dos dados

experimentais, a Equação 15, que descreve o modelo ajustado de resistência à compressão dos concretos com agregados reciclado.

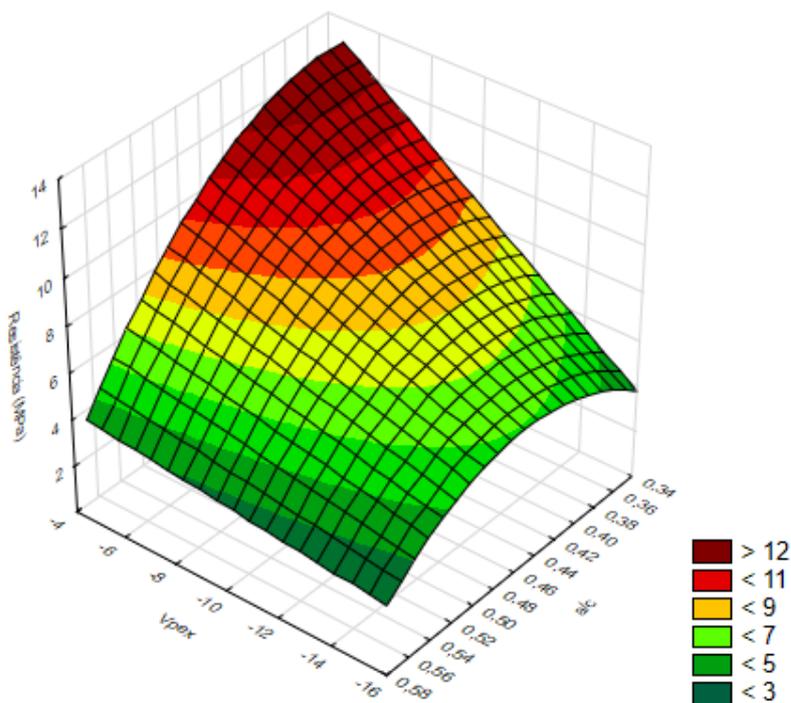


Figura 66 - Superfície de resposta - resistência à compressão em função da variação da relação a/c e Volume de excesso de pasta (Vpex)
Fonte: Autoria própria (2017)

$$z = -1,23 + 1,80x + 113,19y - 176,75y^2 - 2,89xy \quad (15),$$

em que:

z = Resistência à compressão axial (MPa);

x = Excesso de pasta (%);

y = Relação a/c.

Pela Equação 15 é possível também observar que os efeitos significativos são as variáveis: excesso de pasta e a/c isoladamente, bem como a combinação entre elas. O modelo possui coeficiente de determinação R^2 igual a 0,81987.

Foi realizado também o estudo de desejabilidade do modelo obtido, com o objetivo de se estimar qual combinação entre excesso de pasta e relação a/c resultaria em maiores valores de resistência à compressão. O estudo de desejabilidade pode ser visto na Figura 67.

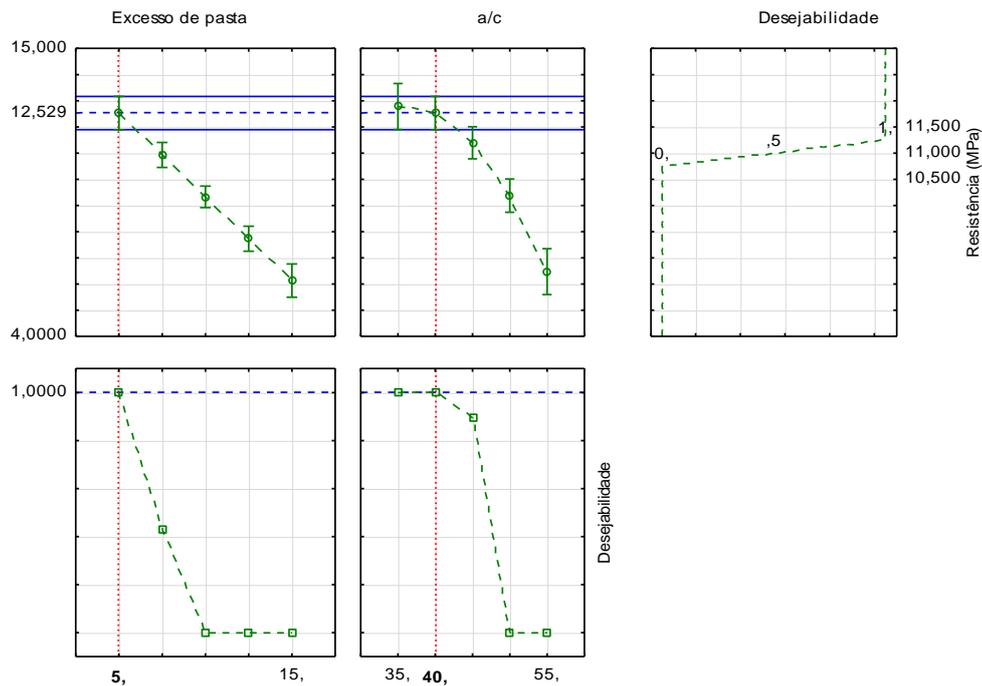


Figura 67 - Desejabilidade da superfície de resposta
Fonte: Autoria própria (2017)

Como pode ser observado na Figura 67, a combinação que gera os melhores resultados de resistência à compressão axial é EP - (05) e a/c de 0,35 dentro do intervalo analisado (excesso de pasta de - 15 a - 5%; a/c de 0,35 a 0,55). Segundo esta estimativa, a combinação proposta atingiria valores de resistência da ordem de 12,5 MPa.

A Figura 68, que representa a resistência em função da relação água/cimento, foi obtida a partir da Equação 15, variando os valores de a/c para cada teor de excesso de pasta. O mesmo foi feito para a obtenção da Figura 69, que representa a resistência à compressão axial em função do excesso de pasta.

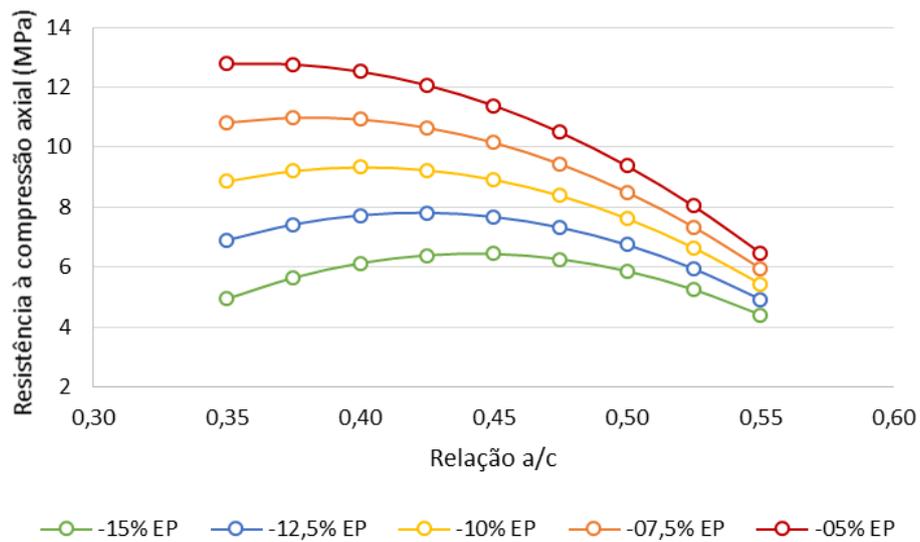


Figura 68 - Resistência à compressão em função da relação a/c
Fonte: Autoria própria (2017)

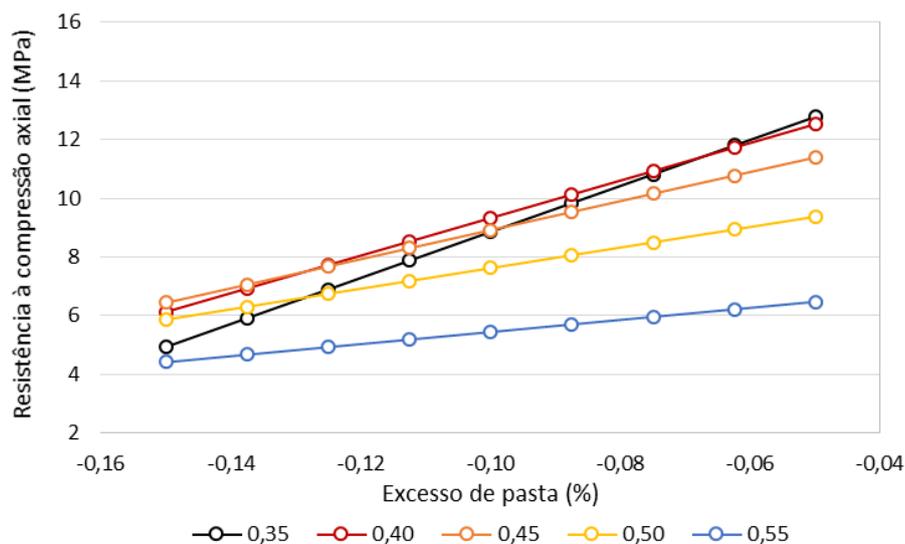


Figura 69 - Resistência à compressão em função da relação ao excesso de pasta
Fonte: Autoria própria (2017)

A partir da análise do gráfico apresentado na Figura 68 pode-se observar que para teores de excesso de pasta mais baixos, como de - 15 e - 10%, o aumento inicial da relação a/c resulta em aumento discreto da resistência até a faixa de 0,45. Para a/c mais altos a curva volta a decrescer, diminuindo a resistência. Esse comportamento foi ditado pelo volume muito baixo de pasta aliado à maior quantidade relativa de finos (menor do que 150 mm) que a compõe, resultado do grande volume de agregados. Com a diminuição progressiva do a/c a quantidade de cimento no sistema aumenta, possibilitando um incremento da resistência.

Porém, para relações a/c muito baixas há falta de água, que pode resultar tanto em dificuldade na completa hidratação do cimento como em dificuldades de adensamento, que promovem essa tendência de queda de resistência para esses concretos com baixos teores de pasta.

No mesmo gráfico pode-se observar que, para teores de excesso de pasta maiores, há uma tendência mais clara de aumento de resistência com a diminuição do a/c.

Na Tabela 27 está apresentado o teor de agregados (m) e finos provenientes dos agregados para cada um dos traços estudados.

Tabela 27 - Valor de m e teor de finos para os concretos com agregados reciclados

Traço	m	Finos
EP - (15) - AC 0,55	7,03	0,53
EP - (15) - AC 0,45	6,26	0,47
EP - (15) - AC 0,35	5,42	0,41
EP - (10) - AC 0,55	5,87	0,44
EP - (10) - AC 0,45	5,20	0,39
EP - (10) - AC 0,35	4,52	0,34
EP - (5) - AC 0,55	4,96	0,38
EP - (5) - AC 0,45	4,39	0,33
EP - (5) - AC 0,35	3,82	0,29

Fonte: Autoria própria (2017)

Quanto maior a maior quantidade de pasta no concreto, maior o deslizamento entre os agregados, uma vez que a pasta atua como lubrificante entre as partículas. Desta forma, uma maior quantidade de pasta garante um melhor adensamento. O aumento de pasta nos concretos estudados também é responsável por um maior percentual de cimento no concreto e uma menor quantidade relativa de finos, conforme apresentado na Tabela 27 e na Figura 56, fato que está diretamente ligado com o aumento da resistência.

Pode-se também observar na Tabela 27 e Figura 56 que quanto maior o teor de excesso de pasta do concreto, proporcionalmente, menor a porcentagem de agregados e quantidade de finos no sistema, desta forma a pasta fica mais concentrada em cimento, o que também promove ganho na resistência.

Pode-se também afirmar que os concretos com maiores teores de pasta seguiram uma tendência de comportamento semelhante a Lei de Abrams, uma vez que houve incremento de resistência dos concretos com a redução da relação a/c.

Analisando-se o gráfico apresentado na Figura 69 pode-se observar que quanto mais baixa a relação a/c maior é o coeficiente angular da reta, ou seja, maior influência exerce a quantidade de pasta sobre os resultados de resistência à compressão. Para a/c mais alto (0,55) há um aumento de resistência com o aumento da quantidade de pasta, porém o aumento não é tão significativo quanto para a/c mais baixos. Para o a/c de 0,35 o aumento da resistência com aumento do teor de excesso de pasta é bastante evidente. Uma das possíveis explicações para esse comportamento é que para a/c mais altos a maior quantidade de água, como já exposto anteriormente, enfraquece a matriz do concreto e a zona de transição.

Da análise dos resultados expostos ao longo do presente item, optou-se por dar prosseguimento ao presente estudo do traço EP - (5) com AC 0,35. Esta composição foi escolhida pois apresentou a melhor combinação das características no estado fresco, associado a um elevado fator de preservação de forma, boa adesão entre as partículas demonstrada no *squeeze-flow*, além de apresentar acabamento superficial satisfatório e os melhores resultados de resistência mecânica à compressão.

4.4 COMPARAÇÃO ENTRE O CONCRETO COM AGREGADOS NATURAL E RECICLADO

A partir da análise dos resultados dos traços estudados no item anterior, optou-se por prosseguir o estudo com o traço EP - (5) com AC 0,35, sendo as propriedades deste comparadas às do concreto convencional. Na Tabela 28 são apresentadas as características analisadas em ambos os traços.

Tabela 28 - Resultados dos ensaios para concretos de referência e EP - (05) com AC 0,35

Ensaio	Concreto com agregados convencionais	Concreto com agregados reciclados
Resistência à compressão axial (MPa)	14,81 ± 1,24	11,90 ± 0,73
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	2,29 ± 0,30	0,83 ± 0,05
Absorção de Água (%)	5,54 ± 0,11	4,44 ± 0,18
Índice de vazios (%)	12,36 ± 0,20	8,82 ± 0,34
Massa específica (g/cm ³)	2,55 ± 0,01	2,18 ± 0,01
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	28,12 ± 0,71	17,32 ± 0,11
Fator de Preservação de forma	0,94	0,88
Consumo de cimento (kg/m ³)	300	437
Custo de uma peça de meio-fio (R\$)	7,40	8,66

Fonte: Autoria própria (2017)

A partir da análise da Tabela 28 pode-se notar que o concreto com agregados reciclados apresentou resistência à compressão aproximadamente 20% menor do que a atingida pelo concreto referência, mesmo sendo produzido com consumo de cimento aproximadamente 45% maior. Esse fato está de acordo com o encontrado na literatura (AMADEI, 2011; ETXEBERRIA *et al.*, 2007; MATAR; EL DALATI, 2012; SOUTSOS *et al.*, 2004), de que concretos com substituição dos agregados reciclados por agregados convencionais necessitam de maior consumo de cimento para atingir resistências semelhantes. Porém, no caso do concreto em estudo, o aumento teve que ser muito maior para alcançar resistência próxima ao de referência e, uma possível explicação para isso é a proporção de agregados na mistura do concreto. Conforme apresentado na Figura 6, o concreto *no slump* apresenta proporcionalmente mais agregados na composição. Como as características dos agregados reciclados influenciam negativamente na resistência, o fato deste tipo de concreto apresentar maior percentual de agregados impacta em uma maior queda da resistência, e um maior consumo de cimento para atingir maiores resistências. De forma análoga, a resistência à tração também foi menor no concreto com agregados reciclados do que no concreto referência.

Com a análise dos resultados, pode-se observar que o índice de vazios do concreto com agregados reciclado é aproximadamente 30% menor do que a do concreto convencional. Esse fato se deve, principalmente, pelo maior teor de excesso de pasta do concreto com agregados reciclados. Quanto maior o excesso de pasta mais vazios entre os agregados são preenchidos e, conseqüentemente, menor o índice de vazios.

Pode-se observar a influência do agregado reciclado também na absorção de água e massa específica dos concretos. Sabe-se que este material, de forma geral, apresenta menor massa específica e maior absorção de água quando comparado ao agregado natural, conforme resultados apresentados no item 4.1. Com relação a massa específica dos concretos em questão, pode-se notar uma redução nos valores na ordem de 15%. As características do agregado também são responsáveis pelo aumento da absorção de água, não tão expressiva pelo aumento do teor de excesso de pasta. Segundo classificação proposta por Helene (1983), ambos seriam enquadrados na categoria de concretos normais, com valores de absorção de água entre 4,2 e 6,3%.

Seguindo a mesma tendência das demais características, o módulo de elasticidade do concreto produzido com agregados reciclados é menor que o do concreto referência. As hipóteses para a queda do valor dessa propriedade são a menor massa específica e a fragilidade da zona de transição.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), quanto maior a quantidade de agregados densos em uma mistura, maiores são os valores de módulo de elasticidade obtidos e, desta forma, o uso de agregados parcialmente porosos na mistura, como é o caso do agregado em estudo, diminui o módulo (LEITE, 2001).

Apesar de ser atribuído um aumento no valor do módulo de elasticidade pelo benefício na porosidade dos agregados reciclados, que promove uma melhor aderência entre a matriz e os agregados, acredita-se que a substituição total do agregado natural por agregado ARC inverte esse comportamento. Os prejuízos da porosidade dos agregados reciclados em grande volume é maior do que qualquer benefício que a zona de transição possa trazer para o módulo de elasticidade (LEITE, 2001). Desta forma, o menor valor de módulo de elasticidade deve-se também à maior porosidade da capa de argamassa que envolve o agregado.

O fator de preservação de forma do concreto referência foi maior do que o concreto com agregados reciclados, e isso se deve principalmente ao maior volume de pasta do segundo, conforme já discutido em itens anteriores. Porém, ambos apresentam $FPF > 0,7$, classificando-os como concreto *no slump* e sendo adequados para produção de artefatos de concreto com desmoldagem imediata.

Para a análise da viabilidade econômica do uso do concreto com agregados reciclados para a fabricação de meios-fios, foram usadas como referência as dimensões indicadas pela Companhia Estadual de Habitação e Obras Públicas - CEHOP, conforme Figura 70 abaixo.

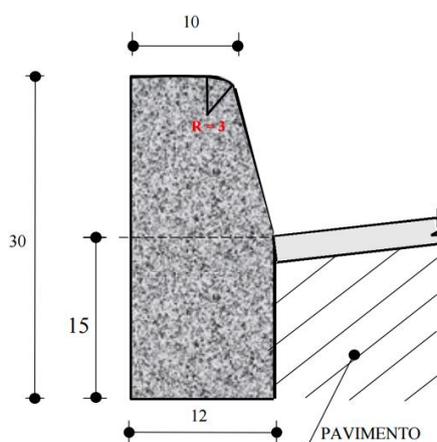


Figura 70 - Dimensões do meio-fio simples
Fonte: CEHOP (2017)

De acordo com o esquema apresentado pela Figura 70 e comprimento de 1 metro, dimensão máxima indicada pela mesma especificação técnica, o volume de concreto para fabricação de cada peça é de $0,0344 \text{ m}^3$.

Os consumos e valores de mercado encontrados para cada material utilizado na fabricação dos concretos é apresentado na Tabela 29.

Tabela 29 - Custo dos materiais utilizados para produção dos concretos

Concreto	Material	Custo mercado	Custo (R\$/m³)
REF - 01	Cimento	R\$ 0,50/kg	R\$ 150,00
	Agregado miúdo	R\$ 98,02/m ³	R\$ 28,41
	Agregado graúdo	R\$ 84,67/m ³	R\$ 36,64
EP - (05) AC 0,35	Cimento	R\$ 0,50/kg	R\$ 218,65
	Agregado miúdo	R\$ 47,00/m ³	R\$ 13,62
	Agregado graúdo	R\$ 47,00/m ³	R\$ 19,56

Fonte: Autoria própria (2017)

Com os valores apresentados na Tabela 29 pode-se calcular os custos para fabricação de uma peça de meio fio. A peça produzida com o concreto REF-01 é de R\$7,40, enquanto a peça produzida com o concreto EP - (05) com AC 0,35 é de R\$ 8,66.

O valor de um metro cúbico de areia de ARC é cerca de metade do valor do m³ da areia convencional. O custo do pedrisco ARC é cerca de 45% menor que o pedrisco convencional. Apesar dos agregados reciclados apresentarem valores mais atrativos economicamente, a produção do meio fio com o traço que utiliza agregados reciclados é cerca de 17% maior do que o custo de fabricação de meios-fios com agregados naturais.

Essa diferença se deve ao maior consumo de cimento necessário para atingir a resistência necessária do concreto com agregados reciclados. E enquanto o concreto com agregados convencionais apresenta consumo de cimento de 300 kg/m³, o concreto com agregados reciclados utiliza 437 kg/m³ para atingir a resistência mínima de 11 MPa, sendo que essa diferença afetou significativamente o custo da produção desse concreto.

5 CONCLUSÕES

No capítulo que finaliza este trabalho são apresentadas as conclusões em relação aos objetivos estabelecidos.

Este trabalho teve como objetivo verificar a influência da substituição total dos agregados convencionais por agregados reciclados no concreto *no slump*. Em uma primeira etapa foram avaliadas as características dos agregados e a influência do teor de pré-molhagem. Em uma segunda etapa, foram verificadas a influência do volume de pasta e da relação água/cimento em nove diferentes composições baseadas em um planejamento experimental de 2 fatores e 3 níveis. E finalmente, em uma terceira etapa, foi feita a comparação das propriedades do concreto referência com o concreto que apresentou os melhores resultados na etapa do estudo anterior das composições.

De modo mais específico pode-se chegar às seguintes conclusões:

- Em relação às características dos agregados reciclados de concreto:
 - devido à distribuição granulométrica do agregado graúdo reciclado, foi necessário realizar o peneiramento para que este se encaixasse nos requisitos na norma;
 - tanto a areia quanto o pedrisco reciclados apresentaram valores de absorção de água maiores que os recomendados pela NBR 15116 (ABNT, 2004), fator que impacta negativamente nas características dos concretos produzidos com esses agregados;
 - o agregado graúdo reciclado apresentou morfologia mais arredondada que o agregado natural, fato que evidencia a capa de argamassa do agregado reciclado;
 - o ensaio de massa unitária indicou a composição 40% de areia e 60% de pedrisco como a mais compactada tanto em relação ao agregado graúdo reciclado peneirado quanto lavado.

- Em relação ao estudo da pré-molhagem:
 - os valores obtidos para o ensaio de abatimento de tronco de cone foram similares para as cinco taxas de pré-molhagem. Com o fator de

preservação de forma foi possível concluir que todos os concretos (com exceção da taxa de pré-molhagem de 50%, a qual sofreu segregação) apresentaram excelente capacidade de manter sua forma;

- o ensaio de *squeeze-flow* mostrou-se sensível para captar as diferenças entre os concretos;
 - com os resultados dos ensaios foi possível concluir que a taxa de 75% é a mais adequada para o tipo de agregado e concreto em questão.
- Em relação ao estudo das composições:
 - com a produção dos traços, foi possível notar que quanto menor a relação a/c e maior o volume de pasta, maiores são os valores de resistência à compressão axial;
 - os ensaios de fator de preservação de forma e *squeeze-flow* foram sensíveis e retrataram de maneira efetiva as mudanças de a/c e teor de pasta;
 - não foram encontradas correlações entre o fator de preservação de forma, o *squeeze-flow* e a resistência a compressão axial;
 - com base na análise estatística realizada pôde-se concluir que o teor de excesso de pasta e a relação a/c, bem como a interação entre elas, exerceram influência nos resultados de resistência à compressão axial.
 - com a análise de todos os resultados obtidos nessa etapa, optou-se por prosseguir o estudo com o traço EP - (05) com AC 0,35;
 - Em relação à comparação entre os concretos com agregados natural e reciclado:
 - o concreto com substituição total dos agregados convencionais por agregados reciclados apresentou propriedade tanto no estado fresco como no estado endurecido inferiores às encontradas no concreto referência;
 - não foi possível a obtenção de concretos com 100% de agregados ARC com a mesma resistência à compressão e consumo de cimento do concreto referência. Apesar disso, a teoria do excesso de pasta

mostrou-se adequada para a elaboração de traços para concreto *no slump*.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao longo da elaboração do presente trabalho foram encontradas algumas lacunas que serão apresentadas como sugestões para trabalhos futuros:

- avaliar o comportamento do concreto *no slump* com diferentes teores de substituição de agregados naturais por agregados reciclado;
- realizar um estudo com outros métodos de dosagem para concreto *no slump* que possam ser aplicadas em concretos com agregados reciclados;
- realizar estudo da perda da trabalhabilidade ao longo do tempo em concretos que utilizam agregados reciclados;
- avaliar os mecanismos de transporte interno de água, visando esclarecer a influência da pré-molhagem dos agregados reciclados;
- avaliar a zona de transição pasta/agregado dos concretos com agregados reciclados.

6 REFERÊNCIAS

- ABCP. **Boletim técnico - Meio fio pré-moldado de concreto**. São Paulo, 1997.
- ABNT NBR 12821. **Preparação de concreto em laboratório - Procedimento**. Rio de Janeiro. 2009
- ABNT NBR 13280. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido**. Rio de Janeiro. 2014
- ABNT NBR 15114. **Resíduos sólidos da Construção civil - Áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação**. Rio de Janeiro. 2004
- ABNT NBR 15116. **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos**. Rio de Janeiro. 2004
- ABNT NBR 15839. **Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método squeeze-flow**. Rio de Janeiro. 2010
- ABNT NBR 5738. **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro. 2015
- ABNT NBR 5739. **Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro. 2007
- ABNT NBR 6118. **Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro. 2014
- ABNT NBR 7211. **Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro. 2009
- ABNT NBR 7222. **Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro. 2011
- ABNT NBR 9778. **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro. 2009
- ABNT NBR NM 248. **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro. 2003
- ABNT NBR NM 30. **Agregado miúdo - Determinação da absorção de água**. Rio de Janeiro. 2001
- ABNT NBR NM 45. **Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro. 2006

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

ABNT NBR NM 67. **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro. 1998

ABRECON. **A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil.** Curitiba: Relatório Pesquisa Setorial 2013, 2013.

ABRECON. **Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição.** Curitiba. 2016

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil - 2015.** São Paulo, 2015.

ACI 116R-90. **Cement and Concrete Terminology.** Detroit. 2000

ACI 211.3R-02. **Guide for Selecting Proportions for No slump Concrete.** Detroit. 2002

AFNOR XP P18-540, A. F. D. N. **Granulats - Définitions, conformité, specifications.** Paris. 1997

AGULLO, L.; TORALLES-CARBONARI, B.; GETTU, R.; AGUADO, A. Fluidity of cement pastes with mineral admixtures and superplasticizer—a study based on the Marsh cone test. **Materials and Structures**, v. 32, p. 479–489, 1999.

AMADEI, D. I. B. **Avaliação de blocos de concreto para pavimentação produzidos com resíduos de construção e demolição do município de Juranda/PR.** 153 f. Universidade Estadual de Maringá (Dissertação de mestrado), Maringá, 2011.

ANDRADE, R.; ROCHA, J.; PRUDÊNCIA JR, L. Aproveitamento do entulho da construção civil como agregado para concreto. **Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental: Gerenciamento de resíduos e certificação ambiental**, v. 2, p. 138–142, 1998.

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos.** 236 f. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Tese de Doutorado), São Paulo, 2005.

ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados.** 172 f. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Dissertação de Mestrado), São Paulo, 2000.

ANGULO, S. C.; ULSEN, C.; JOHN, V. M.; KAHN, H. Desenvolvimento De Novos Mercados Para a Reciclagem Massiva De Rcd. **V Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem Na Construção Civil**, n. 1, p. 1–12, 2002.

ANGULO, S.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. Desenvolvimento sustentável e reciclagem de resíduos na construção civil. **IV Seminário Desenvolvimento**

Sustentável ea Reciclagem na construção civil-materiais reciclados e suas aplicações, n. 1, p. 13, 2000.

ARAÚJO, D. L.; FELIX, L. P.; SILVA, L. C.; SANTOS, T. M. INFLUÊNCIA DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO EM PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 11, n. 1, 2016.

ASTM C215. **Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens**. West Conshohocken. 2008

ATZENI, C.; MASSIDDA, L.; SANNA, U. Comparison between rheological models for portland cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 15, p. 511–519, 1985.

BANFILL, P. F. G. The Rheology of Fresh Mortar - A Review. **6th Brazilian and 1st International Symposium on Mortar Technology**, p. 73–82, 2005.

BANTHIA, N.; CHAN, C. Use of Recycled Aggregate in Plain Fiber-Reinforced Shotcrete. **Concrete International**, v. 22, p. 41–45, 2000.

BARBUDO, A.; DE BRITO, J.; EVANGELISTA, L.; BRAVO, M.; AGRELA, F. Influence of water-reducing admixtures on the mechanical performance of recycled concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 59, p. 93–98, 2013.

BARROS, E.; FUCALE, S. O Uso De Resíduos Da Construção Civil Como Agregados Na Produção De Concreto. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 2, n. 1, 2016.

BAZUCO, R. S. **Utilização de agregados reciclados de concreto para produção de novos concretos**. Universidade Federal de Santa Catarina (Dissertação de Mestrado), Florianópolis, 1999.

BERTOLUCCI, F. **Investigação de compósitos cimentícios para preenchimento de juntas da interface e de nichos em ligações de estruturas pré-moldadas**. Universidade Estadual Paulista (Dissertação de Mestrado), Ilha Solteira, 2010.

BONEN, D.; SARKAR, S. L. The superplasticizer adsorption capacity of cement pastes, pore solution composition, and parameters affecting flow loss. **Cement and Concrete Research**, v. 25, p. 1423–1434, 1995.

BORNEMANN, R. Untersuchung zur Modellierung des Frisch- und Festbetonverhaltens erdfeuchter Betone,. **Structural Materials and Engineering Series**, v. 4, 2005.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, v. 61, p. 178–189, 2015.

BRETAS, R.; D'AVILA, M. **Reologia de polímeros fundidos**. São Carlos: Editora

da UFSCar, 2000.

BUTTLER, A. M. **Uso de agregados reciclados de concreto em blocos de alvenaria estrutural**. Universidade de São Paulo (Tese de doutorado), São Carlos, 2007.

CABRAL, A. E. B.; SCHALCH, V.; DAL MOLIN, D. C. C.; RIBEIRO, J. L. D. Modelagem da resistência à compressão de concretos produzidos com agregados reciclados de RCD. **Minerva**, v. 4, n. 1, p. 75–84, 2007.

CAMARGO, A. **Reciclagem nas Minas de Entulho**. São Paulo, 1995.

CANNON, R. W. Proportioning No slump Concrete for Expanded Applications. **Concrete International**, v. 4, n. 8, p. 43–47, 1982.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Caracterização reológica de argamassa pelo método de squeeze flow. **VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas**, p. 1–23, 2005.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Squeeze-flow aplicado a argamassas de revestimento: Manual de utilização. **Boletim técnico da Escola Politécnica da USP**, v. 1, p. 1–36, 2010.

CARNEIRO, A. P.; CASSA, J. C.; DE BRUM, I. A.; VIEIRA, A. M.; COSTA, A. D. B.; SAMPAIO, T. S.; ALBERTE, E. P. V. **Construction waste characterisation for production of recycled aggregate**. Salvador, 2000. v. 1.

CARRIJO, P. M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Dissertação de Mestrado), São Paulo, 2005.

CASTRO, A. L. DE. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. 334 f. Universidade de São Paulo (Tese de Doutorado), São Carlos, 2007.

CASTRO, A. L. DE; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. Desempenho de concretos avançados para a construção civil, formulados a partir do método de dosagem computacional. **Cerâmica**, v. 55, p. 233–251, 2009.

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

CASTRO, A. L. DE; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, p. 18–32, 2009.

CEHOP. **ES000205 - Especificações técnicas - meios-fios e guias**. Aracajú. Disponível em: <<http://187.17.2.135/orse/esp/ES000205.pdf>>. Acesso em: 7 abr. 2017. 2017

CHAPPUIS, J. **Rheological measurements with cement pastes in viscometers: a comprehensive approach**. London: E & FN Spon, 1990.

CHEN, H.-J.; YEN, T.; CHEN, K.-H. Use of building rubbles as recycled aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 125–132, 2003.

CLAISSE, P. A.; LORIMER, P.; OMARI, M. AL. Workability of Cement Pastes. **Materials Journal**, v. 98, p. 476–482, 2001.

CONAMA, C. N. DO M. A. **Resolução Nº 307**. [S.l.]: Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Habitação. Publicada no Diário Oficial da União em 17/07/2002. 2002

CORINALDESI, V. Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 9, p. 1616–1620, 2010.

COSTA, E. B. C.; ANTUNES, R. P. DO N.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Avaliação do Efeito da Reologia e da Energia de Impacto na Resistência de Aderência de Revestimentos de Argamassa. **Congresso nacional de argamassas de construção**, 2010.

COUTINHO, A. DE S. **Fabrico e propriedades do betão**. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1997.

DAL MOLIN, D. C. C. Técnicas Experimentais para Estudo da Microestrutura. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**, v. 14, p. 403–436, 2007.

DAMINELI, B. L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes : controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas**. 273 f. Universidade de São Paulo (Tese de Doutorado), São Paulo, 2013.

DAY, K. Equivalent Slump. **International Rilem conference – production methods and workability of concrete**, 1996.

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. Mixture-proportioning of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 1699–1704, 2002.

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T.; HU, C.; SZITKAR, J. C.; JOLY, M.; DERKX, F. Evolution of the workability of superplasticised concretes: assessment with the BTRHEOM rheometer. **International Rilem conference – production methods and workability of concrete**, p. 377–388, 1996.

DEVENNY, A.; KHALAF, F. . The use of crushed brick as coarse aggregate in concrete. **Mansory International**, v. 12, p. 81–84, 1999.

DILBAS, H.; ŞİMŞEK, M.; ÇAKIR, Ö. An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume. **Construction and Building Materials**, v. 61, p. 50–59, 2014.

DNER ES-290. **Drenagem - meios-fios e guias**. Rio de Janeiro. 1997

DO Ó, S. W. **Análise da retenção de água em argamassas de revestimento aditivadas**. 173 f. Universidade de Brasília (Dissertação de Mestrado), Brasília, 2004.

DOMONE, P. L. J.; YONGMO, X.; BANFILL, P. F. G. Developments of the two-point workability test for high-performance concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 51, p. 171–179, 1999.

ENGMANN, J.; SERVAIS, C.; BURBIDGE, A. S. Squeeze flow theory and applications to rheometry: A review. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 132, n. 1, p. 1–27, 2005.

ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARÍ, A.; BARRA, M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 5, p. 735–742, 2007.

FABRO, F.; GAVA, G.; GRIGOLI, H. Influence of fine agregattes particle shape in concrete performance. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 4, p. 191–212, 2011.

FEDUMENTI, M. B. **Avaliação da influência da cinza de casca de arroz no comportamento de concretos com agregado reciclado de concreto em relação a propriedades mecânicas e de durabilidade, com ênfase no transporte de íons cloreto**. 134 f. Universidade do Vale do Rio Sinos (Dissertação de Mestrado), São Leopoldo, 2013.

FERNANDES, M.; GUEDES, G. G. Gestão ambiental de resíduos sólidos da construção civil no Distrito Federal. **OUTRAS PALAVRAS**, v. 10, n. 2, 2014.

FERRARIS, C. F. Measurement of Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report. **Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology**, v. 104(5), p. 461–478, 1999.

FERRARIS, C. F.; GAIDIS, J. M. Connection between the rheology of concrete and rheology of cement paste. **Materials Journal**, v. 89, p. 388–393, 1992.

FERRARIS, C. F.; OBLA, K. H.; HILL, R. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 245–255, 2001.

FERREIRA, A. R. L.; MOREIRA, H. C. **Análise Crítica da Gestão de Resíduos de Construção Civil: Estudo de caso do Município do Rio de Janeiro**. Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro (Monografia de Graduação), Rio de, 2013.

FERREIRA, E. E.; BRANDÃO, P. R. G.; KLEIN, B.; PERES, A. E. C. Reologia de suspensões minerais: uma revisão. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 58, n. 1, p. 83–87, 2005.

FERREIRA, L. M. M. **Betões estruturais com incorporação de agregados grossos reciclados de betão: Influência da pré-saturação**. 158 f. Universidade Técnica de Lisboa (Dissertação de mestrado), Lisboa, 2007.

FILHO, J. A. P.; DIAS, A. J. G.; CORTES, P. L.; DUARTE, E. B. L. Manejo de resíduos de demolição gerados durante obras da arena de futebol palestra Itália (Allianz Parque) localizada na cidade de São Paulo/Brasil. **HOLOS - Instituto Federal de Educacao Ciencia e Tecnologia do Rio Grande do Norte**, v. 29, n. 6, 2013.

FOLINO, P.; XARGAY, H. Recycled aggregate concrete – Mechanical behavior under uniaxial and triaxial compression. **Construction and Building Materials**, v. 56, p. 21–31, 2014.

GHIO, V. A. **The rheology of fresh concrete and its effect on the shotcrete process**. Berkeley, 1993.

GOLDSTEIN, H. Not your father's concrete. **Civil Engineering**, v. 65, p. 60–63, 1995.

GONÇALVES, R. D. C. C. **Agregados Reciclados De Resíduos De Concreto - Um Novo Material Para Dosagens Estruturais**. 148 f. Universidade de São Paulo (Dissertação de Mestrado), São Carlos, 2001.

HACKLEY, V.; FERRARIS, C. The use of nomenclature in dispersion science and technology. **Special Report 960-3**, 2001.

HAMASSAKI, L. T.; SBRIGHI NETO, C.; FLORINDO, M. **Uso de entulho como agregado para argamassas de alvenaria**. 1996, São Pulo, 1996. p. 107–115.

HANSEN, T. C. **Recycling of demolished concrete and masonry**. London, 1992.

HANSEN, T.; NARUD, H. Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. **Concrete International**, v. 5, p. 79–83, 1983.

HELENE, P. R. L. La agresividad del médio y la durabilidad del hormigón. **Hormigón, AATH**, v. 10, p. 23–35, 1983.

HELENE, P. R.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1992.

HERMANN, A. **Empacotamento de agregados reciclados para concretos vibrocompactados**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Dissertação de Mestrado), Curitiba, 2016.

HOORNAHAD, H. **Toward Development of Self-Compacting No slump Concrete Mixtures**. 206 f. Shahid Bahonar University of Kerman (Dissertação de Mestrado), Tehran, 2014.

HOORNAHAD, H.; KOENDERS, E. A. B. A performance -based method for granular based method for granular -paste mix design. **Proceedings of the 9th**

international masonry conference, 2014.

HU, C.; DE LARRARD, F. The rheology of fresh high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 26, p. 283–294, 1996.

HUANG, W. L.; LIN, D. H.; CHANG, N. BIN; LIN, K. S. Recycling of construction and demolition waste via a mechanical sorting process. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 37, p. 23–37, 2002.

HÜSKEN, G.; BROUWERS, H. J. H. On the early-age behavior of zero-slump concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 42, p. 501–510, mar. 2012.

JADOVSKI, I. **Diretrizes técnicas e econômicas para usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Dissertação de Mestrado), Porto Alegre, 2005.

JOHANSEN, V.; ANDERSEN, P. **Particle Packing and Concrete Properties**. Westerville: American Ceramic Society, 1991.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 113 f. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Tese de Doutorado), São Paulo, 2000.

JORDANI, B. **Estudo do agregado graúdo reciclado de concreto como agente de cura interna em concreto com cinza de casca de arroz**. Universidade do Vale do Rio Sinos (Dissertação de mestrado), São Leopoldo, 2016.

JUAN, M. S. DE. **Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural**. Universidad Politécnica de Madrid (Tese de doutorado), Madrid, 2004.

KASAI, Y. Guideline and the present state of the reuse of demolish concrete in Japan. **RILEM proceedings**, p. 93, 1996.

KASAI, Y.; FUJII, T. Demolition and reuse of concrete and masonry. **Concrete International**, p. 24–28, 1989.

KAWATRA, S. K.; BAKSHI, A. K. On-line measurement of viscosity and determination of flow types for mineral suspensions. **International Journal of Mineral Processing**, v. 47, p. 275–283, 1996.

KHOSHKENARI, A. G.; SHAFIGH, P.; MOGHIMI, M.; MAHMUD, H. BIN. The role of 0–2mm fine recycled concrete aggregate on the compressive and splitting tensile strengths of recycled concrete aggregate concrete. **Materials & Design**, v. 64, p. 345–354, 2014.

KIKUCHI, M.; YASUNAGA, A.; EHARA, K. The total evaluation of recycled aggregate and recycled concrete. **International Rilem Symposium**, p. 367–378, 1993.

KNIGHTS, J. **Relative performance of high quality concretes containing**

recycled aggregates and their use in construction. London, 1998.

KOEHLER, E. P.; FOWLER, D. W. Summary of Concrete Workability Test Methods. **International Center for Aggregates Research**, p. 92, 2003.

KWAN, W. H.; RAMLI, M.; KAM, K. J.; SULIEMAN, M. Z. Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. **Construction and Building Materials**, v. 26, n. 1, p. 565–573, 2012.

LASSO, P. R. O.; VAZ, C. M. P.; OLIVEIRA, C. R. DE; BERNARDI, A. C. DE C. Caracterização De Resíduos De Construção E Demolição Reciclados (Rcd-R) Para Utilização Como Corretivo Da Acidez. **III Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais**, 2013.

LATTERZA, L. DE M. **Concreto com Agregado Graúdo Proveniente da Reciclagem de Resíduos de Construção e Um Novo Material para Fabricação de Painéis Leves de Vedação.** 130 f. Escola de Engenharia de São Carlos (Dissertação de Mestrado), São Carlos, 1998.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Tese de Doutorado), Porto Alegre, 2001.

LEITE, M. B.; CORDEIRO, L. N. P.; MASUERO, A. B.; DAL MOLIN, D. C. C. Proposta de adaptação do procedimento proposto por Leite (2001) para determinação da absorção de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição. **Congresso internacional sobre patologia e reabilitação de estruturas**, 2011.

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Tese de Doutorado), São Paulo, 2001.

LEVY, S. M. **Reciclagem do entulho de construção civil para utilização como agregado de argamassas e concretos.** 147 f. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Dissertação de Mestrado), São Paulo, 1997.

LEVY, S. M.; HELENE, P. R. L. Durability of concrete produced with mineral waste of civil construction industry. **CIB Symposium in construction and environment: theory into practice**, 2000.

LI, W.; XIAO, J.; SUN, Z.; KAWASHIMA, S.; SHAH, S. P. Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 1045–1055, 2012.

LI, X. Recycling and reuse of waste concrete in China: Part I. Material behaviour of recycled aggregate concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 53, n. 1, p. 36–44, 2008.

LIMA, J. A. R. DE. **Proposição de diretrizes para a produção e normalização de**

resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (Dissertação de Mestrado), São Paulo, 1999.

MACHADO JR., E. F.; AGNESINI, M. Estudo comparativo das propriedades físicas e mecânicas de microconcretos leves produzidos com argila expandida e com agregados reciclados de rejeitos de construção e demolição. **Jornadas Sudamericanas de ingenieria estructural**, 2000.

MACHADO JR, E. F.; LATTERZA, L. M.; MENDES, C. L. Influência do agregado graúdo, proveniente da reciclagem de rejeitos de construção e demolição (entulho), na perda da abatimento do concreto fresco edo concreto fresco e nas propriedades mecânicas do concreto endurecido. **Congresso Brasileiro do Concreto**, v. 40, 1998.

MACHADO, J. C. V. **Reologia e escoamento de fluidos - Ênfase na indústria do petróleo.** Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2002.

MACIEL, E. F. **Avaliação da lixiviação de cromo em monólito de concreto por imersão e irrigação.** Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Dissertação de mestrado), São Leopoldo, 2015.

MALTA, J. O.; SILVEIRA, V. S.; GONÇALVES, J. P.; TOLEDO FILHO, R. D. Influência da pré-saturação do agregado miúdo reciclado na viscosidade e resistência à compressão de argamassas. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 1, p. 85–98, 2014.

MANRICH, S.; PESSAN, L. A. **Reologia: conceitos básicos.** São Carlos, 1987.

MARINKOVIĆ, S.; RADONJANIN, V.; MALEŠEV, M.; IGNJATOVIĆ, I. Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. **Waste Management**, v. 30, n. 11, p. 2255–2264, 2010.

MATAR, P.; EL DALATI, R. Using recycled concrete aggregates in precast concrete hollow blocks. **Materialwissenschaft und Werkstofftechnik**, v. 43, n. 5, p. 388–391, maio 2012.

MEFTEH, H.; KEBÄILI, O.; OUCIEF, H.; BERREDJEM, L.; ARABI, N. Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 54, p. 282–288, 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo, 1994.

MIN, B. H.; ERWIN, L.; JENNINGS, H. M. Rheological behaviour of fresh cement paste as measured by squeeze flow. **Journal of Materials Science**, v. 29, n. 5, p. 1374–1381, 1994.

MIRANDA, L. F. R.; ANGULO, S. C.; CARELI, É. D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído**, v. 9, p. 57–71, 2009.

NAGALLI, A. **Gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil**. São Paulo: Oficina de textos, 2016.

NASCIMENTO, F. A. T.; VIEIRA, A. J. B.; BARROSO, I. R. S.; LOPES, J. P. Reutilização E Reciclagem De Resíduos Sólidos Gerados Na Construção Civil. **Ciências exatas e tecnológicas**, v. 3, p. 141–152, 2015.

NEHDI, M.; MINDESS, S.; AÏTCIN, P.-C. Rheology of High-Performance Concrete: Effect of Ultrafine Particles. **Cement and Concrete Research**, v. 28, p. 687–697, 1998.

NEVILLE, A. M. **Properties of concrete**. London, 1995.

NOGUEIRA, J. R. S. **Avaliação Da Influência Do Método De Mistura Nas Propriedades De Concretos Produzidos Com Agregado Graúdo Reciclado De Concreto**. 122 f. Universidade do Vale do Rio Sinos (Dissertação de mestrado), São Leopoldo, 2015.

OH, S.; NOGUCHI, T.; TOMOSAWA, F. Toward mix design for rheology of self-compacting concrete. **Self-Compacting Concrete: Proceedings of the First International RILEM Symposium**, 1999.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-Compacting Concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1, p. 5–15, 2003.

OLIVEIRA, C. O. E. **Análise das propriedades reológicas de materiais cimentícios associando o conceito de empacotamento de partículas**. Universidade Estadual Paulista (Dissertação de Mestrado), Ilha Solteira, 2013.

OLIVEIRA, D. F.; SANTOS, V. S.; LIRA, H. L.; MELO, A. B.; NEVES, G. A. Durabilidade de Compósitos de Concreto de Cimento Portland Produzidos com Agregados Reciclados da Construção Civil. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 2, p. 30–36, 2006.

OLIVEIRA, I.; STUDART, A.; PILEGGI, R.; PANDOLFELLI, V. Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico. **Fazendo arte editorial**, p. 224, 2000.

OLIVEIRA, M. B. DE. Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón armado. **Informes de la Construcción**, v. 48, p. 50, 1997.

OTSUKI, N.; MIYAZATO, S.; YODSUDJAI, W. Influence of Recycled Aggregate on Interfacial Transition Zone, Strength, Chloride Penetration and Carbonation of Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 15, p. 41–47, 2003.

PADOVAN, R. G. **Influência da pré-molhagem nas propriedades de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto**. 154 f. Universidade do Vale do Rio Sinos (Dissertação de Mestrado), São Leopoldo, 2013.

PELLISSARI, V. **Propriedades de concretos produzidos através da utilização de**

agregados reciclados de concreto. 122 f. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Dissertação de mestrado), Curitiba, 2016.

PENG, G.-F.; HUANG, Y.-Z.; WANG, H.-S.; ZHANG, J.-F.; LIU, Q.-B. Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete at Low and High Water/Binder Ratios. **Advances in Materials Science and Engineering**, p. 1–6, 2013.

PEREIRA, P. M.; VIEIRA, C. S. Resíduos de Construção e Demolição. Um estado de arte visando a sua valorização em Trabalhos Geotécnicos. 2013.

PIETERSEN, H.; FRAAY, A.; HENDRIKS, C. Application of recycled aggregates in concrete: experiences from the Netherlands. **CANMET/ACI International Symposium on Sustainable Development of the Cement and Concrete Industry**, 1998.

PINTO, T. DE P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana.** 218 f. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Tese de Doutorado, São Paulo, 1999).

POON, C. S.; SHUI, Z. H.; LAM, L.; FOK, H.; KOU, S. C. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 1, p. 31–36, 2004.

QUEBAUD, M.; ZAHARIEVA, R.; WIRQUIN, E.; BUYLE-BODIN, F. Influência do teor em agregados provenientes da reciclagem de materiais de demolição (agregados reciclados) na permeabilidade do concreto. **41º Congresso Brasileiro do Concreto**, v. 1, p. 16p, 1999.

QUEVEDO, V. R. B. **Estudo de composição para concreto extrudável para pré-fabricados.** 179 f. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Dissertação de Mestrado), Curitiba, 2013.

RAGO, F.; CINCOTTO, M. Influência do Tipo de cal hidratada na reologia de pastas. **Boletim técnico da Escola Politécnica da USP**, p. 24, 1999.

REIS, J. F. A. **Determinação de Parâmetros Reológicos de Concretos Através do Ensaio de Abatimento de Tronco de Cone Modificado : Estudo de Caso.** Universidade Estadual Paulista (Dissertação de Mestrado), Ilha Solteira, 2008.

RIBEIRO, D.; DE MOURA, L. S.; PIROTE, N. S. DOS S. Sustentabilidade: Formas de Reaproveitar os Resíduos da Construção Civil. **Revista de Ciências Gerenciais**, v. 20, n. 31, p. 41, 2016.

ROY, D. M.; SCHEETZ, B. E.; SILSBEE, M. R. Processing of Optimized Cements and Concretes Via Particle Packing. **MRS Bulletin**, v. 18, p. 45–49, 1993.

RYU, J. S. Improvement on strength and impermeability of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. **Journal of Materials Science Letters**, v. 20, n. 21, p. 1565–1567, 2002.

SAAK, A. W.; JENNINGS, H. M.; SHAH, S. P. The influence of wall slip on yield

stress and viscoelastic measurements of cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 205–212, 2001.

SAGOE-CRENTSIL, K.; TAYLOR, A.; BROWN, T. Properties of concrete incorporating fly ash and recycled demolition waste. **Materials and Technologies for Sustainable Construction—CIB World Building Congress**, p. 443–449, 1998.

SALEM, R. M.; BURDETTE, E. G. Role of Chemical and Mineral Admixtures on the Physical Properties and Frost-Resistance of Recycled Aggregate Concrete. **Materials Journal**, v. 95, p. 558–563, 1998.

SCHULZ, R. R.; HENDRICKS, C. F. **Recycling of masonry rubble**. Londres, 1992.

SILVA, A. B. DA; MACIEL, J. C. S. Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. **Revista Igapó - Revista de Educação Ciência e Tecnologia do IFAM**, v. 3, 2014.

SILVA, I. J. DA. **Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: Propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura**. Universidade de São Paulo (Tese de doutorado), São Carlos, 2000.

SIMPSON, D. Recycled aggregates in concrete : a realist's perspective. **Concrete**, v. 33, 1999.

SOBHANI, J.; NAJIMI, M.; POURKHORSHIDI, A. R.; PARHIZKAR, T. Prediction of the compressive strength of no slump concrete: A comparative study of regression, neural network and ANFIS models. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 709–718, 2010.

SOUTSOS, M. N.; JONES, N.; MILLARD, S. G.; BUNGEY, J. H.; TICKELL, G.; GRADWELL, J.; TICKELL, R. G. Precast concrete building blocks made with aggregates derived from construction and demolition waste. **Use of Recycled Materials in Buildings and Structures**, p. 10, 2004.

STROEVEN, M.; STROEVEN, P. SPACE system for simulation of aggregated matter application to cement hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1299–1304, 1999.

STUTECH, A. Stutech report No. 22. **STUTECH — Studievereniging Betontechnologie**, 2005.

SURYA, M.; KANTA RAO, V.; LAKSHMY, P. Recycled Aggregate Concrete for Transportation Infrastructure. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 104, p. 1158–1167, 2013.

TANG, K.; SOUTSOS, M. N.; MILLARD, S. . **Concrete paving products made with recycled demolition aggregates**. London: Taylor e Francis Group, 2007.

TANNER, R. **Engineering rheology**. Oxford: OUP, 2000.

TATTERSALL, G. **Effect of vibration on the rheological properties of fresh**

cement pastes and concretes. London: E & FN Spon, 1991.

TATTERSALL, G. H.; BANFILL, P. **The rheology of fresh concrete**. London, 1983.

TAVAKOLI, M.; SOROUSHIAN, P. Drying shrinkage behavior of recycled aggregate concrete. **Concrete International**, v. 18, p. 58–61, 1996a.

TAVAKOLI, M.; SOROUSHIAN, P. Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate. **Materials Journal**, v. 93, p. 182–190, 1996b.

TAVARES, L. M.; KAZMIERCZAK, C. DE S. Estudo da influência dos agregados de concreto reciclado em concretos permeáveis. **RIEM - IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 9, n. 1, 2016.

TOMOSAWA, F.; NOGUCHI, T. **New technology for the recycling of concrete - Japanese experience**. New York, 2000.

TRIGO, A. P. M. **Estudo da dopagem de agregados para finalidade de uso em concretos estruturais**. Universidade de São Paulo (Tese de Doutorado), São Carlos, 2012.

TROIAN, A. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons cloretos**. 129 f. Universidade do Vale do Rio Sinos (Dissertação de Mestrado), São Leopoldo, 2010.

VAN DER WEGEN, G.; HAVERKORT, R. Recycled construction and demolition wastes as a fine aggregate for concrete. **Proceedings of the International Symposium on Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate**, v. 1112, 1998.

VÁZQUEZ, E. Utilización de residuos en la CEE: Aspectos políticos y ambientales. Estado del arte y normalización. **Workshop reciclagem na construção civil, alternativa econômica para proteção ambiental**, 1997.

VÁZQUEZ, E.; HENDRIKS, C.; JANSSEN, G. Draft of Spanish regulations for the use of recycled aggregate in the production of structural concrete. **International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures**, p. 511–525, 2004.

VIEIRA, G. L. **Estudo Do Processo De Corrosão Sob a Ação De Íons Cloreto Em Concretos Obtidos a Partir De Agregados Reciclados De Resíduos De Construção E Demolição**. 151 f. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Dissertação de mestrado), Porto Alegre, 2003.

WEIDMANN, D. F. **Contribuição ao estudo da influência da forma e da composição granulométrica de agregados miúdos de britagem nas propriedades de concretos de cimento Portland**. Universidade Federal de Santa Catarina (Dissertação de Mestrado), Florianópolis, 2008.

WERLE, A. P. **Determinação de propriedades de concretos com agregados**

reciclados de concreto, com ênfase na carbonatação. 162 f. Universidade do Vale do Rio Sinos (Dissertação de mestrado), São Leopoldo, 2010.

YOSHIDA, A.; BARROS, M. Caracterização de argamassas no estado fresco: peculiaridade na análise de argamassas industrializadas. **I Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas.**, 1995.

ZEGA, C. J. Efecto del agregado grueso reciclado sobre las propiedades del hormigon. **Revista de la Facultad de Ingeniería**, v. 31, n. 1, 2016.

ZHANG, W. T.; INGHAM, J. M. Using Recycled Concrete Aggregates in New Zealand Ready-Mix Concrete Production. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 22, n. 5, p. 443–450, 2010.

ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto.** 159 f. Universidade Estadual de Campinas (Dissertação de Mestrado), Campinas, 1997.

APÊNDICE A - ESTUDO DA PRÉ-MOLHAGEM

Tabela A1 - ANOVA Resistência à compressão em função da pré-molhagem

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Média quadrática	Estatística de teste F	Valor p
Interação	226,90	1	226,90	1330,10	<0,000001
Pré-molhagem	7,10	3	2,50	13,90	0,000040
Erro	3,40	20	0,17		

Tabela A 2 - Teste de Tukey Resistência à compressão em função da pré-molhagem

PM	Média da Resistência (MPa)	1	2	3
PM 65	2,28	****		
PM 95	2,88	****	****	
PM 85	3,47		****	****
PM 75	3,67			****

APÊNDICE B - ESTUDO DA COMPOSIÇÃO

Tabela B1 - ANOVA Resistência à compressão para diferentes teores de excesso de pasta e a/c

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Média quadrática	Estatística de teste F	Valor p
Excesso de pasta (L)	220,9257	1	220,9257	143,5827	<0,000001
a/c(L)	104,9978	1	104,9978	68,2395	<0,000001
a/c(Q)	51,1223	1	51,1223	33,2251	<0,000001
1L by 2L	50,1487	1	50,1487	32,5923	<0,000001
Erro	93,8586	61	1,5387		

Tabela B2 - ANOVA Absorção para diferentes teores de excesso de pasta e a/c

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Média quadrática	Estatística de teste F	Valor p
Excesso de pasta (L)	390,422	1	390,422	316,931	<0,000001
Excesso de pasta (Q)	43,136	1	43,136	35,016	<0,000001
Interação	252,228	1	252,228	207,750	<0,000001
Erro	61,594	50	1,2319		

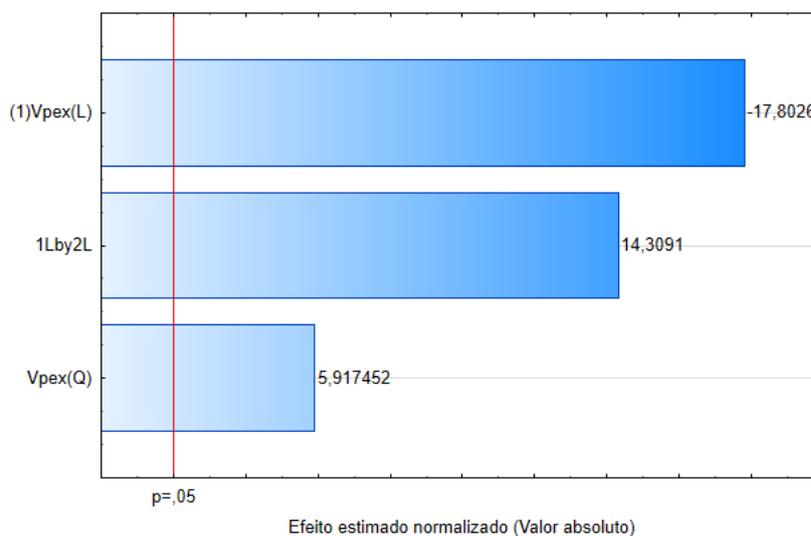


Figura B1 - Diagrama de Pareto - Absorção

Tabela B3 - ANOVA Massa específica para diferentes teores de excesso de pasta e a/c

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Média quadrática	Estatística de teste F	Valor p
Excesso de pasta	0,1355	2	0,0678	102,4	<0,000001
a/c	0,0047	2	0,0024	3,6	0,036083
Interação	0,1675	4	0,0419	63,3	<0,000001
Erro	0,0298	45	0,0007		

Tabela B4 - ANOVA Módulo de elasticidade para diferentes teores de excesso de pasta e a/c

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Média quadrática	Estatística de teste F	Valor p
Excesso de pasta	886,111	2	443,056	298,906	<0,000001
a/c	238,558	2	119,279	80,471	<0,000001
Interação	96,983	4	24,246	16,357	<0,000001
Erro	66,702	45	1,482		