UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ARQUITETURA E URBANISMO
Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo

WANDERLY GERALDO DA SILVA

***Concreto auto adensável com substituição parcial de
cimento por finos menores que 75 μ m de resíduo de telha
cerâmica vermelha: aspectos reológicos e físicos***

São Carlos – SP

2019

WANDERLY GERALDO DA SILVA

Concreto auto adensável com substituição parcial de cimento por finos menores que 75 µm de resíduo de telha cerâmica vermelha: aspectos reológicos e físicos

Versão Corrigida

(Versão original encontra-se na unidade que aloja o Programa de Pós-graduação)

Tese apresentada ao Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo – Campus de São Carlos, para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração:

Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia

Orientador:

Prof. Tít. Eduvaldo Paulo Sichieri

São Carlos – SP

2019

AUTORIZO A REPRODUCAO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRONICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Instituto de Arquitetura e Urbanismo
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Silva, Wanderly Geraldo
SSI586 Concreto auto adensável com substituição parcial
C de cimento por finos menores que 75 µm de resíduo de
telha cerâmica vermelha: aspectos reológicos e físicos
/ Wanderly Geraldo Silva; orientador Eduvaldo Paulo
Sichieri . -- São Carlos, 2019.
176 p.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo, Arquitetura, Urbanismo e
Tecnologia -- Instituto de Arquitetura e Urbanismo,
Universidade de São Paulo, 2019.

1. resíduo cerâmico. 2. Resíduo de construção. 3.
Concreto auto adensável. 4. Pozolanas. 5. Reologia
I. Sichieri , Eduvaldo Paulo , orient. II. Título.

Bibliotecária responsável pela estrutura de catalogação da publicação de acordo com a AACR2:
Brianda de Oliveira Ordonho Sígolo - CRB - 8/8229

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): Wanderly Geraldo da Silva

Título da tese: "Concreto auto adensável com substituição parcial de cimento por finos menores que 75 µm de resíduo de telha cerâmica vermelha: aspectos reológicos"

Data da defesa: 01/10/2019

Orientador: Prof. Dr. Eduvaldo Paulo Sichieri

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. Eduvaldo Paulo Sichieri
(IAU/USP)

Não votante

Prof. Dr. Javier Mazariegos Pablos
(IAU/USP)

APROVADO

Profa. Dra. Kelen Almeida Dornelles
(IAU/USP)

APROVADO

Prof. Dr. Antônio de Paula Peruzzi
(UFU)

APROVADO

Prof. Dr. João Fernando Dias
(UFU)

APROVADO

Profa. Dra. Sheyla Mara Baptista Serra
(UFSCar)

APROVADO

Aos meus familiares com toda a gratidão, que não mediram esforços para auxiliar em minha formação profissional; à minha esposa Miriam, pelo companheirismo, admiração e gratidão, paciência, presença e incansável suporte ao longo deste período de aprendizado; aos meus filhos Kamila e Murilo, meus netos Kauê e Kaio, incentivadores, motivadores e apoiadores para a realização deste trabalho.

Resumo

SILVA, Wanderly Geraldo. **Concreto auto adensável com substituição parcial de cimento por finos menores que 75 µm de resíduo de telha cerâmica vermelha: aspectos reológicos e físicos**. Tese apresentada ao Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, Campus de São Carlos – SP para obtenção do título de Doutor em Ciências.

A indústria cimenteira é uma das grandes responsáveis pelo alto impacto ambiental que sua atividade produz. Busca-se cada vez mais a redução de tais impactos, principalmente através do uso de adições minerais, quer seja na fabricação do cimento, ou como em substituição parcial deste. Por ser o concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil em todo o mundo, foram necessárias diversas modificações que foram desde sua forma de produção e aplicação, até, principalmente, sua composição, com o intuito de melhorar e adequar suas características às novas exigências, como é o caso do concreto auto adensável. O uso de resíduos de construção e demolição, principalmente como agregados para a produção de concretos tem sido amplamente pesquisado. Desta forma, foi investigado nesta pesquisa a substituição parcial do cimento por resíduo de telha cerâmica vermelha para produção de concreto auto adensável. Buscou-se produzir um resíduo finamente moído, com dimensão máxima característica de 75µm, para substituição parcial do cimento. Foram avaliadas a influência desta substituição no comportamento reológico do concreto e em suas propriedades mecânicas, e também do potencial pozolânico deste resíduo. Materiais pozolânicos estão presentes em uma grande parcela destes concretos, seja por motivos ligados à redução de impactos ambientais, questões econômicas, ou até mesmo pela melhoria de suas características. Nesta pesquisa ficou evidenciado que o resíduo cerâmico possui atividade pozolânica e pode ser utilizado em substituição parcial do cimento na produção de concreto. Algumas propriedades do concreto auto adensável com resíduo cerâmico foram alteradas, como perda de resistência mecânica, mas ainda assim os benefícios que a substituição pode produzir justificam o uso resíduo como componente do aglomerante do concreto, podendo contribuir de forma significativa para o desenvolvimento sustentável do setor da construção civil.

Palavra-chave: Resíduo Cerâmico, Resíduo de Construção, Concreto Auto Adensável, Pozolanas, Reologia.

ABSTRACT

SILVA, Wanderly Geraldo. **Self-compacting concrete with partial replacement of cement by fines smaller than 75 μm of red ceramic tile residue: rheological and physical aspects.** Thesis presented to the Institute of Architecture and Urbanism of the University of São Paulo, São Carlos Campus - SP to obtain the title of Doctor of Science.

The cement industry is largely responsible for the high environmental impact that its activity produces. Increasingly, such impacts are being reduced, mainly through the use of mineral additions, either in the manufacture of cement or as a partial replacement of cement. Because concrete is one of the most widely used materials in civil construction worldwide, several modifications were required, ranging from its form of production and application, and especially its composition, in order to improve and adapt its characteristics to the new ones. Requirements such as self-compacting concrete. The use of construction and demolition wastes, mainly as aggregates for concrete production, has been widely researched. Thus, this research investigated the partial replacement of cement by red ceramic tile residue for self-compacting concrete production. We sought to produce a finely ground residue with a maximum characteristic size of 75 μm for partial cement replacement. The influence of this substitution on the rheological behavior of the concrete and its mechanical properties, as well as the pozzolanic potential of this residue were evaluated. Pozzolanic materials are present in a large portion of these concretes, either for reasons related to the reduction of environmental impacts, economic issues, or even the improvement of their characteristics. In this research it was evidenced that the ceramic residue has pozzolanic activity and can be used in partial replacement of cement in concrete production. Some properties of self-compacting concrete with ceramic residue have been altered, such as loss of mechanical strength, but the benefits that substitution can produce justify the use of waste as a binder component of this concrete, contributing significantly to the sustainable development of the ceramic sector construction.

Keyword: Ceramic Waste, Construction Waste, Self-Adhesive Concrete, Pozzolans, Rheology.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	18
2.	OBJETIVOS.....	26
2.1	OBJETIVO GERAL.....	26
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	26
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	28
3.1	CONCRETO AUTO ADENSÁVEL - CAA.....	28
3.1.1	Características e propriedades	30
3.1.2	Vantagens, desvantagens e aplicações.....	32
3.1.3	Métodos de dosagem.....	34
3.1.3.1	Método de Okamura.....	37
3.1.3.2	Método Su <i>et al.</i>	42
3.1.3.3	Método de Gomes.....	47
3.1.3.4	Método EFNARC.....	52
3.1.4	Métodos de ensaios.....	54
3.1.4.1	Ensaio de Espalhamento – “ <i>Slump Flow Test</i> ”.....	56
3.1.4.2	Teste do Funil V – <i>V Funnel</i>	58
3.1.4.3	Teste da Caixa L – <i>L Box</i>	59
3.1.4.4	Teste da Caixa U – <i>Box Shaped Test</i>	61
3.1.4.5	Teste do Tubo U	62
3.1.5	Aditivos para CAA.....	63
3.2	RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	64
3.2.1	Definição e classificação.....	67
3.2.2	Reciclagem dos resíduos na construção civil.....	70

3.2.3	Resíduo na indústria cerâmica.....	70
3.3	MATERIAIS POZOLÂNICOS.....	73
3.3.1	Classificação das pozolanas.....	75
3.3.2	Reações pozolânicas.....	78
3.3.3	Métodos para a determinação da reatividade.....	82
3.3.3.1	Índice de Atividade Pozolânica – IAP.....	84
3.3.3.2	Análises Térmicas.....	86
3.3.3.3	Condutividade Elétrica	87
3.3.3.4	Chapelle Modificado.....	88
3.3.3.5	Método Frattini.....	88
3.4	REOLOGIA.....	89
3.4.1	Conceitos.....	89
3.4.1.1	Viscosidade.....	89
3.4.1.2	Tensão de escoamento.....	91
3.4.1.3	Modelos reológicos.....	91
3.4.2	Reologia da pasta de cimento.....	94
3.4.3	Reologia da argamassa.....	95
3.4.4	Reologia do concreto.....	97
3.4.5	Reologia do concreto CAA.....	101
4.	MATERIAIS	108
4.1	CIMENTO	108
4.2	AGREGADOS	109
4.3	RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA - RCV.....	114
4.4	ADITIVOS	115
5	MÉTODOS	118

5.1	OBTENÇÃO DO RCV _{75μm}	118
5.2	CARACTERIZAÇÃO DO RCV _{75μm}	120
5.3	PERCENTUAL DE SUBSTITUIÇÃO.....	124
5.4	AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA PASTA.....	124
5.5	AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA ARGAMASSA.....	127
5.6	AVALIAÇÃO DO CAA _{REF} E CAA _{RCV}	128
6	RESULTADOS E ANÁLISES	136
6.1	CARACTERIZAÇÃO DO RCV _{75μm}	136
6.1.1	Determinação do teor de cálcio fixado – Método Chapelle Modificado	136
6.1.2	Índice de atividade pozolânica com cal aos 7 dias.....	137
6.1.3	Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.....	137
6.1.4	Material retido na peneira 45μm.....	138
6.1.5	Microscopia eletrônica de Varredura – MEV.....	139
6.1.5.1	MEV Cimento CP V ARI.....	139
6.1.5.2	MEV RCV _{75μm}	143
6.1.6	Análise granulométrica do RCV_{75μm}.....	145
6.2	PERCENTUAL DE SUBSTITUIÇÃO.....	145
6.3	AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA PASTA.....	147
6.3.1	Determinação da Consistência Normal e dos Tempos de Pega.....	147
6.3.2	Ensaio de Reometria de Fluxo Contínuo.....	148
6.4	AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA ARGAMASSA.....	149
6.4.1	<i>Flow Test</i>.....	149
6.4.2	<i>Squeeze Flow</i>.....	150
6.5	AVALIAÇÃO DOS CONCRETOS CAA _{REF} E CAA _{RCV}	151

6.5.1	Estado fresco.....	151
6.5.2	Estado endurecido.....	153
7	CONCLUSÃO.....	160
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	166

Lista de Figuras

Figura 1-1: Resíduo cerâmico (SILVA, 2012)	18
Figura 1-2: Descarte do resíduo cerâmico (SILVA, 2012)	19
Figura 3-1: Esquema do procedimento de dosagem (OKAMURA e OUCHI, 2003).....	38
Figura 3-2: Comparação das dosagens CC e CAA (OKAMURA e OUCHI, 2003).....	39
Figura 3-3: Espalhamento para argamassa (OKAMURA e OUCHI, 2003)	39
Figura 3-4: Funil V para argamassa OKAMURA e OUCHI, 2003)	39
Figura 3-5: Ilustração do tronco de cone de consistência (GOMES, 2001)	41
Figura 3-6: Diagrama do Método de Dosagem de Gomes (GOMES, 2002)	49
Figura 3-7: Dimensões do Cone de Marsh (GOMES, 2002).....	50
Figura 3-8: Aparato do Mini Slump (GOMES, 2002).....	50
Figura 3-9: CAA sem segregação (TUTIKIAN, 2004).	57
Figura 3-10: CAA tendendo a segregar (TUTIKIAN, 2004).....	57
Figura 3-11: CAA segregado (TUTIKIAN, 2004).....	57
Figura 3-12: Ensaio de espalhamento do cone de Abrams – <i>Slump Flow Test</i> (CAVALCANTI, 2006).....	57
Figura 3-13: Aparelho adaptado para o Teste do Funil V (fonte: GOMES, 2002)	59
Figura 3-14: Ensaio da Caixa L - L Box (CAVALCANTI, 2006).....	60
Figura 3-15: Caixa U com medidas recomendadas (EFNARC, 2002)	61
Figura 3-16: Medidas recomendadas e ilustração Tubo U (TUTIKIAN, 2004)	63
Figura 3-17: Mudança do conteúdo de hidróxido de cálcio durante a hidratação de cimento Portland Pozolânico (MEHTA, 1987).	82
Figura 3-18 Comportamento reológico de diferentes fluídos (BANFILL, 1994).....	101
Figura 3-19: Comportamento reológico do concreto (NUNES, 2001)	102
Figura 3-20: Reografia dos efeitos de diferentes composições da mistura cimentícia de referência (WALLEVIK e WALLEVIK, 2011).....	104
Figura 3-21: Reografia dos efeitos de diferentes composições da mistura cimentícia de referência (WALLEVIK e WALLEVIK, 2011).....	105
Figura 3-22: Proposta de reografia para o CAA (WALLEVIK e WALLEVIK, 2011)	105
Figura 3-23: Nova proposta de reografia para o CAA (MEHTA e MONTEIRO, 2008) ..	106

Figura 3-24: Reografia referente aos CAA em diferentes países(WALLEVIK e WALLEVIK, 2011)	107
Figura 4-1:Curva granulométrica da areia fina.....	110
Figura 4-2:Curva granulométrica da areia média.....	111
Figura 4-3:Curva granulométrica do pedrisco	112
Figura 4-4:Curva granulométrica da brita 0	114
Figura 4-5: RCV $_{19mm}$	115
Figura 4-6: RCV $_{4,8mm}$	115
Figura 5-1: RCV gráúdo.....	119
Figura 5-2: Equipamento tipo moinho de bolas	119
Figura 5-3: RCV menor que $75\mu m$ s.....	119
Figura 5-4: Banho Maria termostatizado.....	120
Figura 5-5: Frasco Erlenmeyer.....	120
Figura 5-6: MEV cimento	123
Figura 5-7: MEV RCV $_{75\mu m}$	123
Figura 5-8: Microscópio Eletrônico de Varredura	123
Figura 5-9: Ensaio de consistência mediante o emprego do aparelho de <i>Vicat</i>	125
Figura 5-10: Reômetro de Fluxo Contínuo.....	125
Figura 5-11: Ensaio de determinação da consistência (<i>flow test</i>).....	128
Figura 5-12: Ensaio de <i>squeeze flow</i>	128
Figura 5-13: Teste do espalhamento	132
Figura 5-14: Teste da caixa L	132
Figura 5-15: Teste do Funil.....	132
Figura 5-16: Teste da Coluna de Segregação.....	132
Figura 5-17: Ensaio de resistência à compressão.....	134
Figura 5-18: Ensaio de módulo de elasticidade.....	134
Figura 6-1: Micrografia do cimento CP V ARI resolução 100 vezes.....	139
Figura 6-2: Micrografia do cimento CP V ARI resolução 300 vezes.....	139

Figura 6-3: Micrografia do cimento CP V ARI resolução 500 vezes.....	139
Figura 6-4: Micrografia do cimento CP V ARI resolução 1000 vezes.....	139
Figura 6-5: Micrografia analisada do cimento CP V ARI	140
Figura 6-6: Dimensão das partículas do cimento CP V ARI	141
Figura 6-7: Circularidade das partículas do cimento CP V ARI	141
Figura 6-8: Micrografia do RCV _{75µm} resolução 100 vezes.....	142
Figura 6-9: Micrografia do RCV _{75µm} resolução 300 vezes.....	142
Figura 6-10: Micrografia do RCV _{75µm} resolução 500 vezes.....	142
Figura 6-11: Micrografia do RCV _{75µm} resolução 1000 vezes	142
Figura 6-12: micrografia analisada do RCV _{75µm}	143
Figura 6-13: Dimensão das partículas do RCV _{75µm}	143
Figura 6-14: Circularidade das partículas do RCV _{75µm}	144
Figura 6-15: Curva granulométrica do RCV _{75µm}	145
Figura 6-16: Gráfico da resistência à compressão das argamassas.....	146
Figura 6-17: Gráfico da tensão de escoamento das pastas.....	148
Figura 6-18: Gráfico da viscosidade das pastas.....	149
Figura 6-19: Gráfico do <i>squeeze flow</i>	150
Figura 6-20: IEV do CAA _{REF}	153
Figura 6-21: IEV CAA _{RCV20%}	153
Figura 6-22: Gráfico da massa específica dos CAA.....	154
Figura 6-23: Gráfico da absorção de água dos CAA	155
Figura 6-24: Gráfico do índice de vazios dos concretos	156
Figura 6-25: Gráfico da evolução da resistência à compressão	157
Figura 6-26: Gráfico da evolução do módulo de elasticidade	158

Lista de tabelas

Tabela 3-1: Proporções de materiais recomendados pelo ACI237R-07 (2007)	35
Tabela 3-2: Resumo dos melhores traços de CAA (ACI237R-07,2007)	36
Tabela 3-3: Especificações para o CAA (SU <i>et al</i> ,2001)	43
Tabela 3-4: Faixa parâmetros que asseguraram o auto adensamento dos concretos....	52
Tabela 3-5: Faixa caracterização das propriedades de fluxo do CAA (EFNARC, 2002).54	
Tabela 3-6: Aptidões e praticidade dos ensaios para a medição da trabalhabilidade do CAA (SILVA,2012).....	55
Tabela 3-7: Limites dos ensaios com CAA (EFENARC, 2002; GOMES, 2002):.....	56
Tabela 3-8: Limites de resultados e dimensões para o Teste do Funil V – referências diversas (SILVA, 2012).....	59
Tabela 3-9: Limites de resultados e dimensões para o Teste da Caixa L, segundo diversas referências (SILVA2012)	60
Tabela 3-10: Limites de resultados e dimensões para o Teste da Caixa U segundo diversas referências (SILVA,2012).....	62
Tabela 3-11: Indústria de Cerâmica Vermelha (ANICER, 2017).....	72
Tabela 3-12: Requisitos Químicos (NBR12653:2012)	75
Tabela 3-13: Requisitos Físicos (NBR12653:2012).....	76
Tabela 3-14: Limites para ensaios Facultativos (NBR12653:2012)	76
Tabela 3-15: Classificação das adições minerais para concreto estrutural (DAL MOLIN, 2005)	78
Tabela 3-16: Métodos de avaliação da atividade pozolânica encontrados na literatura (HANSEN, 2016)	84
Tabela 3-17: Classificação dos materiais pozolânicos quanto à condutividade (SANTOS, 2006)	88
Tabela 3-18: Principais métodos para a caracterização reológica do concreto fresco baseado na classificação do NIST (KOEHLER & FOWLER, 2003 apud ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011)	100
Tabela 3-19: Equações de modelos reológicos (FERRARIS, 1999).....	103
Tabela 4-1: Ensaios e resultados de caracterização do cimento	109
Tabela 4-2: Agregados	109
Tabela 4-3: Ensaios de caracterização dos agregados miúdos.....	110

Tabela 4-4: Composição granulométrica da areia fina.....	110
Tabela 4-5: Composição granulométrica da areia média.....	111
Tabela 4-6: Limites granulométricos de agregado miúdo (ABNT NBR 7211:2009)	111
Tabela 4-7: Ensaio de caracterização dos agregados graúdos	112
Tabela 4-8: Composição granulométrica da brita 0	112
Tabela 4-9: Composição granulométrica da brita 1	113
Tabela 4-10: Limites granulométricos de agregado graúdo	113
Tabela 4-11: Ensaio e resultados de caracterização do RCV _{75µm}	115
Tabela 4-12: Características dos aditivos para CAA	116
Tabela 5-1: Quantidade em massa dos materiais.....	124
Tabela 5-2: Características do Reômetro AR G2	126
Tabela 5-3: Composição do CAA _{REF}	129
Tabela 5-4: Resultados de ensaios de caracterização dos concretos CAA _{REF}	129
Tabela 5-5: Ensaio para a caracterização dos concretos CAA _{REF}	130
Tabela 5-6 Classes de espalhamento do CAA em função de sua	130
Tabela 5-7: Classes de viscosidade do CAA em função de sua aplicação.....	131
Tabela 5-8: Classes de habilidade passante do CAA em função de sua aplicação	131
Tabela 5-9: Classes de segregação do CAA em função de sua F	131
Tabela 6-1: Resultados de ensaios de determinação do teor de cálcio fixado	136
Tabela 6-2: Índice de atividade pozzolânica com cal – IAP	137
Tabela 6-3: Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias	138
Tabela 6-4: Material retido na peneira 45µm 125.....	138
Tabela 6-5: Resultados de ensaios de resistência à compressão.....	146
Tabela 6-6: Resultados de ensaios de consistência normal e início e fim de pega da pasta	147
Tabela 6-7: Medida da abertura das argamassas no <i>flow test</i>	149
Tabela 6-8: Resultados dos ensaios dos concretos no estado fresco	152
Tabela 6-9: Classificação dos CAA _{REF} e CAA _{RCV} no estado fresco.....	152

Tabela 6-10: Resultados dos ensaios dos concretos no estado endurecido	154
Tabela 6-11: Resultados dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos.....	157

Lista de siglas, símbolos e unidades

ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/c	-	Relação água cimento
CAA	-	Concreto auto adensável
CAD	-	Concreto de alto desempenho
CAR	-	Concreto de alta resistência
cm	-	Centímetro
D _{max}	-	Dimensão máxima característica
EFNARC	-	European Federation National Representative Associations of Concrete
f _c	-	Resistência à compressão
g	-	Grama
GPa	-	Gigapascal
h	-	Hora
IAP	-	Índice de atividade pozolânica
Kg	-	Quilograma
MPa	-	Megapascal
m	-	Metro
m ³	-	Metro cúbico
mg	-	Miligrama
mm	-	Milímetro
RCC	-	Resíduo de construção civil
RCD	-	Resíduo de construção e demolição
RCV	-	Resíduo de cerâmica vermelha
s	-	Segundo
γ	-	Massa específica
ε	-	Deformação
σ	-	Tensão

μm	–	Micrômetro
°C	–	Grau Celsius
%	–	Porcentagem

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A utilização de resíduos de construção e demolição (RCD) na produção de concretos tem sido amplamente investigado por ser um tema de grande interesse para o setor da construção civil, devido às vantagens que isso possa representar, e pode ser definida como principal elemento norteador desse trabalho. Neste caso específico, foi enfatizado a utilização do resíduo de telha cerâmica vermelha (RCV), que pode ser definido como sendo um resíduo industrial, oriundo da própria fabricação da telha, ou mesmo um RCD, proveniente da substituição de telhados mais antigos de telha cerâmica, quer seja por telhas de outros materiais ou mesmo por telhas mais novas, tão comum nos dias de hoje.

No caso do RCV, ilustrado na Figura 1-1, pesquisas foram desenvolvidas com objetivo de seu aproveitamento como agregado para a produção de argamassas e concretos. Porém, em trabalho realizado por Silva (2012) verificou-se a oportunidade de emprego deste material como adição ou em substituição parcial do cimento, em razão do potencial pozolânico que este material apresentou.

Figura 1-1: Resíduo cerâmico

Fonte: (Silva, 2012)

Assim, ficou evidenciado a possibilidade de utilização do resíduo e telha cerâmica em substituição parcial do cimento, para a produção de concretos, como forma de poder contribuir para a inovação de materiais e métodos, para a sustentabilidade da cadeia da construção civil e para a preservação dos recursos naturais.

A quantidade deste resíduo, que pode ser gerado pela substituição ou no descarte irregular na própria fabricação de telhas cerâmicas, ilustrado na Figura 1-2, é considerável, apresentando valores mensais de 1,350 milhões de cacos de telha, que totalizavam 2295 toneladas ou 3072 metros cúbicos de resíduo, conforme diagnosticado por Dias (2004), justificando assim a necessidade do seu aproveitamento.

Figura 1-2: Descarte do resíduo de telha cerâmica

Fonte: (Silva, 2012)

Para a produção de bens e serviços, empresas do setor de cerâmica vermelha necessitam utilizar recursos extraídos do meio ambiente. Desta forma, medidas para obtenção de práticas socioambientais politicamente corretas têm sido impulsionadas por movimentos sociais de consumo, políticas públicas e órgãos governamentais de regulamentação. No âmbito do setor de cerâmica vermelha, muitas organizações foram impelidas a se adequarem às normas legais e a amenizar os impactos negativos do seu processo produtivo sobre o meio ambiente (ADAMS et al., 2016). Segundo os autores, a indústria de cerâmica vermelha no Brasil era composta na época por 5.500 empresas, incluindo as fábricas de cerâmicas e olarias, que respondiam por mais de 400 mil empregos diretos, 1,25 milhões de empregos indiretos, e que faturavam R\$ 6 bilhões/ano. O estudo apontou, também, que os três principais desafios ambientais do setor são: investir em novas tecnologias de produção; reduzir as substâncias nocivas geradas pelo processo produtivo; adequar o padrão de qualidade dos produtos às exigências da ABNT e à legislação ambiental. Devido ao fato de que no setor de cerâmica vermelha, a atividade industrial envolve um processo de extração de insumos com impacto ambiental, as estratégias ambientais devem incluir ainda a

legalização das operações, por meio de licenciamento ambiental, requerimento de lavra para extração de argila e autorização florestal. Estudo realizado por Freitas e Oliveira (2016), em nível nacional, revelou que o setor de cerâmica vermelha tem feito iniciativas para reduzir o impacto ambiental de suas operações (ex: uso de resíduos como insumo e de energia renovável), mas ainda necessita organizar melhor o seu processo de produção, diminuir as perdas decorrentes do processo industrial e melhorar as condições de operação. As empresas do setor de cerâmica vermelha tendem a adotar estratégias apenas para atender a legislação governamental e, por isso, são adotantes reativos (FARIAS et al., 2012).

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil em todo o mundo. Em razão das novas possibilidades surgidas devido aos avanços tecnológicos no setor da construção civil e da versatilidade de sua aplicação, foram necessárias diversas modificações que foram desde sua forma de produção e aplicação, até, principalmente, à sua composição, com o intuito de melhorar e adequar suas características às novas exigências. Tornou-se, então, necessário não mais considerar apenas estudos de concretos convencionais. Desta maneira, uma nova demanda surgiu de forma a impulsionar, nas últimas décadas, grandes avanços na tecnologia do concreto. Desde o surgimento do concreto, no início do século XIX, até os dias atuais, foram constantes o desenvolvimento de novas tecnologias e de novos materiais para a construção civil. Isto possibilitou um grande avanço nesta área nos últimos anos, com o surgimento dos aditivos químicos – tais como incorporadores de ar, retardadores e aceleradores de pega ou os mais atuais, como os superplastificantes – e também a utilização de adições, como por exemplo, as adições minerais. Estas novas tecnologias e materiais representaram importantes mudanças nas características dos concretos, exigindo com isso a aceleração das pesquisas sobre o assunto.

Inovações na área de tecnologia do concreto, que incluem o desenvolvimento de aditivos e adições, novos métodos de dosagem, equipamentos de mistura e aplicação, dentre outras, possibilitou o desenvolvimento de concretos especiais. São considerados especiais por apresentarem características específicas, suprimindo deficiências ou incorporando propriedades não usuais aos concretos convencionais, visando desempenho adequado às situações particulares de aplicação. O concreto de alta resistência (CAR), de alto desempenho (CAD), auto adensável (CAA), leve,

massa, com resíduos reciclados, projetado, colorido, branco, dentre outros, são exemplos desses concretos (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

Concretos tais como CAD e o CAA, são considerados concretos de alta tecnologia e suas principais características são a alta resistência à compressão e a elevada durabilidade, caso do CAD, e a alta fluidez e a elevada resistência à segregação, caso do CAA. Essas características, entre outras, tornam esses concretos mais duráveis, prolongando a vida útil das estruturas, fazendo crescer, cada vez mais, suas utilizações em diversos países. Para produzir o concreto de alto desempenho e o concreto auto adensável de acordo com as especificações supracitadas, uma cuidadosa seleção e dosagem dos seus componentes devem ser realizadas. A dosagem do concreto tem como objetivo encontrar a combinação correta dos componentes selecionados, buscando o menor custo possível (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Dentre os diversos procedimentos e métodos de dosagens para concretos com características especiais, como é o caso do CAA - objeto de interesse deste estudo - torna-se importante conhecer também o seu comportamento reológico.

A reologia é uma ciência voltada ao estudo do escoamento e da deformação da matéria, que atravessa vários séculos e abrange diversos campos de conhecimento. A aplicação dos conceitos da reologia pode englobar diferentes materiais, entre eles os materiais à base de cimento. Esses materiais, como as pastas de cimento, argamassas e concretos, quando no estado fresco apresentam um comportamento intermediário entre o líquido ideal e o estado sólido, podendo conferir, em função de suas características e composições, comportamento viscoso, viscoplástico e em alguns casos até mesmo de dilatância (OLIVEIRA, 2013). No concreto, segundo este autor, as propriedades reológicas, principalmente a trabalhabilidade, são dependentes das características da pasta de cimento e da argamassa, pois são elas as responsáveis pela fluidez e coesão. Assim, o estudo reológico da pasta e argamassa pode ser utilizado para selecionar e otimizar aditivos químicos e adições minerais, fornecendo informações úteis para a dosagem do concreto; entretanto, a reologia deve ser aplicada corretamente, caso contrário o material poderá sofrer modificações que afetarão o seu desempenho. Além disso, o emprego da reologia é de grande importância para realizar o controle de produção do concreto, que tem ligação direta com o seu desempenho, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido.

A indústria cimenteira é uma das grandes responsáveis pelo alto impacto ambiental que sua atividade produz. Busca-se cada vez mais a redução de tais impactos pelo uso de adições minerais incorporadas na fabricação do cimento ou em substituição parcial deste. Fíler calcário, escória granulada de alto forno, argila calcinada e cinza volante, são exemplos de materiais mais frequentemente utilizados.

A substituição parcial de cimento oferece grandes vantagens econômicas, pois substitui o clínquer por subprodutos, oriundos na maioria dos casos, de resíduos industriais. As adições minerais são acrescentadas em quantidades relativamente grandes, de 20 a 70% da massa do material cimentício, adicionando ou substituindo parcialmente o cimento, dependendo das propriedades que se quer obter. Desta maneira, pode-se dizer que a incorporação de adições na produção do cimento, representou um importante avanço para o desenvolvimento da tecnologia do concreto. Concretos com alta resistência e alto desempenho estão diretamente ligados à incorporação de adições e de materiais pozolânicos. Segundo Mehta e Monteiro (2014), um fator importante para o aumento da resistência mecânica do compósito de cimento é a redução do volume total e do tamanho dos poros, o que pode ser obtido com o uso de materiais pozolânicos ou de fíleres.

O uso de aditivos, principalmente incorporadores de ar, aumentam a porosidade do concreto provocando efeitos que contribuem para melhorar determinadas propriedades como a trabalhabilidade e a permeabilidade (WU *et al.*, 2016). Embora seja desejável no estado fresco, no estado endurecido o aumento da porosidade pode comprometer outras propriedades, tais como, resistência, estabilidade dimensional e durabilidade (CHOI; YEON; YUN, 2016).

Um conceito também importante para o desenvolvimento deste trabalho está relacionado à atividade pozolânica. Materiais pozolânicos estão presentes em uma grande parcela dos concretos empregados em todo o mundo, seja por motivos ligados à redução de impactos ambientais, visto que poderão reduzir o consumo de cimento, questões econômicas, ou até mesmo pela melhoria de suas características.

A evolução das adições minerais pozolânicas tornou possível a produção de concretos cada vez mais resistentes e duráveis, muito além do que se pensava ser possível a alguns anos atrás. Neste sentido, pode se considerar as pozolanas como importantes ferramentas capazes de viabilizar os concretos de alto desempenho, que são um aprimoramento de concretos convencionais, a partir da redução da porosidade e das modificações microestruturais (VALENZUELA; CHODOUNSKY, 2010).

A pozolanicidade das adições, que é a capacidade de formar compostos cimentantes desde que na presença de água e hidróxidos de cálcio, pode ser avaliada por métodos indiretos de quantificação do potencial reativo, como o Índice de Atividade Pozolânica (IAP), com cimento (ABNT NBR 5752:2014) ou cal hidratada (ABNT NBR 5751:2015), ou por método direto e acelerado, como o ensaio de Chapelle Modificado (ABNT NBR 15895:2010), o qual determina a capacidade de a adição fixar hidróxido de cálcio.

A produção de concretos com agregados reciclados também tem sido tema de pesquisa de grande interesse entre diversos pesquisadores. Dentre as grandes preocupações com o emprego destes agregados na produção de concreto, está a necessidade de obtenção de concretos cada vez mais duráveis. Assim, os agregados deixam de exercer apenas um papel econômico na composição dos concretos, podendo não só influenciar as características deste no estado fresco, como nas propriedades no estado endurecido e, conseqüentemente, na sua durabilidade.

Pesquisas foram realizadas com o intuito de se utilizar resíduos ou adições diversas para a produção de concretos, especialmente concreto auto adensável. Como exemplo, Pereira (2010) avaliou a produção de concreto auto adensável com baixo consumo de cimento e adição de fibras de lã de rocha ou poliamida. Filho (2016) estudou a influência do direcionamento de fibras e aço no comportamento mecânico do concreto auto adensável. Também o uso de resíduo cerâmico em concreto já vem sendo investigado em alguns trabalhos. Mesmo havendo vários trabalhos desenvolvidos nesta linha de pesquisa, este trabalho traz a proposta, até então inédita, de utilização do resíduo de telha cerâmica vermelha, com dimensão máxima característica de 75µm, obtido a partir de moagem de cacos de telhas cerâmicas vermelhas, em substituição parcial do cimento, para a produção de concreto auto adensável. Serão avaliadas comparativamente as modificações que a incorporação deste resíduo poderá acarretar em propriedades do estado fresco, com ênfase na reologia destes concretos, e também do estado endurecido.

Desta forma, a utilização deste resíduo, finamente moído e obtido a partir de cacos de telhas cerâmicas vermelhas, em substituição parcial do cimento, para produção de concreto auto adensável, que é um material que vem sendo amplamente utilizado na construção civil, e, buscando com isto tirar proveito da pozolanicidade do

resíduo, além do conhecimento do comportamento reológico deste concreto possa apresentar, são elementos definidores desta pesquisa.

Espera-se que a incorporação deste resíduo como componente do aglomerante, resulte diretamente na redução do consumo de cimento por metro cúbico de concreto, podendo esta redução chegar à 20% da massa do cimento. Uma vez comprovada sua capacidade de ação como material pozolânico, ou mesmo como fíler, neste caso, para a produção de concreto, esta redução poderia ser bastante relevante.

Considerando-se que o concreto seja um dos materiais mais consumidos em todo o setor da construção civil, qualquer que seja o percentual do resíduo que possa ser incorporado ao concreto, seja como adição ou em substituição parcial do cimento, seriam bastantes significativos os benefícios gerados.

Este trabalho está dividido em 7 capítulos, sendo este, o primeiro, onde foram abordados alguns aspectos introdutórios à proposta da pesquisa e a justificativa pela opção do tema.

No segundo capítulo estão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos da pesquisa.

No terceiro capítulo é feita a revisão bibliográfica onde são levantados alguns dos principais aspectos sobre o concreto auto adensável. Neste capítulo faz-se também a abordagem sobre resíduos na construção civil, materiais pozolânicos e reologia.

No quarto capítulo são apresentados os materiais utilizados no desenvolvimento da pesquisa, e suas principais características.

No quinto capítulo está descrita a metodologia de ensaios adotada para a realização do trabalho.

Os resultados de ensaios e suas análises estão descritos no sexto capítulo.

No sétimo capítulo estão apresentadas as conclusões da pesquisa.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este estudo tem como objetivo principal utilizar o resíduo cerâmico de telha vermelha, finamente moído, em substituição parcial do cimento para a produção de um concreto auto adensável, avaliando suas propriedades, de modo comprovar a possibilidade de utilização do resíduo como componente do aglomerante, juntamente como o cimento.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- a) avaliar aspectos reológicos do concreto auto adensável de referência com substituição parcial de cimento pelo resíduo de telha cerâmica com dimensão máxima característica de 75 μm , com diferentes teores de substituição;
- b) avaliar a pozolanicidade do resíduo de telha cerâmica dimensão máxima característica de 75 μm ;
- c) avaliar o teor ideal de substituição parcial do cimento pelos finos do resíduo de telha cerâmica tomando como parâmetro a resistência à compressão da argamassa;
- d) avaliar aspectos reológicos da pasta e da argamassa com substituição parcial do cimento pelos finos do resíduo de telha cerâmica;
- e) avaliar características físicas do concreto auto adensável no estado fresco, tais como, espalhamento, habilidade passante, viscosidade e segregação, e no estado endurecido, como a massa específica, absorção de água e porosidade, resistência à compressão e módulo de elasticidade, com diferentes teores de substituição parcial do cimento pelos finos do resíduo de telha cerâmica.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CONCRETO AUTO ADENSÁVEL – CAA

Concretos auto adensáveis são aqueles que escoam sob a ação do peso próprio, sendo a gravidade a força motriz desse fluxo (ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011). O material flui tanto mais quanto menor for sua tensão de escoamento. O valor da viscosidade está associado à velocidade e à dissipação de energia de fluxo. Quanto menor for a viscosidade, menor será a dissipação de energia e mais rápido o sistema movimenta, o que resulta em sistemas com melhores características de moldagem. Contudo, se a viscosidade da pasta for muito reduzida, o concreto pode sofrer fenômenos de separação de fases tanto no lançamento como no interior das fôrmas após moldagem.

O concreto auto adensável surgiu no Japão na década de 80. Mas apenas a partir do ano 2000 a tecnologia passou a ser utilizada no Brasil, ainda que de forma isolada. Para reverter esse quadro, novos estudos e aplicações vêm sendo feitos, comprovando os benefícios deste material em diversas ocasiões como em obras com peças com alta densidade de armadura, em que o concreto convencional não consegue preencher todos os espaços; em obras em que o concreto fica aparente, já que possui melhor acabamento; ou mesmo em obras que exijam grande agilidade. O desenvolvimento da tecnologia e a redução dos custos dos aditivos também estão contribuindo com o avanço do uso do CAA (SILVA, 2012).

O CAA pode ser considerado como um avanço quando comparado aos concretos convencionais. Sua composição inclui materiais inorgânicos de granulação fina, oferecendo a possibilidade de se utilizar materiais finos, os quais são considerados rejeito, sem aplicação na indústria e que demanda custo para descarte. Este concreto surgiu da necessidade de se dispensar o difícil e oneroso trabalho de vibração do concreto lançado às fôrmas com alta taxa de armadura, ou geometria complexa que dificulta ou impossibilita a vibração, o que mostra que as principais causas da sua origem foram a economia de mão de obra e a durabilidade das estruturas. Poucas obras foram realizadas com o CAA no Brasil. Acreditando-se que a esse fato deva se à falta de estudos e adaptação da tecnologia à nossa realidade. Tal situação vem mudando com o passar do tempo, de modo que diversas instituições de ensino e pesquisa, assim como grandes empresas construtoras, em todo o país

vêm buscando conhecimento acerca do novo material, com o objetivo de introduzir este tipo de concreto no mercado brasileiro. Embora estivesse cada dia mais consagrado o uso do CAA, existia uma lacuna muito grande nesta área, que era a inexistência de métodos experimentais de dosagem. Para dosar um CAA, pesquisadores valiam-se de métodos baseados em tabelas prontas que foram produzidas, muitas vezes, em outros países, com materiais bem diferentes dos nossos. Ou seja, necessitava-se fazer adaptações baseadas no método da tentativa e erro, gastava-se tempo sem a certeza de que o concreto produzido fosse, realmente, um concreto econômico e dosado de uma forma que minimizasse futuras manifestações patológicas, como, por exemplo, a retração (TUTIKIAN et al, 2012).

O método de dosagem adotado para a produção do CAA muitas vezes é definido como sendo aquele que mais convém pelos tecnologistas ou pesquisadores. Assim, pode-se buscar um método que seja capaz de alcançar os requisitos de auto adensabilidade do concreto de maneira mais rápida e fácil, e outros adotam um método que não se preocupa somente com requisitos de auto adensabilidade, mas também com requisitos de propriedades mecânicas, durabilidade e custo benefício. Por meio de parâmetros de auto adensabilidade, de reologia, de propriedades mecânicas e estatísticos é possível construir um método de dosagem (SHI et al., 2015). Nesse sentido, esses autores definiram que os métodos de dosagem voltados para o concreto auto adensável estão inseridos em cinco grupos:

- a) métodos de dosagem empírico;
- b) métodos que levam em consideração a resistência à compressão;
- c) métodos que levam em consideração a densidade de empacotamento dos agregados;
- d) métodos que consideram o planejamento fatorial;
- e) métodos que consideram a reologia da pasta. No geral, esses métodos de dosagem partem de estudos em argamassas.

Para prever o comportamento do concreto auto adensável frente às suas características de reologia e de auto adensabilidade, faz-se necessário proceder o estudo da argamassa, bem como a possibilidade de efetuar várias combinações com maior número de variáveis, assim contribuindo para o entendimento mais consistente das propriedades estudadas com menor gasto de materiais e de recurso humano (SHI et al., 2015). Isso é possível pelo fato desses materiais cimentícios possuírem comportamentos semelhantes no estado fresco (JIN, 2002).

3.1.1 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES

Muitas das características desejadas para os concretos, sejam eles convencionais (CCV), ou especiais - de alta resistência (CAR), alto desempenho (CAD) ou auto adensáveis (CAA) – no estado fresco ou no estado endurecido, como resistência, estabilidade dimensional e durabilidade, são influenciadas tanto pela proporção como pelas propriedades da pasta do concreto, tais como tipo, quantidade e distribuição de sólidos e vazios (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Essas propriedades também são influenciadas pela microestrutura que, por sua vez, depende do tipo, tamanho, forma e distribuição dos seus constituintes. Desse modo, modificando-se a estrutura interna modificam-se também as propriedades do concreto. Assim, é possível manipular constituintes do concreto visando obter, ou melhorar, determinadas propriedades, como trabalhabilidade, tempo de pega, densidade, resistência mecânica, acabamento e especialmente a durabilidade. Muitas vezes, somente pela dosagem correta dos constituintes não é possível obter as características desejadas, fazendo necessário então o emprego de aditivos.

O CAA consiste em um concreto com alta fluidez, capaz de preencher a fôrma onde é aplicado, compactando-se pela ação única de seu peso próprio e sem necessitar de qualquer tipo de vibração interna ou externa. Este concreto deve, ainda, ser capaz de sustentar os grãos do agregado graúdo, mantendo-os homogeneamente distribuídos no interior da mistura, quando o concreto flui através de obstáculos – como as barras de armaduras – e também quando o concreto se encontra em repouso (OKAMURA, 1997; GETTU e AGULLÓ, 2003; EFNARC, 2005).

As características básicas do concreto auto adensável são a alta fluidez e a resistência à segregação, sendo necessária a existência de coesão e viscosidade. A fluidez é responsável pelo preenchimento dos espaços das fôrmas. Já a viscosidade e coesão são responsáveis pela interação entre os agregados graúdos e a argamassa, fazendo com que estes não se separem (FENATO et al., 2007).

A elevada resistência à segregação aliada à alta fluidez apresentada pelo CAA permite a minimização de defeitos, como bolhas de ar e falhas na concretagem, que são responsáveis pelas perdas de desempenho mecânico do concreto e de durabilidade da estrutura (GIROTTI, 2012). O CAA exige um grande cuidado no critério de escolha dos materiais empregados na sua produção e um alto controle de

qualidade, pois é um concreto muito sensível à variação de seus constituintes e dos procedimentos de produção.

O CAA deve apresentar as seguintes propriedades, que são essenciais a este tipo de concreto, no estado fresco, e que não competem ao concreto convencional:

- a) habilidade de Preenchimento: preencher a fôrma onde é aplicado e se auto compactar, sem vibração, mantendo-se homogêneo;
- b) habilidade de passagem: passar através de obstáculos, como as barras de armaduras, sem apresentar bloqueio de partículas de agregados;
- c) resistência à segregação ou estabilidade: manter-se homogêneo durante a mistura, o transporte e a aplicação.

A habilidade de preenchimento é obtida por meio da fluidez elevada, necessária para a pasta e para a argamassa, porém, juntamente com esta propriedade, o concreto deve apresentar coesão elevada, para que, ao preencher a fôrma onde é aplicado, este permaneça homogêneo. Assim, a habilidade de passagem está relacionada à coesão de concreto, pois um material coeso contribui para a homogeneidade em situações nas quais existem áreas restritas ou com alta quantidade de armaduras (OKAMURA e OUCHI, 2003).

Existem dois tipos de estabilidade: a dinâmica, referente à resistência à segregação e bloqueio durante a moldagem, e a estática, referente à resistência a exsudação e segregação dos componentes do concreto, estando este já na fôrma, em seu período de cura e endurecimento (DACZKO, 2002; SCHWARTZENTRUBER et. al., 2006). Caso o concreto apresente-se instável dinamicamente ou estaticamente, podem ocorrer alguns problemas, como bloqueio do agregado graúdo pelas armaduras. Como resultado, tem-se um preenchimento insuficiente e heterogêneo da fôrma, ou segregação do agregado graúdo, assim como movimentação da água de amassamento em direção à superfície do concreto, resultando em queda da resistência mecânica e aumento da permeabilidade do concreto.

Com relação às propriedades do CAA no estado endurecido pode-se citar:

- a) com relação à microestrutura pode ser homogênea devido ao uso de grande quantidade de finos que vão proporcionar uma boa distribuição granulométrica dos sólidos, aumentam o empacotamento das partículas, promovem o acréscimo da retenção de água, favorecem o processo de

- nucleação durante a hidratação do cimento, aumentando a densidade da zona interfacial de transição entre a pasta de cimento e os agregados;
- b) melhoria da resistência à compressão em relação ao concreto convencional com mesma relação água/cimento, favorecida pelas baixas relações água/finos, pelo emprego de aditivos superplastificantes e pelo tipo de adição de finos (inertes ou reativos) que influenciam de forma diferente o desenvolvimento da resistência à compressão no CAA;
 - c) o módulo de elasticidade tende a sofrer redução pois é bastante influenciado pelo módulo de elasticidade dos materiais, especialmente dos agregados, que no CAA são empregados em menor quantidade;
 - d) a aderência pode ser maior ou igual à do concreto convencional, sendo favorecida pela baixa tendência à segregação e pela melhor retenção de água do CAA, mas ainda não está totalmente entendida;
 - e) devido à melhora promovida pela microestrutura do concreto, espera-se que o CAA apresente boas características de durabilidade (KLUG; HOLSCHEMACHER, 2003).

Cuidados especiais devem ser tomados durante a especificação do CAA de forma a evitar a ocorrência de retração plástica e fissuras que podem surgir devido à grande quantidade de materiais finos empregados na sua produção. Desta forma, deve se controlar a cura para que seja iniciada o mais cedo possível (EFNARC, 2002).

3.1.2 VANTAGENS, DESVANTAGENS E APLICAÇÕES

O aumento contínuo dos estudos e aplicações do CAA em todo o mundo é justificado pelos inúmeros benefícios apresentados quando da aplicação deste concreto em obras. Algumas das vantagens advindas da aplicação do CAA foram descritas por diversos autores, entre os quais se destacam: OKAMURA *et. al.* (2000), GETTU e AGULLÓ (2003), EFNARC (2005): Um grande destaque deve ser dado ao fato de que o uso de CAA garante excelente compactação do material no estado fresco, mesmo em áreas densamente armadas, evitando-se, assim, a presença de nichos no interior do elemento estrutural e garantindo excelente acabamento ao concreto, situação esta que permite a produção de uma estrutura mais durável. A eliminação da etapa de vibração do concreto resulta, também, em uma importante vantagem, pois com a eliminação do ruído causado pelo vibrador, há uma melhora na qualidade do ambiente de trabalho, uma vez que os trabalhadores deixam de estar

expostos a taxas de ruídos elevadas, favorecendo ainda a concretagem em áreas urbanas, onde os ruídos, em muitas situações, são limitantes à construção. A elevada fluidez possibilita a diminuição da equipe de trabalho, por não ser necessária a presença de muitas pessoas no canteiro de obras para realização das atividades de lançamento e espalhamento do concreto, que se auto compacta. Por fim, a eliminação de uma etapa na produção da edificação – vibração – permite reduzir o tempo de construção, o que, juntamente com os aspectos apresentados anteriormente, pode ser responsável por uma diminuição no custo global da obra.

Dentre as várias vantagens que o concreto auto adensável possibilita, segundo Camargos (2002), pode-se citar:

- a) redução do custo de aplicação por metro cúbico de concreto;
- b) garantia de excelente acabamento em concreto aparente;
- c) facilidade de bombeamento em grandes distâncias horizontais e verticais;
- d) otimização de mão de obra;
- e) maior rapidez na execução da obra;
- f) melhoria nas condições de segurança na obra;
- g) eliminação do ruído provocado pelo vibrador;
- h) eliminação da necessidade de espalhamento e de vibração;
- i) aumento das possibilidades de trabalho com formas de pequenas dimensões;
- j) redução do custo final da obra em comparação ao sistema de concretagem convencional.

De acordo com Nunes (2001), a redução de custos observadas no CAA pode ser decorrente da redução de necessidade de aplainamento das superfícies devido à sua propriedade autonivelante em elementos horizontais e da menor necessidade de acabamento nas superfícies verticais, que são suaves, uniformes, livres de imperfeições e sem descoloração quando se utilizam formas de boa qualidade e controle da técnica de aplicação. Para o autor, o CAA pode ser considerado viável economicamente quando são considerados todos os aspectos referentes à sua aplicação, à qualidade e à durabilidade do concreto obtido.

Existe uma busca constante para se obter o CAA por meio de pesquisas com novos métodos e novos materiais, de forma que o mesmo se torne cada vez mais

viável, embora, segundo LISBÔA (2004), possa apresentar algumas desvantagens, possíveis de serem contornadas. Dentre elas, podem ser citadas:

- a) este concreto não é fácil de ser obtido, necessitando de métodos de dosagens mais elaborados;
- b) necessita de mão de obra especializada para sua confecção;
- c) requer controle tecnológico mais rigoroso, com ensaios muitas vezes mais difíceis de serem executados;
- d) durante sua aplicação necessita de controle mais rigoroso do que o concreto convencional;
- e) necessita de cuidados especiais com o transporte, para evitar a segregação;
- f) apresenta menor tempo disponível para aplicação em relação ao concreto convencional.

É possível, ainda, considerar como desvantagem do CAA o custo elevado do material quando considerado o metro cúbico do concreto, tanto devido ao aumento na quantidade de cimento para se obter auto-adensabilidade, quanto à necessidade de uso de aditivos químicos. Embora haja a já citada redução do custo global da obra, este ainda é um fator limitante da utilização do CAA em obras.

3.1.3 MÉTODOS DE DOSAGEM

Vários fatores podem estar retardando o uso intensivo dos CAA, no Brasil e no mundo. Pode-se citar dentre estes, a falta de métodos de dosagem eficientes, que permitam o uso irrestrito da mistura com materiais locais viáveis, tanto econômica quanto tecnicamente. Osawa desenvolveu o CAA em 1988, baseado em pontos específicos propostos por Okamura, os quais continuam sendo seguidos por muitos pesquisadores e grupos, como EFNARC (2002) e Bosiljkov (2003). Quase sempre os parâmetros de dosagem foram estimados com ensaios realizados na época com o intuito de obter algum ponto de partida, ou seja, precisam ser aprimorados e ajustados para os materiais disponíveis atualmente, pois alguns componentes não existiam ou foram melhorados, como os aditivos (SILVA, 2012).

O CAA possui teores de pasta e de argamassa maiores do que o concreto convencional, sendo que esses teores mais elevados propiciam atender os requisitos de auto adensabilidade, tais como, habilidade passante, habilidade de preenchimento

e resistência à segregação. Exemplos de referências de proporções de materiais e materiais empregados têm sido propostos por pesquisadores e entidades relacionadas com CAA. Domone (2009) constatou-se que 50% de um total de 68 concretos auto adensáveis foram empregados o aditivo modificador de viscosidade. Além disso, notou-se que o fíler calcário é a adição mais empregada e a dimensão máxima do agregado está entre 16 mm e 20 mm. BIBM *et al.* (2005) sugerem as seguintes faixas de composição do CAA: proporção de 27% a 36%, em volume, de agregado graúdo; consumo de 380 kg/m³ a 600 kg/m³ de aglomerante; consumo de 150 kg/m³ a 210 kg/m³ de água e proporção de 48% a 55% de agregado miúdo em função do peso total de agregado.

Corroborando em parte com as faixas de proporções dos materiais já apresentadas, têm-se as recomendações do ACI 237R – 07 (2007) e, apresentadas na Tabela 3-1, orienta que os valores sugeridos de proporções dos materiais, são recomendações iniciais para um estudo de dosagem de CAA, visto que há diferença nas características físicas e químicas dos materiais provenientes de locais distintos.

Tabela 3-1: Proporções de materiais recomendados pelo ACI237R-07

Volume absoluto de agregado graúdo	28 a 32% (>12 mm de diâmetro máximo)
Fração de pasta (calculado sobre o volume)	34 a 40% (referente ao volume total da mistura)
Fração de argamassa (calculado sobre o volume)	68 a 72% (referente ao volume total da mistura)
Relação água/aglomerante	0,32 a 0,45
Proporção de aglomerante	386 kg/m ³ a 475kg/m ³

Fonte: ACI237R-07 (2007)

Segundo Okamura e Ouchi (2003), a dosagem do CAA não é feita em função da resistência à compressão porque as relações água/aglomerantes são, em geral, suficientemente pequenas para garantir bons resultados de resistência à compressão, a menos que as adições empregadas sejam reativas. Neste tipo de concreto, a dosagem tem como objetivo principal atender aos requisitos básicos de deformabilidade, resistência à segregação e capacidade de passar por restrições, que são propriedades do estado fresco. Vale salientar que estas propriedades são mais afetadas por mudanças na qualidade e na proporção dos materiais aplicados do que no estado endurecido.

Na Tabela 3-2, estão exemplificados traços de CAA sugeridos pelo ACI 237R-07 (2007), os quais demonstraram bons resultados no estado fresco em vários estudos.

Tabela 3-2: Resumo dos melhores traços de CAA

Slump flow (mm)	660	660	660	838	686	660
SP policarboxilato	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Ar incorporado	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Redutor de água	Sim	----	----	Sim	----	----
VMA	----	----	----	Sim	Sim	----
Material aglomerante total (kg/m³)	445	403	463	473	415	415
Cimento (kg/m³)	356	403	368	205	415	356
Cinza volante (kg/m³)	89	----	----	83	----	59
Escória de alto-forno (kg/m³)	----	----	90	185	----	----
Relação água/aglomerante	0,37	0,42	0,39	0,34	0,41	0,40
Agregado miúdo/agregado graúdo	49	49	46	61	53	48,2
Fração de pasta	37,1	36,5	38,1	36	34,7	35
Fração de argamassa	64,6	68,3	63,4	64	59,5	65,6
Volume de agregado graúdo	35,6	31,7	36,6	36	31	33,5
Distribuição granulométrica (porcentagem retida)						
25 mm	----	----	----	----	----	----
19 mm	2,3	----	0,7	0,75	3	9
12.5 mm	9,2	----	11,3	5,6	15	19
9.5 mm	5,1	----	6,5	11,8	14	8
4.75 mm	25,4	26,6	23,6	26,2	15	14
2.36 mm	14,4	23,3	16,9	12,4	16	4
1.18 mm	9,5	10	5,7	12,5	14	12
600 µm	11,1	12,5	8,2	20,1	10	13
300 µm	12,2	14,5	18,4	8,5	8	14
150 µm	7	11,2	7,1	1,5	3	6
Fundo	3,9	2,3	1,4	0,24	1	1

Fonte: ACI237R-07 (2007).

Para a otimização da dosagem dos CAA, suas propriedades do estado endurecido devem ser melhor investigadas, possibilitando a produção de misturas mais econômicas. Emborg (1999) cita ainda alguns parâmetros que podem ser difíceis de serem detectados em testes de laboratório, mas que são importantes e precisam ser adicionados ao processo de dosagem do CAA, como a possibilidade de

surgimento de poros na superfície das estruturas e de pressões adicionais nas formas durante o lançamento dos concretos.

Para a obtenção da dosagem do CAA é importante determinar a dosagem do superplastificante em relação à massa de cimento (sp/c). Alguns estudos recomendam a sua determinação em pastas e/ou argamassas, nesta sequência respectivamente, a fim de se obter a dosagem ótima de saturação do superplastificante a ser utilizada no concreto, ou seja, o teor máximo de aditivo capaz de promover aumento da fluidez, pois, acima do qual alguns aspectos negativos podem ocorrer, tais como: segregação e/ou exsudação, fluidez insuficiente para a obtenção do CAA, perda de trabalhabilidade, dentre outros (GOMES, 2002).

Alguns métodos de dosagens para CAA, tais como de Okamura (1997), de Gomes (2002), de Su *et al* (2001) e EFNARC (2002) serão descritos resumidamente a seguir, por serem os mais difundidos ou por serem considerados os mais importantes para o desenvolvimento desta pesquisa. Serão ressaltadas algumas das vantagens e desvantagens de cada método proposto.

3.1.3.1 Método de Okamura

Trata-se do primeiro método de dosagem racional desenvolvido para a obtenção do CAA. Este método foi desenvolvido pelo Prof. Hajime Okamura, da Universidade de Tóquio, no Japão. O Método de Okamura parte de valores pré-fixados de alguns materiais para alcançar as propriedades de auto-adensabilidade desejadas (GOMES, 2002).

Okamura desenvolveu um método de proporcionamento para o concreto auto adensável em 1995 (OKAMURA e OUCHI, 2003), ao aprimorar suas premissas definidas em 1986, com o intuito de resolver o problema da baixa durabilidade das construções japonesas e diminuir o número de trabalhadores qualificados nos canteiros de obra. Para um concreto ser dosado de modo que cumpra os requisitos da auto-adensabilidade, deve possuir (OKAMURA e OUCHI, 2003):

- a) limitada quantidade de agregados;
- b) baixa relação água/cimento;
- c) altas dosagens de aditivos superplastificantes.

Entende-se que há uma certa dificuldade em manter um nível específico de auto compactabilidade, em função da grande influência exercida pela qualidade dos

materiais. Desta forma, o Método de Okamura parte de valores elevados para as características de auto compactabilidade, medidas por ensaios que serão descritos posteriormente. O concreto é ajustado em função da sua aplicação e, com isso são alargados os limites de controle da produção (NUNES, 2001).

No método são fixadas a quantidade de agregado graúdo em 50% do volume total de sólidos da mistura, e a quantidade de agregado miúdo em 40% do volume da argamassa. Um esquema do procedimento da dosagem de Okamura está representado na Figura 3-1, onde estas quantidades estão representadas. A dosagem do aditivo superplastificante e a relação água/cimento não foram quantificadas, embora Okamura (1997, p 52) especifique que a relação a/c deve depender das propriedades dos finos, enquanto o aditivo é determinado experimentalmente, até o material apresentar as características esperadas.

Figura 3-1: Esquema do procedimento de dosagem

Fonte: OKAMURA e OUCHI (2003)

Na Figura 3-2 pode-se analisar, segundo Okamura e Ouchi (2003), um comparativo entre as proporções dos materiais do CAA e do concreto convencional. Observa-se que as quantidades de ar incorporado, água e agregado miúdo ficam constantes, aumentam os finos (cimento, filer, adições e outros) do CAA em relação ao consumo de cimento do concreto convencional, e este aumento é compensado

com a diminuição do agregado graúdo. Ou seja, simplesmente troca-se brita por finos e adiciona-se aditivo para a obtenção do CAA (TUTIKIAN, 2004).

Figura 3-2: Comparação das dosagens de concreto convencional (CC) e CAA

CAA	ar	água	finos	agregado miúdo	agregado graúdo
CC	ar	água	cimento	agregado miúdo	agregado graúdo

Fonte: OKAMURA e OUCHI, (2003)

Okamura sugere os seguintes ensaios para controle deste método de dosagem: 1) Caixa U; 2) Funil V e 3) Teste do Espalhamento. Tais ensaios servem para verificar se o concreto é auto adensável para a estrutura a concretar, se a dosagem está adequada e para caracterização dos concretos. Os ensaios de Espalhamento e Funil V em escala reduzida, apresentados na Figura 3-3 e na Figura 3-4, respectivamente, devem ser aplicados caso a mistura necessite de correções (MENDES, 2009).

Figura 3-3: Espalhamento para argamassas

Fonte: OKAMURA e OUCHI, (2003)

Figura 3-4: Funil V para argamassas

Fonte: OKAMURA e OUCHI, (2003)

As considerações iniciais de Okamura em 1986, que posteriormente transformar-se-iam em um método de dosagem, em 1995, foram muito importantes para o desenvolvimento do moderno concreto auto adensável. Estas considerações foram a base do estudo e sem elas, provavelmente, não existiria atualmente este tipo

de mistura. Mas foram apenas os primeiros passos, não devendo serem mais utilizadas, pois não há como dosar um concreto apenas com limites superiores de quantidade e com termos altamente abrangentes, como alta dosagem de aditivo superplastificante e baixa relação a/c. Este método também não considera a utilização de finos pozolânicos, como sílica ativa, metacaulim ou cinza volante e aditivos modificadores de viscosidade (TUTIKIAN, 2004). Afirma ainda o autor que também não possui uma sequência clara de passos a serem seguidos, fazendo com que, se um responsável por dosagem utilizar este método, teria de realizar inúmeras tentativas para alcançar os requisitos esperados. Também se observa que, apesar de Okamura propor a execução de ensaios para medir a trabalhabilidade da argamassa em tamanho reduzido, não se conhece os limites esperados.

Basicamente o método envolve as determinações nas seguintes etapas:

- a) volume de ar incorporado no concreto (Var) - O método de Okamura considera um intervalo limite entre 4% e 7% para o volume de ar incorporado no concreto. A EFNARC (2002) recomenda 2%, devendo ser ajustado de acordo com a necessidade de resistência à ação do gelo-degelo;
- b) volume de agregado graúdo (Vg) - O volume máximo de agregado graúdo deve ser fixado como 50% do volume total de agregados, no estado compactado.
- c) volume de agregado miúdo (Va) - O volume de agregado miúdo é fixado em 40% do volume de argamassa.
- d) razão água/finos (a/f), água/cimento (a/c) e do teor de superplastificante.

A razão a/f e o teor de aditivo superplastificante empregados na dosagem do CAA são determinados a partir de ensaios em argamassa. Estes valores devem ser ajustados para atender às suas características de auto-adensabilidade exigidas. A relação água/cimento (a/c), em volume, deve ficar entre 0,9 e 1,0, dependendo das propriedades do cimento utilizado. Para isto, o método apresenta como sugestão à realização de ensaios para a determinação das propriedades reológicas da argamassa, com o ensaio de espalhamento, a partir do tronco de cone de consistência e o ensaio de fluidez, conhecido como Funil V (*V-Funnel*).

O ensaio de espalhamento da argamassa é realizado em um molde de forma tronco cônica, cujas especificações são apresentadas na Figura 3-5, a fim de verificar

a habilidade de espalhamento da argamassa, medindo-se o diâmetro de abertura da mistura.

Figura 3-5: Ilustração do tronco de cone de consistência

Fonte: GOMES (2002)

A partir do diâmetro de abertura, determina-se a área de espalhamento relativa (G_m), como está demonstrado na equação 3.1.

$$G_m = (d/d_0)^2 - 1,0 \quad (3.1)$$

Onde d é o diâmetro medido após o espalhamento da argamassa e d_0 é o diâmetro inicial, que corresponde à base do molde, cujo diâmetro é de 100 mm.

No ensaio de fluidez, determina-se o tempo (t) necessário para o escoamento da argamassa (tempo de fluxo), e o tempo de escoamento relativo (R_m), a partir da Equação 3.2.

$$R_m = 100/t \quad (3.2)$$

Onde t é o tempo de escoamento da argamassa e R_m é tempo de escoamento relativo.

Domone e Jin (2002) apresentaram sugestões para $G_m \geq 8$, correspondentes a diâmetros de espalhamento ≥ 300 mm; e R_m de 1 a 5, correspondentes a tempos de fluxo (t) de 2 s a 10 s. Já os valores de G_m entre 3 e 7, correspondentes a diâmetros de espalhamento da argamassa de 200 mm a 283 mm e valores de R_m entre 1 e 2, correspondentes aos tempos de fluxo de 5 s. a 10 s, foram adotados para o CAA por Edamatsu et al. (1999) apud Gomes (2002). Segundo Takada et al. (1998, apud NUNES, 2001), uma argamassa adequada para se chegar a um CAA deve ter $G_m = 5,0$ e $R_m = 1,0$.

Inicialmente em argamassas, devem ser ensaiadas para a determinação do espalhamento e da fluidez, variando-se o teor de aditivo superplastificante para que se obtenha o ponto em que G_m/R_m igual a 5,0. Com o teor de aditivo definidos, são realizados novos ensaios em argamassas, para determinação da relação água/finos que deve variar até que se obtenha o valor ideal que atenda a relação apresentada na Equação 3.3.

$$R_m / G_m^{0,4} = 0,525 \quad (3.3)$$

Onde G_m é a área de espalhamento relativo e R_m o tempo de escoamento relativo.

A dosagem de superplastificante deve ainda ser corrigida a partir dos ensaios realizados no concreto, tendo em vista apresentar uma reação diferente comparada à argamassa. Para isto, devem ser realizados os ensaios do espalhamento e Funil V. Após o ajuste da dosagem de superplastificante no concreto, alguns ensaios são realizados para a determinação da capacidade de preenchimento por meio da Caixa U (NUNES, 2001). Este método apresenta geralmente grande volume de pasta no concreto, pois os parâmetros não são fixados de forma racionalizada. Tal fato decorre de que o comportamento da mistura depende da caracterização e seleção dos materiais, variando assim na dosagem e proporção dos materiais constituintes, tornando, em alguns casos, uma dosagem pouco racionalizada.

3.1.3.2 Método de Su *et al*

O Método de Su *et al* (2001) é a descrição de um passo-a-passo com o objetivo de se obter uma primeira mistura de um concreto auto adensável, cuja principal consideração é o preenchimento do vazio do esqueleto dos agregados graúdos pouco compactados com argamassa. Normalmente a taxa de compactação de agregados graúdos é de 52% a 58%, ou seja, há de 42% a 48% de vazios que necessitam ser ocupados pela argamassa do concreto. Segundo Tutikian (2004), com este método é preciso somente que se escolha materiais adequados, faça os cálculos, os testes de trabalhabilidade e ajustes finais de traço e se obterá um concreto auto adensável com elevada fluidez e resistência à segregação, segundo as especificações da *Japanese Society of Civil Engineering* (JSCE) *apud* Su *et al.* (2001), ilustradas na Tabela 3-3.

Tabela 3-3: Especificações para o CAA

Classe de fluidez do concreto		1	2	3
Condições de construção	Abertura crítica (mm)	30-60	60-200	≥200
	Taxa de armadura (kg/m³)	≥350	100-350	≤100
Caixa U (mm)		≥300	≥300	≥300
Volume absoluto de agregado graúdo por volume de CAA (m³/m³)		0,28-0,30	0,30-0,33	0,30-0,36
Fluidez	Espalhamento (mm)	650-700	600-700	500-650
Resistência à segregação	Funil V (s)	10-20	7-20	7-20
	Espalhamento T ₅₀ cm (s)	5-25	3-15	3-15

Fonte: SU *et al* (2001)

Inicialmente são calculadas as massas de agregados miúdos e graúdos, pelas equações 3.4 e 3.5. A dimensão máxima do agregado graúdo pode ser de 15 mm, 20 mm e 25 mm, mas a de 20 mm é a mais comum.

$$Mg = FV * M_{Unitg} * (1-S/m) \quad (3.4)$$

$$Ma = FV * M_{Unita} * (1-S) \quad (3.5)$$

Onde Mg é a massa do agregado graúdo (kg/m³), Ma é a massa do agregado miúdo (kg/m³), FV é a fração de volume dos agregados compactados, Munitg é a massa unitária do agregado graúdo no estado solto, Munita é a massa unitária do agregado miúdo no estado solto e S/m é o fator de agregados miúdos em relação ao total de agregados, que varia de 50 a 57%.

Em seguida é calculado o consumo de cimento mediante da equação 3.6. Os autores recomendam que seja utilizado no mínimo 270-290 kg/m³ para garantir estruturas com alta durabilidade, mas deve-se ter cuidado, pois alta quantidade de cimento aumenta a retração do concreto. Segundo os autores do método, em Taiwan, utiliza-se a relação 0,14 MPa/kg ou 20 psi/kg de cimento.

$$C = f_c / 0,14 \quad (3.6)$$

Onde f_c é a resistência à compressão requerida e C é o consumo de cimento (kg/m³).

Na parte seguinte do cálculo da quantidade de água na mistura, o método é bastante similar ao cálculo com o concreto convencional. Com a quantidade de

cimento já determinada, deve-se estabelecer a relação água/cimento em função das solicitações locais, e calcular a água através da equação 3.7.

$$A = (a/c) * C \quad (3.7)$$

Onde A é a quantidade de água (kg/m³), a/c é a relação água/cimento e C é a quantidade de cimento (kg/m³).

Na etapa seguinte são realizados os cálculos das quantidades de cinza volante e escória de alto forno. No concreto auto adensável é necessária uma grande quantidade de materiais finos para aumentar a fluidez e facilitar a auto-adensabilidade, mas deve-se ter cuidado pois o excesso de cimento aumenta o custo do concreto, bem como a retração e ainda deve aumentar a resistência à compressão a níveis acima do desejado. Por isto, este método utiliza a relação a/c e a quantidade de cimento para alcançar as características de projeto, e a cinza volante e escória alto forno para garantir a resistência à segregação e elevar a porcentagem de pasta. Como já se tem as quantidades de todos os outros componentes do CAA, o volume que falta para completar 1m³ pertence a estas duas adições, como ilustra a equação 3.8.

$$V_{pcv} + V_{pes} = 1 + (Mg/10^3 M_{espg}) - (Ma/10^3 M_{espa}) - (C/10^3 M_{espc}) - (A/10^3 M_{espa}) - Var \quad (3.8)$$

Onde V_{pcv} é o volume de cinza volante (m³), V_{pes} é o volume de escória de alto forno (m³), M_{espg} é a massa específica do agregado graúdo (kg/m³), M_{espa} é a massa específica do agregado miúdo (kg/m³), M_{espc} é a massa específica do cimento (kg/m³), M_{espa} é a massa unitária da água (kg/m³) e Var é o volume de ar incorporado ao CAA (%).

Na equação 3.9 tem-se:

$$V_{pcv} + V_{pes} = (1 + a/cv) * CV\% * Mt/10^3 M_{espcv} + (1 + a/es) * ES * Mt/10^3 M_{espes} \quad (3.9)$$

Onde Mt é a massa total dos materiais pozolânicos (kg), CV é a porcentagem de cinza volante, ES é a porcentagem de escória de alto forno, a/cv é a relação água/cinza volante, a/es é a relação água/escória de alto forno, M_{espcv} é a massa específica da cinza volante e M_{espes} é a massa específica da escória de alto forno.

Os autores consideram que a relação água/cimento é igual à relação água/cinza volante e água/escória, as massas específicas se obtêm através de

ensaios normalizados, através da ABNT NBR 16605: 2017 e a porcentagem de cinza volante e a porcentagem de escória de alto forno são definidas pela experiência do profissional ou pelas características dos materiais. O cálculo das massas das adições é feito diretamente pelas equações 3.10 e 3.11.

$$M_{cv} = CV\% * M_t \quad (3.10)$$

$$M_{es} = ES\% * M_t \quad (3.11)$$

Onde M_{cv} é massa de cinza volante e M_{es} é a massa de escória de alto forno

A água requerida para a mistura devido a estes materiais é dada pelas equações 3.12 e 3.13.

$$A_{cv} = a/c * M_{cv} \quad (3.12)$$

$$A_{es} = a/c * M_{es} \quad (3.13)$$

Onde A_{cv} é a água requerida pela cinza volante e A_{es} é a água requerida pela escória de alto-forno

A etapa seguinte é o cálculo da quantidade total da água, que é a soma de água requerida pelo cimento, cinza volante e escória alto-forno, como mostra a equação 3.14, e se recomenda que fique entre 160 e 185 kg/m³.

$$A_t = A_c + A_{cv} + A_{es} \quad (3.14)$$

Onde A_t é a água total.

Na próxima etapa é calculada a dosagem de aditivo superplastificante (SP). Ao se adicionar corretamente o aditivo, pode-se aumentar a fluidez, a habilidade do CAA passar por obstáculos e a resistência à segregação, permitindo alcançar as características esperadas. O aditivo é composto por partículas sólidas (m%) e água (A_{sp}), a qual deve ser descontada da água da mistura. A dosagem do SP é igual a n% da massa dos aglomerantes, assim as equações 3.15 e 3.16 permitem o cálculo da massa do aditivo (M_{sp}) e da quantidade de água presente (A_{sp}).

$$M_{sp} = n\% (C + M_{cv} + M_{es}) \quad (3.15)$$

$$A_{sp} = (1-m\%)*M_{esp} \quad (3.16)$$

Onde M_{sp} é a massa de superplastificante e A_{sp} é massa de água presente no superplastificante.

Na sequência é calculada a real quantidade de água que deve ser ajustada caso os agregados utilizados estejam úmidos.

Os primeiros traços devem ser preparados para que se observe se a mistura está de acordo com o planejado e para que se realize os ensaios de trabalhabilidade propostos, ou seja, os resultados do Espalhamento, da Caixa U, da Caixa L e do Funil V devem estar dentro das especificações já comentadas, a exsudação e segregação devem ser satisfatórias, a relação a/agl deve satisfazer os requisitos de desempenho e durabilidade e o ar incorporado deve estar de acordo com o programado.

Na última etapa é realizado o ajuste final da mistura. Caso algum dos requisitos acima não estejam sendo atendidos, ajustes devem ser feitos de modo que o concreto se enquadre nos limites de auto-adensabilidade. Por exemplo, se a mistura estiver pouco fluida, deve-se aumentar a dosagem de aditivo ou a argamassa do concreto, para aumentar a trabalhabilidade.

Este método, proposto por Su *et al.* (2001), é o mais usual para dosagem de concretos auto adensáveis de resistências à compressão convencionais, pois é simples e considera algumas variações dos materiais, o que o torna mais confiável. Este autor conclui ainda que este procedimento possui alguns pontos que merecem serem estudados profundamente, como as incógnitas de cálculo da quantidade de agregados, o cálculo do consumo de cimento, da cinza volante e da escória alto forno e suas proporções (TUTIKIAN,2004).

Para o cálculo da quantidade de agregados do CAA, é necessário que se determine vários parâmetros, como a fração de volume dos agregados compactados, suas massas unitárias e a relação agregado miúdo/total de agregados. Para alcançar este objetivo, é necessária a execução de testes específicos para tal ou então utilizar valores encontrados por outros pesquisadores, realizados com outros materiais, que nem sempre são parecidos com os valores reais. Outro ponto questionável é o cálculo do consumo de cimento, que depende exclusivamente da resistência à compressão requerida.

Existem diversos tipos de cimentos, de agregados, de adições e de aditivos que influem na resistência final do concreto. Se for pretendido estabelecer uma equação universal para o cálculo do consumo de cimento, certamente todas estas variáveis devem ser incluídas. Finalmente, o método permite apenas a utilização de cinza volante e escória alto forno como adições, quando se sabe que existem outras disponíveis, como sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz, e dependendo do local da dosagem, estas últimas podem ser mais econômicas, sendo interessante seu uso. E, de acordo com o método, calcula-se a soma de consumo da cinza volante e da escória alto forno, em que a porcentagem de cada uma das adições é determinada pela experiência do responsável pela dosagem, ou seja, pode acontecer de ter que fazer dezenas de experimentos para que encontre a melhor relação entre as adições (TUTIKIAN, 2004).

3.1.3.3 Método de Gomes

Este método apresenta um procedimento de caráter experimental para obtenção da dosagem do concreto auto adensável de alta resistência. Esse procedimento constitui uma extensão do desenvolvido por Toralles et. al. (1996), para concretos de alta resistência, no sentido de incorporar critérios de dosagem, relativo aos concretos auto adensáveis.

Os critérios de otimização adotados na aplicação dos procedimentos vêm acompanhados por uma resistência mínima à compressão e por um cumprimento de diferentes requisitos de auto adensamento no estado fresco, tudo isso com uma quantidade mínima de superplastificante e cimento. Apresentam-se, também, detalhes de procedimentos de ensaios utilizados para a caracterização do estado fresco do CAA. É importante salientar que existem outros padrões de equipamentos (especificações e/ou tipos diferenciados) utilizados por outros pesquisadores na literatura técnica.

O procedimento proposto por Gomes (2002), para CAA de alta resistência, foi fundamentado na otimização do esqueleto granular de agregados, otimização separada da composição da pasta, com a determinação da dosagem ótima de superplastificante, variando a quantidade de superplastificante e mantendo constantes as relações água/cimento (a/c) e fíler/cimento (f/c), bem como a produção do concreto com a dosagem de superplastificante igual à dosagem ótima da pasta.

A relação a/f deverá ser fixada, a princípio, no limite superior de 0,4, para em seguida ser diminuída, até se atingir a resistência requerida para o concreto. Quanto ao esqueleto granular, deverá ser adotado um tamanho característico máximo para o agregado = 20 mm. A relação areia/brita (ar/br) é determinada segundo um critério de máxima densidade em seco e sem compactação, no sentido de ser obtida uma mínima quantidade de vazios entre os dois materiais.

O procedimento considera o concreto composto por duas fases, sendo uma fase a pasta e a outra o esqueleto granular. Estas fases podem ser obtidas e otimizadas separadamente, buscando as propriedades desejadas do material. De acordo com Gomes (2002), para ser considerado de alta resistência, o CAA deve alcançar 50 MPa aos 7 dias. Os seguintes parâmetros deverão ser obedecidos:

- a) apresentar baixa relação água/aglomerante ($a/agl < 0,40$);
- b) aperfeiçoar as relações aditivo superplastificante / cimento (sp/c) e finos / cimento (f/c) para que se obtenha pasta com alta fluidez e boa coesão;
- c) determinar um esqueleto granular com mínimo de vazios possível;
- d) determinar uma pasta que atenda aos requisitos de CAA no estado fresco, como capacidade de preenchimento das fôrmas, capacidade de passar obstáculos, resistência à segregação e resistência à compressão no estado endurecido.

Para a realização deste estudo, Gomes usou um cimento de alta resistência inicial. Esse foi utilizado juntamente com uma sílica ativa com baixa demanda de água, um superplastificante copolímero de última geração, um fíler com tamanho máximo das partículas em torno de $80\mu m$ e baixa demanda de água e agregados com baixo coeficiente de absorção.

Para a determinação da composição da pasta define-se a quantidade de cimento e as relações a/c , sp/c , sf/c e f/c , como já foi exposto anteriormente. Para um concreto de alta resistência, é fixado, a princípio, a relação água/finos = 0,4 (limite superior) e a relação $sf/c = 0,1$ (10% da massa do cimento), sendo que, em função disso, os parâmetros a serem determinados neste caso são as relações sp/c e f/c .

Os procedimentos descritos para este método de dosagem estão ilustrados na Figura 3-6.

Figura 3-6: Diagrama do método de dosagem de Gomes

Fonte: Gomes (2002)

A dosagem de superplastificante é determinada mediante a realização do ensaio do cone de Marsh, com abertura de saída de 8 mm de diâmetro conforme Figura 3.7. Tal procedimento consiste em introduzir 1 litro de pasta no cone e medir o tempo (T) que passa, para 500 ml de pasta fluir completamente pela abertura inferior do cone. A quantidade de cimento, água e fíler foram fixadas, anteriormente, a variável é a quantidade sólida de superplastificante. O ponto de saturação significa a relação sp/c para a qual um incremento da dosagem de superplastificante não provoca nenhuma melhora significativa na fluidez da pasta. Mas, a dosagem de superplastificante correspondente ao ponto de saturação, depende da relação f/c da pasta, das quais devem ser realizados ensaios para distintos valores da relação citada, de forma que podem ser adotados valores de 0,1 a 0,5 para f/c.

Figura 3-7: Dimensões do Cone de *Marsh*

Fonte: Gomes (2002)

A dosagem ótima de fíler é obtida com a realização do ensaio de mini-slump, equipamento, proposto por Kantro, 1980 (GOMES, 2002). Consiste de um molde em forma de tronco de cone, como mostra a Figura 3-8. No ensaio se mede o diâmetro da extensão final, em paralelo com o tempo gasto para se alcançar um diâmetro de 115 mm, denominado de T_{115} .

Figura 3-8: Aparato do Mini *Slump*

Fonte: Gomes (2002)

Os ensaios são realizados com diferentes relações f/c, cada uma com sua dosagem de superplastificante, correspondente ao ponto de saturação, já determinada, anteriormente, com ensaios do cone de Marsh, já citados anteriormente. A relação f/c ótima, da pasta, é aquela que apresenta um diâmetro de extensão final de 180 ± 10 mm e um tempo T_{115} no intervalo de 2 a 3,5 s. Os ensaios das pastas com o cone de Marsh e o Mini *Slump* permitem obter as respectivas relações de sp/c e f/c, que geram misturas de concreto, com fluidez máxima, sem segregação e com alto nível de coesão interna, coesão essa, que não prejudique significativamente a fluidez do material (GOMES, 2002).

A relação agregado miúdo/agregado graúdo é determinada segundo um critério de máxima densidade em seco e sem compactação, no sentido de ser obtida uma mínima quantidade de vazios entre os dois materiais. O ensaio consiste em preencher um recipiente com 5 litros de uma mistura seca com certa relação areia/brita. A partir dos dados dos dois materiais, densidade e peso de cada componente, obtém-se a massa unitária e o volume de vazios de cada mistura. O ensaio é realizado para várias relações entre os componentes, até se chegar à relação entre eles que apresenta maior densidade e menor volume de vazios (HELENE & TERZIAN, 1992; GOMES, 2002).

Realizadas as determinações das relações ótimas de sp/c e f/c para a pasta e a relação areia/brita, segundo o critério de maior densidade com menor volume de vazio, se faz necessária a obtenção do volume de pasta ótimo para satisfazer as condições de resistência e auto adensamento exigidos pelo concreto. Em função de tais parâmetros pré-estabelecidos, são produzidos concretos com diferentes quantidades ótimas de pasta, em função de cada tipo de aplicação. A quantidade mínima de pasta deve preencher os vazios do esqueleto granular, proporcionando a característica de auto adensamento no estado fresco e a resistência a compressão desejada no estado endurecido. Desta forma, os concretos devem ser submetidos aos diversos ensaios para garantir características de auto adensamento. Para o estabelecimento dos parâmetros da capacidade de preenchimento são utilizados os ensaios de Espalhamento (cone de Abrams) e Funil V, para os parâmetros da capacidade de passagem por armaduras é usada a Caixa L e finalmente para os parâmetros de ausência de segregação é utilizado o ensaio do Tubo em U. Na Tabela 3-4 estão apresentados os parâmetros estabelecidos para o atendimento dos critérios citados (LISBÔA, 2004).

Tabela 3-4: Faixa dos parâmetros que asseguraram o auto adensamento dos concretos

Propriedades	Ensaio	Parâmetros	Faixa ideal
Capacidade de preenchimento	<i>Slump Flow</i>	Extensão final de fluxo	60 a 75 cm
		T_{50}	5 ± 2 s.
	Funil V	Tempo total de fluxo	10 ± 3 s.
Capacidade de passagem	Caixa L	T_{L20}	$1 \pm 0,5$ s.
		T_{L40}	1,5 s. a 3,0 s.
		$RB=H_2/H_1$	= 80
Estabilidade	Tubo em U	Relação de segregação	= 90

Fonte: autor

3.1.3.4 MÉTODO EFNARC

Diversos programas relacionados ao CAA foram implantados atualmente, mais especificamente no Japão e países da Europa. Estas especificações técnicas, ensaios de caracterização dos materiais e propriedades do CAA nos estados fresco e endurecido, refletem a larga experiência da EFNARC (*European Federation National Representative Associations of Concrete*) sobre concretos especiais. A EFNARC atualmente é uma grande referência de pesquisa, baseada em várias experiências desenvolvidas por seus sócios na Europa, embora ainda reconheça que os avanços tecnológicos sobre o CAA ainda se encontram em evolução, e modificações podem vir a acontecer com o desenvolvimento das pesquisas encontradas na literatura. A EFNARC impõe algumas exigências quanto à produção, composição e aplicação do CAA, tais como:

- os materiais constituintes do CAA devem satisfazer às exigências da EN 206-1 (Especificação, desempenho, produção e conformidade do concreto);
- os cimentos utilizados devem satisfazer às exigências da EN 197-1 (Composição, especificações e critérios de conformidade do cimento). A seleção do tipo de cimento dependerá de suas exigências quanto à resistência, durabilidade, dentre outros. O consumo de cimento é da ordem de 350 kg/m³ a 450 kg/m³, pois acima deste valor, pode causar retração excessiva e abaixo só poderá ser utilizado com a adição de um outro material cimentício, tal como: cinza volante ou pozolanas;
- os agregados devem satisfazer às exigências da EN 12620. A dimensão máxima para o agregado graúdo é de 20 mm. Geralmente, são utilizados

agregados graúdos com dimensão máxima entre 16 mm e 20 mm. Para o agregado miúdo, todas as areias podem ser utilizadas, contanto que isenta de agentes nocivos e impurezas. É importante salientar a necessidade de se fazer um controle de umidade dos agregados para a obtenção de um CAA com composição uniforme;

- d) a água deve satisfazer às exigências da EN 1008 (Água para concreto);
- e) os aditivos químicos como os superplastificantes, devem atender às exigências da EN 934-2;
- f) os aditivos minerais ou adições minerais, como fíleres de agregados e pigmentos, devem atender às exigências da EN 12620 (Agregados para concreto), EN 450 (Definições, exigências e controle de qualidade de cinzas volantes para concreto), EN 13263 (Definições, exigências e controle de qualidade da sílica ativa para concreto);
- g) a produção e dosagem do CAA devem atender às exigências da EN 206 (Densidade, aumento de resistência, resistência final e durabilidade);
- h) a quantidade de finos deve ser menor que 125 µm para que as propriedades do CAA no estado fresco sejam satisfatórias. Caso contrário deve ser utilizado um agente regulador de viscosidade no concreto.

As propriedades analisadas do CAA no estado fresco são: capacidade de preenchimento, capacidade de passagem entre os obstáculos e resistência à segregação. Para classificar um concreto como auto adensável, todas estas exigências devem ser analisadas e atendidas. Essas propriedades são caracterizadas usando técnicas já conhecidas, a partir de equipamentos de ensaios específicos para o CAA.

Dentre os vários tipos de ensaios existentes, os mais recomendados para caracterizar a capacidade de fluxo são os ensaios de espalhamento “Slump Flow Test” e Funil V (V-Funnel). Para avaliar a capacidade de passagem por obstáculos, são recomendados o ensaio da Caixa L (L-Box), do Tubo em U e o Teste de Auto-adensabilidade. Já para caracterização da resistência à segregação são adotados os ensaios do Funil V e o GTM. Na Tabela 3-5 são apresentadas às faixas de valores típicos para o CAA adotados pela EFNARC.

Tabela 3-5: Faixa para caracterização das propriedades de fluxo do CAA

Propriedades	Ensaio	Unidade	Faixas típicas dos parâmetros	
			Mínimo	Máximo
Capacidade de preenchimento de formas	Espalhamento cone de Abrams	mm	650	800
	T ₅₀ cone de Abrams	seg.	2	5
	Funil V	seg.	6	12
	Orimet	Seg.	0	5
Capacidade de passagem por obstáculos	Caixa L	H2/H1	0,8	1,0
	Tubo U	(H2/H1)mm	0	30
	Caixa de preenchimento	%	90	100
	Orimet com anel de armaduras	mm	0	10
Resistência à segregação	GTM	%	0	15
	Funil V em T _{5 min}	Seg.	0	+3

Fonte: EFNARC (2002)

3.1.4 MÉTODOS DE ENSAIOS

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados os ensaios para a determinação dos parâmetros de espalhamento, habilidade passante, viscosidade e segregação. Os métodos utilizados foram o Cone de Abrams, Caixa L, Funil V e Coluna de Segregação.

Vários métodos de ensaios têm sido propostos para a caracterização do CAA, sendo que boa parte deles já são normalizados. A maioria desses métodos é usada para avaliar a habilidade passante do CAA. Dentre os ensaios comumente utilizados para esta finalidade são Anel J (J-ring), Caixa L e Caixa U. O ensaio de Caixa U é mais sensível para identificar mudanças na mistura, no entanto não é normalizado. Com relação à resistência à segregação, Cavalcanti (2006) afirma que o ensaio de coluna de segregação é o mais adequado para se notar quantitativamente diferenças entre misturas de CAA. O método da sonda tem sido usado para quantificar a segregação, sendo inclusive classificado como ágil e mais eficaz. A avaliação qualitativa da segregação é exigida pela ASTM C1611 (2010), entretanto a norma brasileira ABNT NBR 15823-1 (2017) não exige essa avaliação.

Ao longo dos anos foram desenvolvidos diferentes métodos de ensaios com o objetivo de caracterizar as propriedades do CAA no estado fresco. Estas propriedades têm sido caracterizadas usando técnicas recentemente desenvolvidas e estão ainda em fase de evolução. Alguns dos métodos de ensaios mais utilizados para a caracterização de tais propriedades são: ensaio de espalhamento do cone de Abrams

(Slump Flow Test), Funil V (V-Funnel), Caixa L (L-Box), Tubo em U e o Ensaio de auto adensabilidade para o concreto. Para o estabelecimento de parâmetros de capacidade de preenchimento são utilizados os ensaios de espalhamento no cone de Abrams e Funil V, para os parâmetros de capacidade de passagem entre as armaduras é utilizada a Caixa L, e finalmente para a verificação quanto à presença de segregação é utilizado o ensaio do Tubo em U (EFNARC, 2002).

A fluidez, ou seja, a capacidade do CAA fluir coeso e íntegro entre obstáculos, e a resistência à segregação, estão entre as principais propriedades que são necessárias para se determinar. Para cada um destes pontos há um grupo de equipamentos, uns mais aptos que outros e uns mais práticos que outros, conforme pode ser observado na Tabela 3-6.

Tabela 3-6 – Aptidões e praticidade dos ensaios para a medição da trabalhabilidade do CAA

Ensaio	Utilização		Propriedades Avaliadas		
	Laboratório	Obra	Fluidez	Habilidade de passar por obstáculos	Coesão
Espalhamento	X	X	XXX	N	X
Espalhamento t_{50}	X	X	XXX	N	X
Funil V	X	X	XX	N	X
Funil V 5 min	X	X	X	N	XXX
Caixa L	X	N	N	XXX	XX
Caixa U	X	N	N	XXX	XX
Tubo U	X	N	X	N	XXX

Legenda - XXX – altamente recomendável; XX – recomendável; X – pouco recomendável; N – não relevante

Fonte: SILVA (2012)

Para a determinação do espalhamento são medidos o diâmetro final de abertura do concreto (D_f) e o tempo (T_{50}) que este leva para atingir uma marca na base referente à um diâmetro de 50 cm. No ensaio do Funil V é determinado o tempo (T_v) em que o concreto aumenta seu tempo de escoamento pelo equipamento em relação à primeira determinação depois de decorridos 5 minutos. No ensaio da Caixa L são determinados os tempos TL_{20} e TL_{40} , que serão os tempos em que o concreto gasta para atingir as marcas horizontais referentes às distâncias de 20 cm e 40 cm do ponto inicial. Neste ensaio determina-se também a relação altura no ponto inicial (H_1) e altura no ponto final (H_2), conforme poderá ser observado mais adiante na ilustração do ensaio. Com relação aos ensaios para a determinação da segregação, o Tubo U determina a relação entre as massas M_1 e M_2 em diferentes pontos do aparelho

Verifica-se na Tabela 3-7, os principais ensaios praticados por pesquisadores e seus respectivos limites para a definição da auto compactabilidade do concreto.

Tabela 3-7 – Limites dos ensaios com CAA

Propriedades	Ensaio	Parâmetros	Faixa ideal
Capacidade de preenchimento	Teste de espalhamento	D_f	60 a 80 cm
		T_{50}	2 a 7 s
	Funil-V	T_V	6 a 13 s
Capacidade de passagem	Caixa-L	TL_{20}	≤ 2 s
		TL_{40}	≤ 4 s
		$R = H_2 / H_1$	0,80 a 0,85
Estabilidade à segregação	Tubo-U	$RS = M_1 / M_2$	$\geq 0,90$

Fonte: EFENARC, Gomes (2002)

Em seguida serão descritos alguns dos métodos de ensaios mais comumente utilizados para a determinação das principais propriedades do CAA.

3.1.4.1 Ensaio de espalhamento -“Slump Flow Test”

O Teste do Espalhamento tem sua descrição baseada em EFNARC (2002), Gomes (2002) e Peterssen (1998), FURNAS (2004a), Tviksta (2000, apud Silva, 2012 p 42). Este ensaio é utilizado para medir a capacidade do CAA de fluir livremente sem segregar. Foi desenvolvido primeiramente no Japão, para ser usado em concretos submersos. A medida de fluidez a ser obtida do CAA é o diâmetro do círculo formado pelo concreto. Para concretos convencionais, a trabalhabilidade é medida pela ABNT NBR NM 67:1998: concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone – método de ensaio, ou pela ABNT NBR NM 68: 1998: concreto – Determinação da consistência pelo espalhamento na mesa de *Graff*.

A determinação da consistência do concreto, pelo espalhamento da mesa de *Graff*, é aplicável para misturas que atinjam o espalhamento mínimo de 350 mm, mas limitado ao tamanho da mesa, de 700 mm. Pode-se afirmar, a grosso modo, que o Teste do Espalhamento é uma adaptação do ensaio, para um concreto excessivamente fluido (TUTIKIAN, 2004). Este autor afirma ainda que o Teste do Espalhamento também permite observar, visualmente, se o concreto está segregando ou não. As Figuras 3-9, 3-10 e 3-11 ilustram o resultado do ensaio realizado com três tipos de CAA, o primeiro sem apresentar segregação, o segundo tendendo a segregar e o terceiro com segregação visível.

Figura 3-9 – CAA sem segregação

Fonte:TUTIKIAN (2004).

Figura 3-10 – CAA tendendo a segregar

Fonte:TUTIKIAN (2004).

Figura 3-11 – CAA segregado

Fonte:TUTIKIAN (2004).

Nota-se que à medida que o concreto vai segregando, o agregado graúdo vai formando uma pilha central, enquanto ar vai sendo incorporado e apenas a argamassa vai fluindo para as extremidades, formando uma auréola. Se este concreto da Figura 3-11 fosse aplicado em estruturas reais, certamente o agregado graúdo iria para o fundo das fôrmas, então a argamassa e a água subiriam para a superfície, o que provocaria grandes falhas de concretagem, diminuindo a durabilidade e a resistência mecânica das peças (TUTIKIAN, 2004).

O *Slump Flow Test* consiste em preencher o cone de Abrams de concreto sem compactar, e em seguida levantá-lo, lentamente, deixando o concreto se estender em uma base plana, como mostra Figura 3-12. A média de duas medidas perpendiculares do concreto espreado resulta no valor do parâmetro de extensão final do fluxo. O tempo medido em segundos, para o concreto alcançar um diâmetro de 50 cm, também é determinado e chamado de T_{50} .

Figura 3-12 – Ensaio de espalhamento do cone de Abrams – Slump Flow Test

Fonte: Cavalcanti (2006).

3.1.4.2 Teste do Funil V – V Funnel

A realização deste ensaio consiste em medir o tempo que amostras de aproximadamente 10 litros de concreto, gastam para fluir totalmente através do orifício inferior do funil. A seção do orifício inferior deverá ter uma dimensão mínima de 3 vezes o tamanho máximo do agregado graúdo e, para os CAA, estas dimensões deverão variar de 6,5 cm a 7,5 cm. O ensaio tem o seu detalhamento fundamentado nos procedimentos de EFNARC (2002) e Gomes (2002). O equipamento mede a fluidez do concreto, assim como o Teste do Espalhamento e o Teste do Espalhamento T_{50} cm para agregados graúdos de diâmetro máximo de 20 mm. Na Figura 3-13, verifica-se duas possibilidades de formatos para o aparelho. Na extremidade inferior do equipamento retangular existe uma porta, que pode ser deslizante ou com dobradiça, para que mantenha o concreto no interior do aparelho e seja aberta para iniciar o ensaio. A medida é o tempo em que o material leva para escoar do funil.

Figura 3-13 – Aparelho adaptado para o Teste do Funil V

Fonte: Gomes (2002)

Após a execução do ensaio, pode-se preencher novamente o funil com concreto e esperar 5 minutos para a repetição do procedimento, para que se teste a resistência à segregação, já que se o CAA estiver segregando, o tempo de escoamento irá aumentar significativamente. Um cuidado a se observar é que este aparelho é bastante simples e ainda não se sabe de alguma influência provocada pelo ângulo interno e as paredes internas na fluidez do concreto.

Tabela 3-8 estão indicados alguns valores propostos por diversos pesquisadores. Quando da repetição do ensaio, é aconselhável que o tempo em que o concreto escoar aumente em, no máximo, três segundos.

Tabela 3-8 – Limites de resultados e dimensões para o Teste do Funil V – referências diversas (SILVA, 2012).

Referência	Tempo (s)		Dimensões (mm)			
	Mínimo	Máximo	A	B	C	D
EFNARC (2002)	6	12	490	425	150	65
FURNAS (2004)	-	-	515	450	150	65
Gomes (2002)	10	15	515	450	150	65 ou 75
Gomes <i>et al</i> (2003a)	7	13	515	450	150	65
Araújo <i>et al</i> (2003)	6	12	-	-	-	-
Noor e Uomoto (1999)	9,5	9,5	490	425	150	70
Peterssen (1998 e 1999)	5	15	550	450	120	75
Coppola (2000)	-	-	500	425	150	65

Fonte: Silva (2012).

3.1.4.3 Teste da Caixa L – L Box

O ensaio da Caixa L tem como finalidade medir a fluidez do concreto simultaneamente com a habilidade de passar por obstáculos, permanecendo coeso. É utilizado para estabelecer os parâmetros de fluidez e de capacidade de passagem por armaduras. Consiste em preencher o cômodo vertical da caixa com a amostra de concreto, de aproximadamente 12 litros, após a abertura da porta da caixa, são medidos os parâmetros TL20, TL40 e H2/H1, que são respectivamente, o tempo para o concreto em fluxo alcançar um comprimento horizontal de 20 e 40 cm, e a relação final entre as alturas do concreto no final do trecho horizontal e a altura do concreto remanescente do trecho vertical da caixa.

Embora muitos autores defendam uma normalização deste procedimento, o mais correto seria padronizar apenas a parte fixa do equipamento, enquanto as armaduras seriam escolhidas para cada situação. A Figura 3-14 ilustra as medidas da Caixa L com 3 barras de aço de 12,5 mm de diâmetro, espaçadas em 40,6 mm entre si, por serem as mais usuais, como pode-se observar na Tabela 3-9, que ilustra limites defendidos por diversos autores. Aconselha-se utilizar agregados graúdos com diâmetro máximo de 12,50 mm, um terço do valor do espaçamento das armaduras (TUTIKIAN, 2004).

Figura 3-14 – Ensaio da Caixa L – L Box

Fonte: Cavalcanti (2006).

Tabela 3-9 – Limites de resultados e dimensões para o Teste da Caixa L, segundo diversas referências (SILVA2012)

Referência	Medidas			Dimensões (mm)				
	h1/h2	T ₂₀ (s)	T ₄₀ (s)	A	B	C	D	E
EFNARC (2002)	0,80	-	-	100	200	600	800	150
FURNAS (2004)	-	-	-	100	200	600	700	150
Gomes (2002)	0,80	1	2	100	200	600	700	150
Gomes <i>et al</i> (2003a)	0,80	0,5-1,5	2-3	100	200	600	700	50
Araújo <i>et al</i> (2003)	0,80	-	-					-
Rigueira Victor <i>et al.</i> (2003)	0,80	1,5	3,5					-
Peterssen (1998 e 1999)	0,80	-	-	100	200	600	700	150
Barbosa <i>et al.</i> (2002)	-	-	-	00	-	600	700	150
Tviksta (2000)	0,85	-	-	100	-	600	-	150
Coppola (2000)	0,90		-	120	-	600	780	200
Palma (2001)	0,80	-	3 a 6	-	-	-	-	-

Fonte: Silva (2012).

Para a execução deste ensaio são necessários a Caixa L, feita com material não absorvente e de superfície lisa, espátula, pá côncava, trena e cronômetro para a medição do tempo em que o concreto chega aos 20 cm e aos 40 cm, que devem ser marcados no trecho horizontal do aparelho. A cronometragem destes tempos não é obrigatória nem recomendada por todos os autores, pois estes tempos são pequenos

e de difícil marcação, a não ser que se utilize uma pessoa para marcar cada um dos tempos, o que dificultaria ainda mais a execução do ensaio (SILVA, 2012).

3.1.4.4 Caixa U – *Box Shaped Test*

Este ensaio tem como finalidade principal avaliar a capacidade do CAA em ultrapassar aberturas estreitas e a facilidade com o que leva para preencher o tubo apenas pelo seu peso próprio (RAVINDRA *et al.*, 2004; GOMES 2002). Foi utilizado por EFNARC (2002) e Gomes (2002). Desenvolvido pela *Technology Research Centre of the Taisei Corporation in Japan*, o Teste da Caixa U também pode ser chamado de *Box shaped test* e serve para medir a fluidez e a habilidade do concreto passar por obstáculos sem segregar. O equipamento ilustrado na Figura 3-15 exibe dois compartimentos separados por um portão móvel e barras de aço de diâmetro de 12,5 mm espaçadas entre si em 40,6 mm. Segundo Tutikian (2004), também podem ser utilizadas as medidas e intervalos propostos por outros pesquisadores, ilustrados na Tabela 3-10.

Figura 3-15 – Caixa U com medidas recomendadas pelo EFNARC

Fonte: EFNARC (2002).

Tutikian (2004) comenta que, assim como no Teste da Caixa L, no Teste da Caixa U as armaduras devem ser projetadas caso a caso, a fim de se ter uma precisão maior nos resultados dos testes. Quando o concreto passa de um compartimento para o outro sofre uma resistência ao movimento, e quanto mais íntegro e coeso passar, sem segregar, mais auto adensável está mostrando ser. Este equipamento é de difícil confecção e depois de pronto pode ser frágil, dependendo do material, o que dificulta seu uso em campo, sendo mais apropriado para uso em laboratório.

Tabela 3-10 – Limites de resultados e dimensões para o Teste da Caixa U segundo diversas referências

Referência	R1 – R2 (mm)		Dimensões (mm)			
	Mínimo	Máximo	A	B	C	D
EFNARC (2002)	0	30	200	590	140	140
FURNAS (2004f)	-	-	200	680	190	140
Gomes (2002)	0	80	200	680	190	140
Araújo <i>et al</i> (2003)	0	30	-	-	-	-
Noor e Uomoto (1999)	0	24,2	200	680	190	140
Shindoh e Matsuoka (2003)	0	80	200	680	190	140
Coppola (2000)	90%	100%	200	680	190	140

Fonte: Silva (2012).

3.1.4.5 Tubo U -

Este procedimento foi totalmente desenvolvido por Gomes (2002), e serve para mensurar a segregação de um concreto auto adensável. A resistência à segregação significa que a distribuição dos agregados graúdos deve ser em todos os lugares e níveis, ou seja, o concreto não pode segregar nem horizontal e nem verticalmente, por isso é necessário que exista um método rápido e simples para o teste da coesão da mistura (BUI *et al.*, 2002).

Os parâmetros de ausência de segregação dos concretos são estabelecidos por meio do ensaio com o tubo em U, de 16 cm de diâmetro. O ensaio consiste em fazer fluir amostras de concreto sem sofrer compactação, através do tubo e após algum tempo, quando os concretos já se encontram em estado de semi-endurecimento, são cortados, em cada caso, três fatias de 10 cm de espessura: a primeira no início do tubo de entrada, a segunda no início do trecho horizontal e a terceira no final do trecho horizontal do tubo. Após a retirada das argamassas por de processo de lavagem das fatias sobre peneiras de 5 mm, são pesados os agregados de cada conjunto de três fatias. As Relações de Segregação (RS), são obtidas dividindo-se a massa dos agregados existentes, após a lavagem e enxugamento com papel toalha, da segunda fatia pela primeira fatia e o mesmo com a terceira pela primeira fatia. O menor valor das duas relações é a Relação de Segregação, que deve ser maior ou igual a 0,90 (LISBÔA, 2004).

O Tubo U é composto por três tubos de PVC de diâmetro interno de 156 mm, conforme ilustrado na Figura 3-16. O primeiro e o terceiro tubo têm 570 mm de comprimento, enquanto o segundo mede 800 mm, e todos são serrados ao meio e presos com braçadeiras metálicas, para que possam ser abertos sem danificar o concreto que está no interior.

Figura 3-16 – Medidas recomendadas e ilustração do Tubo U (

Fonte: TUTIKIAN (2004).

3.1.5 ADITIVOS PARA CAA

Os aditivos para CAA surgiram da necessidade melhorar as propriedades destes concretos, tanto em seu estado fresco, quanto no estado endurecido.

A norma ABNT NBR 11768:2011 define aditivos como um produto adicionado durante o processo de preparação do concreto, em quantidade não maior do 5% da massa de material cimentício contida neste concreto, com o objetivo de modificar suas propriedades no estado fresco e/ou no estado endurecido, exceto pigmentos inorgânicos para o preparo de concreto colorido.

Segundo Metha e Monteiro (2014), de todos os concretos estudados no mundo, 70% a 80% dos usam algum tipo de aditivo.

Para CAA os aditivos comumente utilizados são os superplastificantes, responsáveis pela fluidez do concreto, e os modificadores de viscosidade, responsáveis pela coesão da mistura, utilizado ocasionalmente quando na ausência de componentes finos economicamente ou tecnicamente inviáveis.

Os aditivos superplastificantes podem ser divididos em quatro grupos, sendo os lignossulfonatos ou lignossulfonatos modificados (LS), sais sulfonatos de policondensado de naftaleno e formaldeído (NS), sais sulfonatos de policondensado de melanina e formaldeído (MS) e policarboxilatos (PC).

Lignossulfonatos, LS, são conhecidos como aditivos plastificantes de primeira geração e utilizados como redutores de água normais e, em alguns casos, também como superplastificantes. NS e MS, naftaleno e melanina, respectivamente, são conhecidos comercialmente como aditivos superplastificantes de segunda geração e permitem a redução em até 25% a quantidade de água na mistura, quando usados como redutores de água. Os policarboxilatos, PC, são aditivos mais aconselháveis para a utilização em CAA, por serem superplastificantes de alta eficiência, que dispersam e desfloculam as partículas de cimento, permitem a redução da água de mistura em até 40%, mantendo a mesma trabalhabilidade (TUTIKIAN, 2008).

Este autor coloca ainda que os aditivos superplastificantes, além das funções citadas, podem também auxiliar na fluidez da mistura, através da redução da tensão superficial da água, da repulsão eletrostática entre partículas, atuando como filme lubrificador entre as partículas de cimento, na dispersão dos grãos de cimento, inibição da hidratação superficial do cimento, deixando mais água livre para fluidificar o concreto e na mudança da morfologia dos produtos de hidratação.

3.2 RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Reconhecido mundialmente como um dos mais importantes ramos de atividade para o desenvolvimento econômico e social, o setor da Construção Civil, por outro lado, comporta-se também como grande gerador de impactos ambientais, quer seja pelo consumo de recursos naturais, pela modificação da paisagem ou pela geração de resíduos sólidos. Em razão disso, este setor tem um grande desafio que é de buscar conciliar uma atividade produtiva de grande magnitude com as condições que conduzam a um desenvolvimento sustentável consciente, menos agressivo ao meio ambiente.

De todos os segmentos da Construção Civil, apesar ainda dos baixos níveis de desempenho, o que mais se desenvolveu e que teve mais abrangência quanto à aplicação dos conceitos de sustentabilidade foi o de materiais e componentes da construção, afirma Curtius e Fiedler (2002). A explicação para esse fato é simples: a pressão exercida pelos órgãos de controle ambiental quanto a manuseio e destinação adequada dos resíduos gerados, os altos custos envolvendo a destinação final em aterros controlados e a pressão da população quanto à operação das atividades industriais em perímetros urbanos. Essa pressão, entretanto, é diferenciada, já que a

regulamentação, o controle e a fiscalização da produção industrial competem aos estados.

A indústria da Construção Civil apresenta-se, dentro deste contexto, com um grande potencial para a solução desses problemas, pela viabilidade que apresenta de incorporação desses resíduos nos materiais de construção, possibilitando, ainda, redução nos custos dos produtos da construção. Logo, o desenvolvimento tecnológico de processos associados à reciclagem de resíduos industriais passa a ter hoje enorme relevância. O aumento no descarte de rejeitos sólidos, bem como os problemas advindos da exaustão de matérias-primas naturais, vem impulsionando os estudos sobre o aproveitamento desses resíduos como novos materiais, reduzindo o seu impacto ambiental e viabilizando a redução de custos industriais e a criação de novos empregos. Quanto ao aproveitamento de resíduos como materiais de construção, só nos últimos anos iniciaram-se discussões mais consistentes do problema e do potencial de aproveitamento (CURTIUS; FIEDLER, 2002). Ainda de acordo com estes autores, alguns centros de pesquisa, com maior capacidade instalada, conseguiram envolver os geradores de resíduos e aplicar os resultados em processos industriais. Entretanto, pontos delicados da questão precisam ser mais atacados: estabelecimento de normas e de procedimentos que auxiliem na validação dos materiais desenvolvidos com resíduos e mapeamento da disponibilidade dos resíduos. Além disso, a forma de avaliação do potencial de liberação de poluentes ainda não é consensual, tendo sido empregados os procedimentos estabelecidos para lixiviação e solubilização de resíduos. Salienta-se, além disso, que a análise de metais que compõem a concentração total de uma matriz necessita, muitas vezes, o acoplamento de duas ou mais técnicas, não sendo mais suficiente uma boa reprodutibilidade dos resultados, mas uma boa exatidão dos resultados analíticos.

A crescente demanda por matéria prima na construção civil, especialmente por aquelas extraídas da natureza, também aumenta a preocupação devido aos impactos maléficos que produz. Conforme Cabral (2007), este modelo de desenvolvimento tradicionalmente adotado no mundo converge para políticas de extrativismo de recursos naturais sem a inserção equitativa de benefícios sociais e econômicos para o ser humano, é o chamado de desenvolvimento explorador. Diante desta situação, faz-se necessário que um novo modelo de desenvolvimento seja adotado, para que as gerações humanas futuras possam desfrutar dos benefícios dispostos na natureza,

sendo esse modelo de desenvolvimento chamado de desenvolvimento sustentável (SILVA,2012).

A concordância sobre a necessidade de reestruturação do modelo linear de desenvolvimento para que se possa garantir a preservação ambiental e até mesmo a sobrevivência da espécie humana é observado em trabalhos de diversos autores. Esses estudiosos alertam sobre a necessidade de se avaliarem todos os impactos das atividades de produção e de consumo, desde a extração da matéria-prima e os processos industriais, até o transporte e o destino dos resíduos de produção, além, é claro, do destino que se dará aos produtos após sua utilização. Neste contexto, a utilização de resíduo na indústria da construção civil constitui não apenas uma resposta racional na melhoria da gestão ambiental de atividade industrial, se não também uma necessidade, como se tem assumido em boa parte da indústria da construção em países como, por exemplo, Holanda e Japão. O uso de resíduos industriais, como os provenientes das indústrias metalúrgicas e termoeletricas, e também de resíduos gerados pela própria atividade da construção civil, como os resíduos de construção e demolição (RCD), como componentes, quer seja na fabricação do cimento ou mesmo na produção do concreto, tem crescido consideravelmente em todo o mundo. Seu emprego geralmente proporciona ao concreto melhores desempenhos no estado fresco e endurecido (SILVA, 2012).

O macro setor da construção civil é responsável pelo consumo de mais de 50% dos recursos naturais mundiais, o que contribui de forma decisiva para o agravamento dos impactos causados por este modelo de exploração. Desta forma destaca-se a indústria do cimento, considerado o material de construção civil mais utilizado em todo o mundo e principal componente dos concretos, que é responsável atualmente por mais de 5% das emissões de CO₂ mundiais, valor que deverá ser aumentado 30% até 2050, se nenhuma providência for tomada (DAMINELE, 2013). Segundo este autor, mesmo que ações para diminuição das emissões de CO₂ (melhoria na eficiência dos fornos, modificação dos combustíveis e substituição do clínquer por cinza volante e escória de alto-forno), fossem levadas ao extremo em esforço mundial, isso não seria suficiente, o que deve aumentar muito a pressão sobre as indústrias de cimento nos próximos anos. Uma das alternativas para minimizar este panorama – o sequestro e estocagem de carbono – poderia dobrar o preço do cimento, com prejuízo de ordem social para muitos países que ainda necessitam de grande volume de infraestrutura básica e moradias.

3.1.2 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO

A norma brasileira ABNT NBR 10.004:2004, define como resíduos sólidos, *“aqueles resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível”*.

Segundo esta mesma norma, os resíduos podem ainda ser classificados quanto a periculosidades, pelos seguintes critérios:

- a) inflamabilidade;
- b) corrosividade;
- c) reatividade;
- d) toxicidade;
- e) patogenicidade.

Com base nesses critérios, eles podem ser classificados como:

- a) classe I – Perigosos: quando suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas podem apresentar risco à saúde pública e ao meio ambiente;
- b) classe II-A – Não Inertes: aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos Classe I ou de resíduos Classe II-B. São aqueles que podem ter propriedades, tais como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
- c) classe II-B – Inertes: não apresentam, após teste de solubilização, concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, exceto os padrões de cor, turbidez, sabor e aspecto.

O Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA, na Resolução nº 358, de 29 de abril de 2005, em seu anexo I, define os resíduos sólidos de acordo com a seguinte classificação:

- a) grupo A: Resíduos com a possível presença de agentes biológicos que, por suas características de maior virulência ou concentração, podem apresentar risco de infecção;
- b) grupo B: Resíduos contendo substâncias químicas que podem apresentar risco à saúde pública ou ao meio ambiente, dependendo de suas características de Inflamabilidade, corrosividade, reatividade e toxicidade. Enquadram-se neste grupo, dentre outros:
 - drogas quimioterápicas e produtos por elas contaminados;
 - resíduos farmacêuticos (medicamentos vencidos, contaminados, interditados ou não utilizados);
 - demais produtos considerados perigosos, conforme classificação da ABNT NBR 10004:2004 (tóxicos, corrosivos, inflamáveis e reativos);
- c) grupo C: Quaisquer materiais resultantes de atividades humanas que contenham radionuclídeos em quantidades superiores aos limites de eliminação especificados nas normas da Comissão Nacional de Energia Nuclear-CNEN e para os quais a reutilização é imprópria ou não prevista.
- d) grupo D: Resíduos que não apresentem risco biológico, químico ou radiológico à saúde ou ao meio ambiente, podendo ser equiparados aos resíduos domiciliares.

O mesmo CONAMA, com a Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, enquadrou os resíduos da construção civil nas seguintes categorias:

- a) classe A - São os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:
 - de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
 - de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;

- de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;
- b) classe B - São os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros;
- c) classe C - São os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologia ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso;
- d) classe D - São os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

Além dessa classificação dos resíduos, que possibilita um manejo mais adequado, bem como o auxílio para o emprego dos mesmos como material alternativo (reciclado) em diversas áreas da construção civil, esta resolução estabelece ainda que os mesmos não possam ser dispostos em aterros de resíduos sólidos domiciliares ou em bota-fora. Também estabelece que a competência para o gerenciamento dos mesmos fica sobre responsabilidade dos governos municipais (AZEVEDO; KIPERSTOK; MORAES, 2006).

Pucci (2006) faz uma caracterização da cadeia logística do resíduo de construção civil, dentro das exigências estabelecidas pela CONAMA 307/02. O autor observou que a cadeia logística desse resíduo pode ser dividida em dois subsistemas distintos, e que os mesmos merecem tratamentos específicos, visto a existência de diferentes participantes e etapas em cada um deles. Os subsistemas especificados pelo autor foram:

- a) subsistema interno à obra que trata do resíduo gerado por uma tarefa específica, sua segregação, seu acondicionamento no local da tarefa, seu transporte até o local de armazenamento da obra e armazenamento até sua retirada;
- b) subsistema externo à obra: compreendendo as etapas de armazenagem do resíduo para retirada, o transporte do resíduo e sua deposição final, sendo que esse subsistema se apresenta muito mais complexo que o

primeiro, visto que as responsabilidades por cada etapa pertencem a diferentes interlocutores.

3.2.2 RECICLAGEM DOS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

A reciclagem de resíduos da construção civil (RCC) é, de forma simplificada, um beneficiamento mineral. O beneficiamento mineral é um conjunto de operações unitárias com o objetivo de se obter características específicas de uma matéria-prima como separação dos seus constituintes minerais, adequação de tamanho, etc. No Brasil, grande parte das instalações de reciclagem destes resíduos é gerida pelo setor público com a finalidade de produzir agregados que são utilizados em atividades de pavimentação, porém ainda de forma incipiente (FRAGA, 2006).

O mercado dos agregados naturais é vasto e mesmo que todo o RCC seja utilizado como agregado, a participação no mercado total não seria superior a 20%. Entretanto, este mercado está dividido em diversas aplicações: pavimentação, argamassas, concretos de diferentes resistências, etc. O uso de agregados para atividades de pavimentação não é suficiente para permitir a reciclagem completa dos resíduos, sendo necessária a utilização em outras aplicações, em especial, argamassas e concretos, em função da grande demanda (ANGULO et al., 2002).

Os agregados são produtos de mineração de baixo valor, sendo que 2/3 dos custos são relativos às despesas de transporte. Como os RCC são gerados dentro das cidades, pode existir uma grande vantagem competitiva dos agregados reciclados com relação aos naturais. Entretanto, em ambos os casos, é necessária produção em larga escala para que a operação seja lucrativa o que torna muitas vezes a atividade incompatível com a necessidade de ocupação da malha urbana.

3.2.3 RESÍDUO DA INDÚSTRIA CERÂMICA

A indústria de cerâmica vermelha, objeto de interesse desta pesquisa, é aquela responsável pela produção de blocos, tijolos, telhas, tubos, elementos vazados, dentre outros, cujas matérias primas empregadas, são constituídas por argilas plásticas (caulinito-ilíticas), nas quais os componentes principais são as argilominerais (silicatos hidratados de alumínio) matéria orgânica, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, retirados geralmente das margens de rios, lagos e várzeas (SANTOS 1989). Segundo este autor, no Brasil, a indústria cerâmica utiliza processos manuais ou mecânicos de produção de peças que podem ser por extrusão ou prensagem. As temperaturas de

queima oscilam entre 950° C e 1250 ° C, conforme a natureza da argila, do produto cerâmico, do tipo de forno utilizado e das condições econômicas do local.

As cerâmicas são obtidas a partir de uma massa a base de argila, submetidas a um processo de secagem lento e, após a retirada de grande parte da água, é sintetizada em temperaturas elevadas. Um dos critérios mais tradicionais para classificação das cerâmicas é a cor da massa, que pode ser branca ou vermelha (KASMIERCZAK, 2010).

O índice de perda do setor de cerâmica vermelha pode variar entre 3% a 30%, dependendo da região (SILVA, 2012). Considerando a abundância destes resíduos e os prejuízos que seu descarte indevido pode causar no meio ambiente, fornecer uma destinação adequada final a eles significa contribuir para a redução do impacto ambiental. Assim, a indústria da construção civil busca incorporar estes resíduos em produtos à base de cimento, o que pode ser uma prática constante com a avaliação do desempenho final. A utilização de resíduos na matriz cimentícia proporciona tanto benefício ambiental, quanto técnico e econômico.

Existem muitos tipos de resíduos cerâmicos de barro vermelho que constituem subprodutos da indústria, cada tipo com diferenças marcadas pela constituição mineralógica, cor, dureza, em grande parte resultante na matéria prima utilizada, mas também do tratamento térmico a que estes produtos foram submetidos (MATIAS *et al.*, 2012).

A dureza das matérias primas é um importante fator para a escolha do equipamento a ser utilizado no processo de moagem dos materiais (VIERA, 2005). No caso dos materiais cerâmicos, cuja a matéria prima básica é a argila, o processo de moagem mediante o emprego de moinho de bolas, é amplamente utilizado. O referido processo permite a obtenção de uma distribuição granulométrica bastante fina e pode ser realizado por processo a seco ou úmido.

Segundo Vieira (2005), tempos de moagem excessivamente grandes não correspondem necessariamente a melhor moagem, sendo que existe um tempo de moagem adequado para cada material e moinho. Ultrapassando-se este tempo não haverá melhora no rendimento, apenas a elevação dos custos do processo e o desgaste do moinho, sem obter uma moagem mais fina ou maior reatividade do material.

Dentre os principais polos ceramistas do Brasil, destacam-se os estados de São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, Paraná, Santa Catarina e Bahia (ANICER, 2017).

Segundo a ANICER (2017), a indústria de cerâmica vermelha no Brasil é composta por 6903 fábricas de cerâmica, geradoras de 293 mil empregos diretos e 900 mil indiretos, e que representa 4,8% da indústria da Construção Civil.

Na Tabela 3-11 estão representados alguns números da indústria de cerâmica vermelha nacional.

Tabela 3-11 – Indústria de Cerâmica Vermelha

Produtos	Nº de Empresas Aproximado	Produção/mês (nº de peças)	Consumo Ton/mês (argila)
Bloco/tijolo	4346	4.000.000.000	7.800.000
Telha	2547	1.300.000.000	2.500.000
Tubo	10	325,5 km*	-

* Produção apontada pela Associação Latino-Americana de Fabricantes de Tubos Cerâmicos (Acertubos), considerando o número de 10 empresas, responsáveis pela fabricação de 3.906km/ano

Fonte: ANICER (2017)

Resíduos da fabricação de telhas cerâmicas vermelhas, objeto componente da investigação desta pesquisa, foram diagnosticados por Dias (2004) na região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. Neste local concentram várias indústrias cerâmicas, nas quais a quantidade de resíduos gerada foi considerada significativa, justificando assim a realização de estudos para seu aproveitamento. As cidades de Monte Carmelo e Ituiutaba se encontram em posições favoráveis de acesso alguns grandes centros consumidores como Brasília, Goiânia, Belo Horizonte, Uberlândia, Uberaba e outros. A atividade industrial de cerâmica vermelha é tradicional nesses municípios, remontando seu crescimento ao tempo da construção da capital da república.

Dados da época mostram que os parques cerâmicos existentes no Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba congregavam mais de 100 indústrias de cerâmica vermelha, segundo o Sindicato das Indústrias de Cerâmica e Olaria do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba – SINCOTAP/Ituiutaba e a Associação dos Ceramistas de Monte Carmelo - ACEMC / Monte Carmelo. Na cidade de Ituiutaba, eram dezesseis indústrias e, em Monte Carmelo cerca de quarenta, caracterizando dois importantes pólos industriais na região (SILVA, 2012).

Dias (2004) produziu e avaliou agregados reciclados de telhas e concluiu ser possível o aproveitamento dos finos deste material em camadas de pavimentos de baixo volume de tráfego. Ao caracterizar o agregado produzido com este resíduo, vislumbrou-se outras utilizações na construção civil, dentre elas o emprego em concretos, o que poderia agregar valor a estes materiais que se inserem num grupo específico de resíduos, pois são constituídos de uma única fase, ao contrário dos agregados reciclados de resíduos da construção e demolição que são polifásicos; outra característica ressaltada pelo autor é que o resíduo é gerado após a queima das telhas e sai dos fornos sem contaminação, facilitando sua reciclagem.

Uma outra possibilidade de utilização para o resíduo foi vislumbrada por Silva (2012) que verificou, após a realização de ensaios de caracterização do resíduo, a possibilidade de emprego dos finos menores que $75\mu\text{m}$ deste material em substituição parcial do cimento na produção de concreto, o que será tema de abordagem adiante nesta pesquisa.

3.3 MATERIAIS POZOLÂNICOS

Os cimentos Portland comercializados em vários países como França, Alemanha e Brasil, recebem a incorporação de adições minerais no processo de fabricação. Em outros, como nos Estados Unidos da América, cimentos com adições são raros, devido à incorporação das adições serem realizadas diretamente na produção do concreto. Segundo Silva (2007) em qualquer um dos casos, os resultados são semelhantes. O termo adição mineral refere-se a possíveis materiais que possam ser incorporados ao clínquer Portland para formar os mais variados tipos de cimento.

As pozolanas destacam-se entre as diversas adições minerais incorporadas ao cimento Portland. Pozolanas são materiais silicosos ou sílico-aluminosos que por si só possuem pouca ou nenhuma propriedade cimentante. Finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio, a temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentantes (MEHTA e MONTEIRO, 2008). O termo “pozolanas” foi primeiramente usado na Itália para descrever as cinzas vulcânicas extraídas em Pozzuoli, um vilarejo perto de Nápoles (MALHOTRA e MEHTA, 1996).

Os materiais pozolânicos são rochas ou matéria orgânica fossilizada, ambas encontradas na natureza, certos tipos de argilas queimadas a elevadas temperaturas e resíduos derivados da queima de carvão mineral em usinas termelétricas. De acordo com Neville (20,16), as pozolanas podem então serem divididas em dois grupos, as naturais e as originadas de algum processamento industrial, como é o caso da cinza volante, cinza pesada moída (cinza de fundo), cinza de casca de arroz, sílica ativa e metacaulim.

De acordo com Santos (2006), o uso de pozolanas em adição ao cimento confere ao concreto e argamassa características como:

- a) menor calor de hidratação, pela troca de reações exotérmicas (hidratação do cimento), e por reações atérmicas (pozolânicas);
- b) melhor resistência ao ataque ácido em função da estabilização do hidróxido de cálcio oriundo da hidratação do clínquer Portland e à formação um C-S-H com menor relação CaO/SiO_2 de menor basicidade;
- c) maior durabilidade, contribuindo para a inibição da reação álcali-agregado e diminuição do diâmetro dos poros da pasta hidratada, reduzindo o ataque do material por substâncias externas como cloretos e sulfatos.

A substituição parcial do cimento por pozolana implica ainda na economia de energia e na redução do custo de fabricação do cimento, o que aumenta o período de exploração das jazidas de calcário e argila e, conseqüentemente, o período de produção da fábrica de cimento. Além disso, há um aumento da capacidade de produção sem necessidade de novos investimentos (SANTOS, 2006).

Os materiais pozolânicos são energeticamente mais econômicos que o clínquer do cimento Portland, tendo ainda implicações ecológicas, pois contribuem para um melhor aproveitamento dos resíduos industriais poluidores, como é caso das cinzas volantes transportadas pelos gases de exaustão das termelétricas, e da microssílica oriunda das indústrias de ferro-silício e silício metálico (OLIVEIRA, BARBOSA, 2006), e até mesmo os resíduos de cerâmica moída e resíduos agrícolas como a casca de arroz. Mehta (1987) destaca ainda, entre outras vantagens da utilização de pozolanas em concretos com cimento Portland, o aumento da trabalhabilidade do material, aumento da resistência à fissuração devido à redução da reação álcali-agregado, e maior impermeabilidade.

É preciso evidenciar ainda que, mesmo com as vantagens, oriundas da utilização de pozolanas juntamente ao cimento Portland, o uso deste material pode apresentar também algumas desvantagens (SANTOS, 2006). Exemplo disso é a exigência do uso de aditivos redutores de água em função do aumento da demanda de água nas misturas e a necessidade de cura adequada para que a reação pozolânica aconteça em sua plenitude, como no caso da cinza volante. Além disso, com a substituição de parte do cimento por pozolana, os concretos passam a ter menores resistências iniciais, em função das reações pozolânicas serem mais lentas.

3.3.1 CLASSIFICAÇÃO DAS POZOLANAS

A norma brasileira ABNT NBR 12653:2014, classifica os materiais pozolânicos segundo três classes:

- a) classe N, que são as pozolanas naturais e artificiais que obedecem aos requisitos da norma, tais como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, “cherts” silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas;
- b) classe C, que são as cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoeletricas, que obedecem também aos requisitos da norma;
- c) classe E, como sendo qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores, conforme estabelecido na norma.

Essa classificação é em função da sua origem, requisitos químicos e físicos, estabelecidos na Tabela 3-12 e Tabela 3-13, respectivamente. Além destes requisitos, na versão anterior da referida norma eram apresentados ensaios facultativos, cujos limites constam na Tabela 3-14, e eram aplicáveis às condições específicas, quando solicitado.

Tabela 3-12 – Requisitos Químicos

Propriedades	Classe do Material Pozolânico		
	N	C	E
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	≥ 70	≥ 70	≥ 50
SO_3	≤ 4	≤ 5	$5 \leq$
Teor de umidade (%)	≤ 3	≤ 3	≤ 3
Perda ao fogo (%)	≤ 10	≤ 6	≤ 6
Álcalis disponíveis em Na_2O (%)	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$

Fonte: NBR 12635 (2014)

Tabela 3-13 – Requisitos Físicos

Propriedades ^A		Classe do Material Pozolânico		
		N	C	E
Material retido na peneira 45µm (%) [*]		<20	<20	<20
Índice de atividade pozolânica	Cimento 28 dias (%)	≥ 90	≥ 90	≥ 90
	Cal 7 dias (MPa)	≥ 6	≥ 6	≥ 6

^{*} Este método de ensaio deve ser adaptado da ABNT NBR 15894-3, substituindo-se o metacaulim pelo material pozolânico.

Fonte: NBR 12635 (2014)

Tabela 3-14 – Limites para ensaios Facultativos (NBR12653:2012)

Propriedades ^A		Classe do Material Pozolânico		
		N	C	E
Fator múltiplo calculado como produto da perda ao fogo pelo teor retido no peneiramento úmido pela peneira 45µm (%)		-	≤255	-
Aumento na retração por secagem de barras aos 28 dias		≤0,05	≤0,05	≤0,05
Reatividade com álcalis do cimento	Redução da expansão da argamassa aos 14 dias (%)	≥ 75	≥ 75	≥ 75
	Expansão da argamassa aos 14 dias (%)	≤0,02	≤0,02	≤0,02

Fonte: NBR 12653 (2014)

Conforme o anexo A da ABNT NBR 12653(2014), a adição de materiais pozolânicos em concretos, argamassas e pastas, em relação a uma referência, sem uso destes materiais e em condições de igualdade, concorrem para:

- aumento das resistências à compressão e à flexão, em idades avançadas, apesar de uma diminuição nas primeiras;
- redução da porosidade e permeabilidade;
- aumento da resistência a sulfatos;
- aumento da resistência de difusibilidade de íons de cloreto;
- mitigação da reação álcali-agregado;
- redução da ocorrência de eflorescências;
- aumento da resistividade elétrica. As propriedades no estado fresco e endurecido de concretos, argamassas e pastas, conferidas pelos materiais pozolânicos, quando comparadas às propriedades desses produtos sem a sua presença, dependem do tipo e desempenho do material utilizado, do teor adicionado em relação à massa de cimento Portland, do proporcionamento dos materiais (traço), incluindo os aditivos, do tipo de preparo, lançamento, adensamento, condições de cura e outros.

De acordo ainda com esta norma, atenção deve ser dada ao lento desenvolvimento da resistência inicial desse material e ao aumento da retração por secagem do compósito com ele preparado. Igualmente, deve-se atentar para o fato de que alguns materiais pozolânicos, como por exemplo, cinzas de resíduos vegetais, podem conter quantidade suficiente de materiais carbonosos que podem afetar esteticamente o concreto ou interferir na eficiência de aditivos incorporadores de ar, entre outros aspectos.

As Pozolanas naturais são aquelas cuja origem é vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido (65% de SiO₂) ou de origem sedimentar com atividade pozolânica, e as pozolanas artificiais são materiais resultantes de processos industriais ou provenientes de tratamento térmico com atividade pozolânica e podem ser divididas em argilas calcinadas, cinzas volantes e outros materiais (MONTANHEIRO et al, 2002).

As pozolanas naturais, por serem definidas como sendo materiais de origem vulcânica ou sedimentar com atividade pozolânica, sua abrangência, segundo Montanheiro *et al.* (2002), dá margem a controvérsias quanto à classificação de certos tipos de pozolanas, como das argilas calcinadas que, segundo alguns autores, são dadas como naturais e, segundo outros, como artificiais. O ponto crucial da questão está em classificar uma rocha cujas propriedades pozolânicas são realçadas com o tratamento térmico. Estes autores classificam como pozolanas naturais todas as rochas portadoras de atividade pozolânica natural. Por outro lado, entre outros autores, admite-se como pozolanas naturais também os produtos da calcinação dessas rochas.

Desta forma, considera-se as argilas calcinadas como pozolanas artificiais, mas que, independentemente de sua classificação, existe um consenso quanto a sua definição, que são materiais provenientes da calcinação de certas argilas submetidas a temperaturas, em geral, entre 500°C e 900°C, de modo a garantir a sua reatividade com o hidróxido de cálcio (DAL MOLIN, 2005).

Já as cinzas volantes, definidas como pozolanas artificiais, são materiais finamente divididos que resultam da combustão de carvão pulverizado ou granulado com atividade pozolânica (ANBT NBR 12653:2014). Ainda, de acordo com esta norma, “outros materiais” podem ser considerados pozolanas não-tradicionais, tais como: escórias siderúrgicas ácidas, cinzas de materiais vegetais, rejeito de carvão mineral.

As pozolanas também são classificadas dentro de três grandes grupos de adições minerais de acordo com sua ação físico-química (DAL MOLIN, 2005):

- a) material pozolânico - materiais silicosos ou sílico-aluminosos que por si só possuem pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas que finamente dividido e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio para formar compostos com propriedades cimentantes;
- b) material cimentante – não precisam de hidróxido de cálcio, produto da hidratação do cimento Portland, para formar hidratos, como o C-S-H. No entanto a reação é lenta dificultando sua aplicação para fins estruturais, mas que, utilizado como uma adição junto ao cimento Portland, na presença do hidróxido de cálcio e gipsita, sua reatividade é aumentada;
- c) fíller – é uma adição mineral finamente dividida, com diâmetro médio das partículas próximo ou menor que do cimento Portland, provavelmente sem atividade química. Sua ação se resume a um efeito físico de empacotamento granulométrico e ação como pontos de nucleação para hidratação de grãos de cimento.

Na Tabela 3-15 está demonstrada a classificação das adições minerais utilizadas para a produção de concretos com fins estruturais.

Tabela 3-15 – Classificação das adições minerais para concreto estrutural

Classificação	Adições Minerais
Cimentante	Escória granulada de alto forno
Cimentante e Pozolânicas	Cinza volante com alto teor de cálcio ($\text{CaO} > 10\%$)
Pozolânicas Altamente Reativas	Sílica ativa, metacaulim, cinza de casca de arroz (predominantemente amorfa)
Pozolanas Comuns	Cinza volante com baixo teor de cálcio ($\text{CaO} < 10\%$) Materiais naturais (argilas calcinadas e cinza vulcânicas)
Pozolanas Pouco Reativas	Escória de alto forno resfriada lentamente, cinza de forno, escória de caldeira, palha de arroz queimada no campo (predominantemente cristalina)
Fíller	Calcário, pó de quartzo e pó de pedra.

Fonte: DAL MOLIN (2005)

3.3.2 REAÇÕES POZOLÂNICAS

A pozolanicidade das adições, ou seja, a capacidade de formar compostos cimentantes desde que na presença de água e hidróxido de cálcio, podem ser avaliadas por técnicas normatizadas pela ABNT, a partir de métodos indiretos de

quantificação do potencial reativo, como índice de atividade pozzolânica (IAP) com cimento Portland, ou cal hidratada, respectivamente, ABNT NBR 5752:2014 e ABNT NBR 5751:2015, ou por método direto e acelerado, como o ensaio de Chapelle Modificado, conforme ABNT NBR 15895:2010, o qual determina a capacidade da adição de fixar cal (GOBBI, 2014).

Danatello *et al* (2010) recomendam que, para avaliar a atividade pozzolânica de um material, é importante a escolha do método utilizado, baseando-se nas limitações e condições do ensaio. Estes pesquisadores indicam ainda que a avaliação seja feita por mais de um método e a comparação dos resultados dos diferentes métodos deve contemplar uma análise crítica a respeito da temperatura e de cura das amostras.

Conforme dito anteriormente, para um material ser classificado como pozzolânico, a quantidade de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ deve ser de no mínimo 70% para materiais das Classes N e C, e de, pelo menos 50%, para dos da Classe E. Portanto, assume-se que, adicionando ao cimento um material pozzolânico, cujos óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 estão presentes em estado amorfo ou com sua estrutura cristalina fraca, em presença de água e à temperatura ambiente, estes óxidos reagem com o hidróxido de cálcio (produzido pela hidratação dos silicatos do cimento Portland) formando compostos que possuem propriedades aglomerantes (DONATELLO *et al.*, 2010).

O material pozzolânico, quando natural, dispensa qualquer tratamento para apresentar, ou potencializar sua pozzolanicidade, exceto a moagem, procedimento que aumenta a área de contato para as reações. Já no caso das pozzolanas artificiais, aquelas que necessitam de beneficiamento, os tratamentos a elevadas temperaturas, influenciam na cristalização do material, pois, durante o resfriamento das fases cristalinas, são transformadas em amorfas, atribuindo a reatividade ao material. O dióxido de silício presente nos materiais pozzolânicos possuem fases polimórficas como o quartzo, a tridimita, a cristobalita, entre outras. Os materiais com estruturas desordenadas (amorfas) são os que apresentam maior reatividade comparada aos de estrutura cristalina (CORDEIRO, 2006).

O efeito químico obtido da reação entre a pozzolana e o hidróxido de cálcio é denominada reação pozzolânica e apresenta como aspectos principais:

- a) reação lenta, desta forma a liberação de calor e o desenvolvimento das resistências também são lentos;

- b) o produto das reações é muito eficiente em preencher os espaços capilares, melhorando o desempenho quanto a resistência e à impermeabilidade do produto final (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Montanheiro et al. (2002) afirmam que a reação pozolânica se desencadeia porque a sílica e a alumina são vulneráveis ao hidróxido de cálcio, devido à fraqueza e instabilidade de suas ligações estruturais no material original, como é o caso do vidro vulcânico ou das argilas calcinadas.

Segundo Mehta (1987), exceto para zeólitas, que desenvolvem suas propriedades cimentícias com a cal por mecanismo de troca de base, a reação pozolânica ocorre devido à reação entre a cal (básica) e os óxidos (ácidos) da pozolana, que são os maiores responsáveis pela melhora das características técnicas no concreto. A principal reação pozolânica envolve a formação de silicato de cálcio hidratado (CSH), similar ao produzido pela hidratação dos silicatos de cálcios do cimento Portland, como o C_3S . As reações podem ser descritas como:

- a) $C_3S + H_2O \rightarrow CSH + CH$ (hidratação do cimento Portland)
 b) $CH + S + H_2O \rightarrow CSH$ (reação pozolânica)

Onde $C = CaO$, $S = SiO_2$ e $H = H_2O$.

O hidróxido de cálcio, CH, necessário à reação pozolânica, é gerado juntamente com o silicato de cálcio hidratado, C-S-H, por meio das reações de hidratação do silicato tricálcico (C_3S), e silicato dicálcico (C_2S), presentes no cimento Portland. Segundo Neville (2016), Mehta e Monteiro (2008) e Souza (2004), o C-S-H não tem composição fixa e é responsável pela resistência do cimento, enquanto o CH influencia na durabilidade da pasta, principalmente sujeita a meios ácidos. Conforme afirma Souza *et al.* (2002), o C-S-H resultante da hidratação do cimento apresenta relação Ca/Si em torno de 1,7 a 1,8, variando pouco com a idade. Em função da adição de um material pozolânico (por exemplo a microssílica) o CH resultante da hidratação é rapidamente consumido e a razão entre Ca/Si do C-S-H cai para 0,7 a 0,8, possivelmente como resultado da nucleação, que faz diminuir a quantidade de íons Ca^{2+} disponíveis na hidratação.

Mitchell *et al.* (1998) *apud* SOUZA *et al.* (2002) observou que as partículas de microssílica permanecem na pasta mesmo após 180 dias de hidratação. Na parte interna destas partículas foi constatado um elevado teor de Si em relação ao Ca,

$Si/Ca=3$, enquanto que nas regiões periféricas a proporção é menor, $Si/Ca=0,5$. Admite-se portanto que a reação pozolânica ocorra na superfície das partículas do material pozolânico, formando uma película de C-S-H que impede da reação pozolânica prosseguir, no interior das partículas, com a mesma dinâmica com que ocorre na superfície.

A reação pozolânica ocorre de forma lenta, assim como a taxa de desenvolvimento de resistência e o calor de hidratação associado a essa reação. Por outro lado, a hidratação do C_3S do cimento Portland é rápida, e, portanto, a taxa de desenvolvimento da resistência e o calor de hidratação são altos. Nota-se ainda que a reação de hidratação do cimento produz hidróxido de cálcio, enquanto a reação pozolânica (MEHTA,1987).

De acordo com MASSAZZA (1998), o clínquer e a pozolana apresentam processos de reação muito diferentes, cada um reagindo em diferentes estágios da hidratação. A reação pozolânica tem início entre 7 e 15 dias após a mistura, quando a hidratação do cimento se apresenta já em estado avançado. Assim, as reações do clínquer e da pozolana podem ser investigadas separadamente, sendo consideradas as influências mútuas dos dois processos. Para SOUZA *et al.* (2002), depois de decorrido um dia, a hidratação do cimento com incorporação de aditivo mineral envolve unicamente o clínquer, podendo-se observar que as partículas da adição se comportam como regiões de nucleação para o crescimento dos produtos de hidratação. Em estágios mais avançados, a superfície externa destas partículas parece alterada, dando início ao seu consumo. Primeiramente as partículas são recobertas por uma fina camada de composição diversa às suas. Gradualmente, esta camada passa a ser substituída por agulhas de C-S-H que crescem perpendicularmente à superfície. Souza *et al* (2002), ressalta ainda que os produtos de hidratação de um sistema cal/aditivo mineral são bastante similares àqueles resultantes da hidratação do cimento Portland, ocorrendo variação mais na quantidade que na natureza das fases.

Conforme mencionado anteriormente, a reação pozolânica, segundo MEHTA (1987), ocorre de forma lenta, assim como a taxa de desenvolvimento de resistência e o calor de hidratação associado a essa reação. Por outro lado, a hidratação do C_3S do cimento Portland é rápida, e, portanto, a taxa de desenvolvimento da resistência e o calor de hidratação são altos. Nota-se ainda que a reação de hidratação do cimento

produz hidróxido de cálcio, enquanto a reação pozolânica consome. Este processo pode ser demonstrado através do gráfico da Figura 3.17.

Figura 3-17 – Mudança do conteúdo de hidróxido de cálcio durante a hidratação de cimento Portland Pozolânico

Fonte: MEHTA (1987).

3.3.3 MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA REATIVIDADE

Os métodos para a avaliação da atividade pozolânica são uma combinação de muitos fatores, que muitas vezes não podem ser controlados. As características físicas ou mineralógicas do material, a proporção utilizada, aliada a fatores externos como o cimento utilizado, a relação água/materiais cimentantes, temperatura e condições de cura, são determinantes nos resultados dos testes (SANTOS, 2006). Para o autor também seriam requisitos básicos para um método de ensaios:

- a) ter capacidade para distinguir entre um material pozolânico ou não;
- b) fornecer informações sobre o grau de atividade pozolânica da mistura, além de dados sobre o desenvolvimento de sua resistência;
- c) permitir a avaliação dos resultados em um curto espaço de tempo, para que sejam utilizado o quanto antes pela indústria da construção.

De acordo com SOUZA *et al.* (2002), a atividade pozolânica pode ser classificada em termos de propriedades químicas, físicas e mecânicas, sendo observado que os resultados dos diferentes métodos têm pouca correlação. Os métodos mecânicos expressam a atividade pozolânica em termos da resistência à compressão, embora seja bem estabelecido que o consumo de Ca(OH)_2 não tem relação com resistência. Ainda como desvantagem, deve-se considerar que o ganho de resistência em misturas de cal ou cimento dá-se mais lentamente com a

incorporação de aditivos minerais. Quimicamente, as pozolanas podem ser classificadas pela determinação da cal consumida. Já a classificação física se dá através de ensaios de difração de raios-X, onde é possível determinar as fases cristalinas da sílica, e através de termogravimetria, que permite calcular a quantidade de cal na mistura.

Segundo Madalena (2013), a verificação da atividade pozolânica pode ser determinada através da medição das propriedades físicas, químicas e mecânicas, podendo os métodos utilizados serem classificados como diretos e indiretos.

Donatello *et al.* (2010) afirmam que os métodos diretos monitoram a presença de Ca(OH)_2 e a sua variação com o tempo ao longo da reação pozolânica. Tal avaliação pode ser realizada usando métodos como a DRX e análise gravimétrica. Por sua vez, os métodos indiretos medem as variações que ocorrem nas propriedades físicas, como por exemplo, a resistência à compressão, condutividade elétrica, ou liberação de calor por calorimetria. Os resultados dos métodos indiretos são validados pelos métodos diretos, confirmando ou não, a ocorrência da atividade pozolânica do material.

Silva (2010) relata a existência de vários métodos que avaliam a atividade pozolânica, entre eles, método de Chapelle, a determinação da resistência mecânica, a DRX, a determinação de consumo de Ca (OH)_2 pela termogravimetria e a determinação do calor de hidratação por meio de técnicas calorimétricas.

Cunha (2012) apresenta como métodos para a avaliação da atividade pozolânica, os ensaios de termogravimetria (TG) e termogravimetria derivada (DTG), ou ainda, através da análise térmica diferencial (DTA), o método de Chapelle, o método de Chapelle modificado, o ensaio de Frattini, condutividade elétrica e o IAP com cimento, no Brasil preconizada pela ABN NBR 5752:2014.

Pontes (2011) trabalhou em sua pesquisa com cinco diferentes métodos de avaliação da atividade pozolânica, que conforme o autor, foram selecionadas para seu estudo com base em sua relevância em termos bibliográficos. Os métodos empregados foram: método de Chapelle, Chapelle modificado, método de Frattini, análise termogravimétrica e diminuição da condutividade por medição da resistência elétrica. O autor afirma que todos os métodos se baseiam na capacidade das pozolanas em combinarem-se com Ca(OH)_2 formando silicatos e aluminatos de cálcio com propriedades ligantes. A diferença entre estes métodos encontra-se na proporção

dos reagentes e na forma como é medida a quantidade de Ca(OH)_2 consumida (HANSEN, 2016).

Santos (2006) conclui que o ideal para a avaliação de um material pozolânico, é analisa-lo sob as reais condições que será empregado, seja para a produção de uma argamassa ou concreto, utilizando o mesmo teor de substituição, a mesma trabalhabilidade, a mesma relação água/cimento e a mesma marca de cimento.

Na literatura observa-se que não existe um método padrão para a avaliação da atividade pozolânica de um determinado material, conforme pode ser verificado na Tabela 3-16.

Tabela 3-16 – Métodos de avaliação da atividade pozolânica encontrados na literatura

AUTOR (ANO)	MÉTODO	PAÍS
Amori, Lira e Ferreira (2003)	Chapelle Modificado	Brasil
Cordeiro e Désir (2010)	Chapelle Modificado IAP NBR 5752	Brasil
PONTES (2011)	Chapelle Chapelle Modificado Frattini IAP – NP EM 450 Termogravimetria Condutividade Elétrica	Portugal
Cunha (2012)	Análise térmica diferencial não convencional Análise de TG/DTG e DTA Resistência à compressão NBR 7215	Brasil
Pontes, Silva e Faria (2012)	Chapelle Chapelle Modificado Frattini IAP – NP EM 450	Portugal
Sales e Alferes Filho (2014)	IAP NBR 5752	Brasil
Tironi <i>et al.</i> (2013)	Frattini Condutividade elétrica	Argentina
Madalena (2013)	Chapelle Modificado Frattini IAP – NP EM 450	Portugal
Sebastiany (2014)	Condutividade elétrica Análises termogravimétricas IAP – NBR 5752	Brasil

Fonte: HANSEN (2016)

3.3.3.1 Índice de Atividade Pozolânica (IAP)

As normas ABNT NBR 5751:2015 e ABNT NBR 5752:2014, regem, no Brasil, os ensaios para a determinação da atividade pozolânica. As normas baseiam-se em medir as resistências mecânicas das argamassas de Ca(OH)_2 e cimento, respectivamente, a partir da incorporação de material a ser considerado pozolânico.

O método de ensaio para determinação da atividade pozzolânica com a cal aos sete dias de idade está descrito na norma ABNT NBR5751:2015.

A argamassa deve conter uma parte, em massa, de hidróxido de cálcio e mais uma quantidade de material pozzolânico, que corresponda ao dobro do volume do hidróxido de cálcio. Para a moldagem de três corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, devem-se utilizar as seguintes quantidades, em massa dos materiais:

- a) hidróxido de cálcio P. A.: 104 g;
- b) areia normal: 234 g de cada uma das quatro frações;
- c) material pozzolânico: $m=2 \times (\delta_{poz} / \delta_{cal}) \times 104 \text{ g}$.

Onde δ_{poz} é o valor da massa específica do material pozzolânico em ensaio, determinado pelo método estabelecido na ABNT NBR 16605: 2017, e δ_{cal} é o valor da massa específica do hidróxido de cálcio P.A. utilizado no ensaio, determinado pelo método mesmo método.

Este ensaio é uma medida direta do grau de pozzolanidade pela determinação da resistência à compressão simples, conforme ABNT NBR 7215 (2019), de corpos-de-prova de argamassas preparadas com o material em estudo, cal, areia e água. A quantidade de água da mistura, segundo é aquela necessária para um índice de consistência *flow table* de (225 ± 5) mm, determinado segundo a ABNT NBR 7215:2019. São moldados 3 corpos-de-prova, sua cura ocorre em duas etapas: nas primeiras 24 horas, nos moldes, à temperatura de $(21 \pm 2)^\circ\text{C}$ e, em seguida, feita a desforma, por 6 dias, a 55°C . Após esse prazo, os corpos-de-prova são resfriados à temperatura ambiente, capeados à quente com enxofre e, logo a seguir, ensaiados à compressão. A pozzolanidade é dada pela média de resistência à compressão, em MPa, dos três exemplares, sendo que a norma ABNT NBR 12653 :2014 exige valores iguais ou superiores a 6,0 MPa aos 7 dias. Segundo POUHEY (2006), a maioria dos pesquisadores não utiliza este ensaio devido à variação na qualidade da cal e seu reflexo sobre os resultados obtidos neste ensaio.

Para a determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, de acordo com a ABNT NBR 5752:2014, são comparadas as resistências à compressão de argamassas com e sem adição de material pozzolânico. São preparadas duas argamassas, sendo a argamassa “A” constituída de cimento CP II F 32, areia normal e água, e a argamassa “B”, na qual é substituído 25% em massa do cimento por material pozzolânico, e os outros materiais na mesma proporção. Quanto à

consistência, esta norma estabelece que o ensaio seja realizado conforme norma ABNT NBR 7215:2019 para a argamassa “A”, e que seja utilizado um aditivo superplastificante para que o índice de consistência da argamassa “B” permaneça no limite de ± 10 mm.

A ABNT NBR 12653:2014 estabelece que a argamassa apresente um IAP $\geq 90\%$ para que o material possa ser considerado pozolânico.

3.3.3.2 Análises Térmicas

Técnicas de análises térmicas (TG, DTG e DTA) têm sido utilizadas ao longo dos anos por diversos pesquisadores para analisar pastas de cimentos hidratadas (HANSEN, 2016). Por meio destas técnicas, principalmente dos dados TG e DTG, é possível quantificar a perda de massa de desidratação e a água combinada dos produtos hidratados. Um dos parâmetros mais importantes da avaliação é a água liberada no processo de desidroxilação do Ca(OH)_2 , a partir do qual é normalmente avaliado o grau de hidratação do cimento (DWECK *et al.*, 2000).

As análises térmicas são utilizadas para avaliar materiais à base de cimento que contém adições, incluindo as adições pozolânicas. A atividade é medida a partir do consumo de Ca(OH)_2 , caracterizando como sendo pelo menor teor de hidróxido de cálcio presente na amostra após a reação pozolânica.

Nestas análises as mudanças de massas podem ser originadas de transformações físicas ou químicas, nas quais a curva TG, que relaciona a massa com a temperatura ou o tempo, apresenta dados relativos à estabilidade térmica, velocidade de reação e composição da amostra. O registro da curva termogravimétrica derivada (DTG) é utilizada para a resolução de curvas complexas de TG. Com a DTG é possível obter um resultado mais bem detalhado do comportamento da amostra. A DTG indica com precisão a temperatura em que a velocidade de perda de massa é máxima (DAL MOLIN, 2010).

As perdas de massas dos silicatos, sulfoaluminatos e aluminatos são sequenciais sendo unicamente diferenciadas pela curva DTG que é traçada juntamente com a curva TG. Os eventos térmicos que ocorrem passam a ser indicados por picos em faixas características de temperatura, com respectiva perda de massa (CINCOTTO, 2011).

A água quimicamente combinada é aquela que integra parte da microestrutura de vários produtos de hidratação do cimento, que não se perde durante o processo de secagem, somente é liberada na decomposição por aquecimento dos produtos de hidratação (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Com resultados das análises termogravimétricas, Gonçalves (2005) conclui que a análise térmica se apresenta como uma técnica adequada para avaliar o teor de água quimicamente combinada dos hidratos das pastas de cimento contendo resíduos de cerâmica vermelha (RCV). Afirma o autor que o aumento da substituição do teor de cimento pelo RCV promoveu a redução no teor de água quimicamente combinada relativa ao hidróxido de cálcio. O teor de 10% de substituição do cimento pelo RVC foi o que apresentou o melhor desempenho com relação a maior quantidade de hidratos formados.

3.3.3.3 Condutividade Elétrica

Com o aumento da utilização de materiais pozolânicos em matrizes cimentícias, houve um grande interesse por um método rápido e eficiente para avaliar a reatividade de possíveis materiais pozolânicos. Visando atender esta necessidade, Lúxan *et al.* (1989), propuseram um método para a avaliação da atividade pozolânica baseada na mensuração da condutividade elétrica (HANSEN, 2016).

Com a adição de materiais pozolânicos a condutividade elétrica decresce em função da menor quantidade de íons Ca^{+2} e $(\text{OH})^-$ livres na solução. Desta forma, a atividade pozolânica pode ser determinada através da diferença entre a condutividade elétrica antes e depois da adição do material em estudo na solução. Cunha (2012) afirma que quando maior for a diferença da condutividade, maior será a reatividade do material.

Pouey (2006) afirma que os ensaios de índice de atividade pozolânica servem como medida de quanto se pode substituir o cimento por pozolana para a fabricação de cimentos com adição. O autor propõe o emprego do método de condutividade elétrica para uma avaliação mais adequada da pozolanicidade, pois mede a atividade química. A atividade pozolânica é definida medindo-se a variação da condutividade iônica de uma solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. É feita a medição da condutividade iônica antes e após 2 minutos da adição e mistura continuada de 5 gramas de pozolana em 200ml da solução. Nesse procedimento, mede-se a capacidade da sílica da pozolana entrar rapidamente em solução e reagir com o hidróxido de cálcio formando silicato

de cálcio hidratado, que precipita como composto insolúvel, diminuindo a concentração de íons cálcio da solução. O ensaio mede, predominantemente, o conteúdo de material com alta reatividade química da pozolana. Quanto maior a diferença de condutividade iônica da solução após a mistura de Ca(OH)_2 , maior a reatividade do material. A Tabela 3-17 traz a classificação proposta pelo autor.

Tabela 3-17 – Classificação dos materiais pozolânicos quanto à condutividade

POZOLANICIDADE DO MATERIAL	CONDUTIVIDADE (miliSiemens-mSi)
Não Pozolânico	< 0,4
Pozolanidade Variável	04 a 1,2
Boa pozolanidade	> 1,2

Fonte: SANTOS (2006)

3.3.3.4 Chapelle modificado

Um outro método para determinação da atividade pozolânica é o método Chapelle Modificado/IPT. Neste ensaio, de acordo com SANTOS (2006), a pozolanidade de um material é determinada pela quantidade de cal fixada pela pozolana, por meio da comparação de uma mistura de pozolana com óxido de cálcio, e outra sem pozolana. As misturas são mantidas à ebulição (90°C), durante 16 horas, em equipamento padronizado para o ensaio e, em seguida, determinada quantidade de óxido de cálcio que não reagiu. O resultado é expresso em mg de óxido de cálcio por grama e, quanto maior consumo de óxido de cálcio, maior a pozolanidade do material.

Os materiais podem ser considerados pozolânicos quando no ensaio Chapelle Modificado, o consumo de CaO for superior a 330 mg CaO/g de pozolana, por estequiometria, valor este que corresponde a 436 mg Ca(OH)_2 /grama de pozolana (GOBBI, 2014).

3.3.3.5 Método Frattini

Uma outra forma para a determinação da atividade pozolânica de um material, de acordo com SANTOS (2006), é o Método de Frattini, que é um método químico, adotado pela NBR 5753:2016. Segundo este Método, a atividade pozolânica de um determinado material é avaliada por meio da comparação da quantidade de hidróxido

de cálcio (em milimol CaO/l) presente na fase líquida em contato com o cimento hidratado de uma solução de cimento e água destilada, com a quantidade de hidróxido de cálcio capaz de saturar um meio de mesma alcalinidade. Traça-se uma curva de saturação do hidróxido, em função da alcalinidade. Para um cimento pozolânico, a quantidade de hidróxido de cálcio, em função da alcalinidade, deve estar sempre abaixo da curva. Para a avaliação de pozolanas, são feitas misturas em diferentes proporções de cimento e pozolana, analisando-se os resultados de forma semelhante ao que foi descrito anteriormente, avaliando se as misturas estudadas se comportam como cimento pozolânico (SANTOS, 2006).

3.4 REOLOGIA

Reologia foi o termo denominado pela primeira vez em 1929 pelo pesquisador Bingham, quando definiu a reologia como sendo o estudo da deformação e do fluxo dos materiais. Porém, o estudo da reologia precede a designação do nome, sendo que no século XVII, Hooke e Newton já tinham conhecimento da reologia (TANNER, 2000). Segundo este autor, reologia (rheos = fluir e logos = estudo) é a ciência que estuda o escoamento e a deformação dos materiais quando submetidos a uma tensão ou solicitação mecânica externa, sendo frequentemente empregada na análise do comportamento de fluidos. A Reologia estuda as correlações entre solicitações e respostas que a matéria apresenta em seus estados sólido, líquido, gasoso e, ainda, em estados intermediários. As solicitações podem ser chamadas de tensão e as respostas de taxas de deformação ou vice-versa (BARBOSA et al., 2011).

3.4.1 Conceitos

Alguns conceitos devem ser devidamente fundamentados para uma correta compreensão de técnicas e metodologias reológicas.

3.4.1.1 Viscosidade

A resistência de um material à deformação contínua é denominada viscosidade e pode ser considerada a principal propriedade reológica de um fluido (OLIVEIRA, 2013).

A viscosidade é definida como sendo o fator de proporcionalidade entre a força de cisalhamento e o gradiente de velocidade do fluido (FERRARIS, 1996). Bretas e D'Ávila (2005) define como sendo a propriedade que mede a resistência do material

ao escoamento ou fluxo. Assim, quanto maior a viscosidade do material, maior será sua resistência ao escoamento. Do ponto de vista físico, a viscosidade é uma medida de resistência ao escoamento, podendo ser compreendida como o atrito interno do sistema (BETIOLI, 2007). O termo viscosidade pode ser usado qualitativamente para se referir à propriedade do material em resistir ao escoamento. Quando o termo é usado quantitativamente, ele é definido como sendo a razão entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, quando esta for constante. Desta forma, esse termo é aplicado somente a fluidos newtonianos, onde a curva de escoamento é linear, o seu uso para outros materiais está incorreto (CASTRO, 2007).

Para os fluidos não-newtonianos, para os quais a curva de escoamento é não linear, a viscosidade pode variar em muitas ordens de magnitude com a mudança da taxa de deformação ou da tensão de cisalhamento para as diversas classes de fluidos (CASTRO, 2007). Assim, para estes fluidos, a viscosidade deixa de ser uma constante e passa a ser denominada de viscosidade aparente. A viscosidade aparente é obtida a partir da inclinação de uma reta ligando um ponto particular da curva de escoamento com a origem.

A velocidade de deformação de um corpo, é a definição adotada para a viscosidade, segundo RAGO e CINCOTTO (1999). Nos concretos e argamassas, a viscosidade está ligada à pasta de cimento e, conseqüentemente, ao teor de água, à origem mineralógica, dimensão e forma dos agregados e ao efeito lubrificante das partículas finas. A relação entre viscosidade e consistência é direta: quanto maior a viscosidade, maior a consistência.

Quando um fluido sofre uma deformação ocorre uma interação interna entre as partículas (meios contínuos), mas sabe-se que há diferentes comportamentos para essa interação em diferentes tipos de fluidos. Tomando-se como exemplo básico dois fluidos diferentes escoando num plano inclinado sob as mesmas condições, o tempo de queda provavelmente será diferente para os mesmos, dependendo da resistência interna da interação das partículas. Essa maior ou menor resistência interna das partículas está diretamente ligada à noção de viscosidade. Outra definição clássica para a viscosidade é a relação da variação da tensão de cisalhamento pela variação da taxa de deformação, a qual se mantém constante, em um fluido Newtoniano (REIS, 2008).

O corpo viscoso mais conhecido é o fluido Newtoniano, para o qual a viscosidade é independente do cisalhamento. Assim, fornecendo a condição de

escoamento laminar, a constante de viscosidade é suficiente para caracterizar completamente as propriedades ao escoamento desse fluido (sob temperatura constante) e a determinação de um único par tensão de cisalhamento/taxa de cisalhamento é o suficiente para a determinação da viscosidade do fluido (TATTERSALL; BANFILL, 1983). Já no caso dos fluidos não-Newtonianos, com a mudança da taxa de cisalhamento ou da tensão de cisalhamento para as diversas classes de fluidos pode variar a viscosidade em muitas ordens de magnitude.

Alguns autores dividem a viscosidade em viscosidade diferencial, e viscosidade aparente. O termo “viscosidade aparente” é aplicado às curvas “tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento” não-lineares, que é obtida a partir da inclinação de uma reta ligando um ponto particular da curva com a origem, enquanto que por “viscosidade diferencial” se compreende à inclinação de um dado ponto da curva tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento. A viscosidade pode depender de seis parâmetros independentes. São eles: a natureza físico-química do fluido; a temperatura do fluido; a pressão, a taxa de cisalhamento, o tempo, e o campo elétrico. Ao se definir a viscosidade em função de um desses parâmetros, os outros cinco devem ser mantidos constantes e bem definidos (REIS, 2008).

3.4.1.2 Tensão de Escoamento

Alguns materiais quando submetidos a uma tensão de cisalhamento não apresentam escoamento; para estes materiais começarem a fluir uma determinada tensão deve ser atingida, sendo essa tensão chamada de “tensão de escoamento” ou “tensão crítica”. (OLIVEIRA, 2008).

Quando um fluido está em movimento, vários tipos de forças atuam sobre ele. Essas forças surgem devido ao seu movimento, à ação da gravidade, aos gradientes de pressão e às interações entre as moléculas do fluido (BRETAS; D'ÁVILA, 2000), definindo um material homogêneo e isotrópico.

3.4.1.3 Modelos Reológicos

Reologicamente um material é caracterizado de acordo com a relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação (BRETAS; D'ÁVILA, 2005). Segundo esse comportamento reológico, os fluidos são classificados em Newtonianos e Não-Newtonianos,

Conforme abordagem anterior, existe uma relação constante entre a tensão de cisalhamento e taxa de deformação para os fluídos newtonianos, ou seja, a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de deformação. Assim, para um fluido newtoniano, uma determinação experimental simples, isto é, um ensaio que mede apenas um dos parâmetros reológicos é suficiente para a caracterização do seu comportamento ao escoamento (TATTERSALL; BANFILL, 1983 apud CASTRO, 2007, p41).

Os fluidos não-newtonianos apresentam uma relação não linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, isto é, a viscosidade não é constante sob uma dada temperatura e pressão. Assim, a curva de escoamento de um fluido não-newtoniano não corresponde a uma linha reta passando através da origem e suas propriedades do escoamento não podem ser caracterizadas por uma única constante (TATTERSALL; BANFIL, 1983 apud CASTRO, 2007 p42).

Os fluidos não-newtonianos são divididos em três grupos:

- a) fluidos independentes do tempo;
- b) fluidos dependentes do tempo;
- c) fluidos viscoelásticos.

Os fluídos independentes do tempo são caracterizados por não apresentarem variações temporais de viscosidade sob tensões ou taxas de cisalhamento constantes. Podem ser subdivididos em fluidos pseudoplásticos, fluidos dilatantes e fluidos binghamianos ou plásticos (OLIVEIRA, 2008).

Os fluidos pseudoplásticos são aqueles em que a viscosidade aparente do fluido decresce com o aumento da taxa de deformação. Estes podem apresentar ou não tensão de escoamento.

Os fluidos dilatantes apresentam comportamento inverso ao fenômeno da pseudoplasticidade, ou seja, a viscosidade aparente do fluido aumenta com o aumento da taxa de deformação.

Fluidos binghamianos ou plásticos comportam-se como um sólido em condições estáticas ou de repouso e após aplicação de certa tensão – tensão de escoamento – começam a fluir; em seguida, a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação torna-se linear.

Fluidos dependentes do tempo são caracterizados por apresentarem mudanças na viscosidade em função do tempo sob tensões ou taxas de cisalhamento constantes. Podem ser subdivididos em fluidos tixotrópicos e fluidos reopéticos.

Fluidos tixotrópicos são aqueles caracterizados pela diminuição da viscosidade aparente com o tempo enquanto são submetidos a uma taxa de cisalhamento constante. Uma importante característica dos materiais tixotrópicos é a sua sempre possível reversibilidade. A viscosidade aparente de um material diminui quando submetido a uma taxa de cisalhamento constante, contudo, tal viscosidade é recuperada se um tempo de relaxamento for oferecido ao material.

Fluidos reopéticos: são aqueles que apresentam um aumento da viscosidade aparente com o tempo a uma taxa de cisalhamento constante. Apresentam comportamento inverso dos fluidos tixotrópicos, sendo conhecidos também como fluidos anti-tixotrópicos.

Fluidos viscoelásticos caracterizam-se por apresentarem comportamento de sólido elástico e líquido viscoso ao mesmo tempo.

O concreto e a argamassa são materiais compostos, sendo seus principais componentes o cimento, a água e os agregados. O concreto pode ser entendido como uma concentração de partículas sólidas em suspensão (agregados) e um líquido viscoso (pasta de cimento). A pasta de cimento, por sua vez, não é um líquido homogêneo, sendo constituída basicamente por partículas (grãos de cimento) e um líquido (água). Posto isso, o concreto fresco, em uma escala macroscópica, flui como um líquido (FERRARIS, 1996).

O comportamento do concreto fresco depende da viscosidade da pasta de cimento e da quantidade de agregados o que justifica a importância de se estudar a reologia da pasta de cimento, da argamassa e do concreto fresco. São eles que determinarão o comportamento do concreto como um todo (REIS, 2008).

Para CASTRO (2007), a reologia dos materiais a base de cimento é importante, pois ela pode fornecer informações úteis para a dosagem dos concretos. Porém, a reologia de uma mistura deve estar correta para sua aplicação; caso contrário, o material poderá ser alterado, prejudicando o seu desempenho. Além disso, o controle da qualidade de produção desses materiais pode ser realizado simultaneamente à sua utilização, ao invés de esperar por resultados de ensaios realizados no estado endurecido.

3.4.2 Reologia da pasta de cimento

A pasta de cimento, considerada o lubrificante entre os agregados de um concreto, afeta bastante a fluidez do mesmo. Sabe-se que os fatores que compõem a pasta de cimento, tais como a relação água/cimento e a presença de aditivos, influenciam a trabalhabilidade do concreto e que uma mudança da fração volumétrica de pasta na mistura pode mudar a sua fluidez, mesmo quando a composição da pasta continua a mesma (FERRARIS; GAIDIS, 1992).

Muitos pesquisadores utilizam o estudo reológico da pasta de cimento com o objetivo de melhor compreender o comportamento reológico do concreto no estado fresco. Antes de se discutir sobre as características reológicas do concreto, Powers (1968) considera vantajoso conhecer as características reológicas da pasta de cimento, pois as características da pasta dependem de algumas reações químicas.

Para diversos autores as características reológicas da pasta de cimento no estado fresco também podem ser influenciadas por fatores como a relação água/cimento, idade da pasta, características do cimento, natureza das adições químicas e minerais incorporadas à mistura e procedimento de mistura empregado na sua produção. Além desses, o comportamento ao escoamento das pastas de cimento é influenciado pelas condições de ensaio durante as determinações (dependência do tempo e da intensidade de mistura) e pela temperatura (CLAISSE; LORIMER; AL OMARI, 2001).

Para que as pastas escoem, são necessárias forças cisalhantes com capacidade de quebrar as ligações entre os grãos de cimento, daí o surgimento de um valor de escoamento inicial (tensão de escoamento). Diversos modelos empíricos e teóricos têm sido usados para descrever o comportamento destas pastas de cimento no estado fresco. Entre os mais utilizados estão os modelos de Bingham e o de Herschel-Bulkley, que leva em consideração o comportamento pseudoplástico dessas suspensões concentradas. Se a tensão de escoamento estimada for pequena, um modelo puramente viscoso pode ser suficiente para descrever corretamente o comportamento de pastas frescas (ROUSSEL; LE ROY, 2005).

O estudo reológico da pasta de cimento é fundamental na proposta da dosagem dos componentes do concreto, em especial os aditivos químicos e as adições minerais, pois estes interagem diretamente com as características de trabalhabilidade, sejam na fase pasta, na fase argamassa e/ou no concreto fresco (ALTOE et al., 2011).

As propriedades de escoamento da pasta de cimento são semelhantes às de um fluido newtoniano ou de um fluido binghamiano, dependendo da composição da pasta (FERRARIS, OBLA e HILL, 2001). Uma pasta de cimento não floculada pode apresentar tensão de escoamento próxima à zero, isto é, um fluido newtoniano.

O papel desempenhado pelas condições experimentais na determinação dos parâmetros reológicos da pasta de cimento mostra que diferenças frequentemente grosseiras e, em alguns casos, até mesmo contraditórias, podem surgir nos resultados obtidos (ATZENI; MASSIDDA; SANNA, 1985).

3.4.3 Reologia da argamassa

Do ponto de vista do comportamento reológico, a consistência das argamassas, que diz respeito à sua maior ou menor fluidez, está associada à capacidade da mistura em resistir ao escoamento. Assim, pode-se afirmar que argamassas de consistência mais fluida representam misturas com menores valores de tensão de escoamento (CARASEK, 2010).

As argamassas são formadas potencialmente pela composição, em proporções adequadas, de materiais como agregados, cimentos e água. Na maioria das aplicações pode-se assumir que estas composições são suspensões concentradas de partículas sólidas (agregados) em um líquido viscoso (pasta de cimento). Ferraris (2009) afirma que a pasta de cimento não é homogênea e sim composto de partículas em um líquido, no caso a água. Desta forma pode-se assumir que tais concentrações escoam como um fluido, sendo válida toda a teoria clássica que envolve o escoamento de fluidos. Se uma força de cisalhamento é aplicada em um fluido, um gradiente de velocidade é induzido neste fluido, ou seja, uma taxa de cisalhamento. Este gradiente é a viscosidade, segundo o autor.

Para Rago (1999), as argamassas podem ser consideradas como uma dispersão de agregados em uma matriz de partículas finas - pasta de aglomerante. Dessa forma, o seu comportamento reológico está intimamente ligado às características do agregado (dimensão, forma e distribuição granulométrica), à pasta (características químicas, físicas e quantidades dos materiais constituintes e teor de água) e a interação pasta-agregado.

Segundo ainda este autor, quando se estuda a reologia da argamassa a principal propriedade relacionada a ela é a trabalhabilidade. A trabalhabilidade é uma

das propriedades mais importantes das argamassas no estado fresco, sendo ela composta de pelo menos dois componentes principais: fluidez, que descreve a facilidade de mobilidade; e a coesão, que descreve a resistência à exsudação e à segregação (BARBOSA et al., 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

O comportamento das argamassas no estado fluido tem sido tradicionalmente definido pelo conceito de trabalhabilidade. Contudo, uma vez que esses materiais exibem comportamentos reológicos de fluido não-Newtoniano, o desenvolvimento de uma metodologia sistemática para a formulação de argamassas baseada em conceitos micro estruturais / reológicos requer que a definição de trabalhabilidade seja convertida em grandezas reológicas mensuráveis (PILEGGI et al, 2006).

Estes autores afirmam ainda que trabalhabilidade de uma argamassa ou concreto pode ser definida como uma propriedade no estado fresco que determina a facilidade com que estes podem ser misturados, aplicados, consolidados e acabados a uma condição homogênea. Alguns autores incluem ainda a resistência à segregação das fases do sistema. Trata-se de um conceito de certa forma relativo, pois depende não somente das propriedades do material, mas também da forma de aplicação e do método de avaliação. Assim, testes reológicos para argamassas podem ser classificados como estáticos, onde se baseia apenas no fluxo do material sobre o peso próprio, e dinâmicos, onde a energia é fornecida ao material através de ações como vibração, impacto ou cisalhamento.

Dentre os testes de caracterização reológica para argamassa, dois são de especial interesse para o desenvolvimento desta pesquisa:

- a) teste de fluxo confinado, onde o material flui sob seu peso próprio ou sob ação de pressão aplicada;
- b) teste de fluxo vibratório, onde o material flui sob a influência de uma vibração.

Como teste de fluxo confinado, tem-se o *squeeze flow*. Trata-se de uma técnica de amplo emprego para a caracterização de pastas de cimento, verificando as alterações reológicas decorrentes da consolidação do ligante, mas que na caracterização de argamassas, ainda é inovadora (PILEGGI et al, 2006). Baseia-se na medida do esforço necessário para a compressão uniaxial de uma amostra cilíndrica do material entre duas placas paralelas, e pode ser realizado em equipamento tipo máquina universal de ensaios. Procedimentos do *squeeze flow*, tais

como compressão simples controlada por deslocamento, oscilação, compressão por força controlada e aplicação de patamares de relaxação, permitem a determinação de diversos parâmetros reológicos e também para simulações práticas.

Segundo Cardoso et al (2005), o ensaio de *squeeze-flow* com controle por deslocamento, expresso na forma de carga *versus* deslocamento, apresenta, apresenta três regiões bem definidas: 1) inicialmente, em pequenas deformações, o material comporta-se como um sólido, apresentando deformação elástica linear; 2) na etapa seguinte, em deslocamentos intermediários, a compressão resulta em deformação radial e de cisalhamento, superando as forças que mantinham o material sob comportamento elástico e/ou viscoso, dependendo de suas características; 3) nesta última etapa, onde o material é submetido a grandes deformações, pode ocorrer um aumento expressivo da carga necessária para o deslocamento do mesmo. A aproximação das partículas e de outros constituintes de um sistema submetido a grandes deformações, gera forças restritivas ao fluxo devido à maior interação das unidades móveis.

O teste de fluxo vibratório utilizando a Mesa de Consistência (*flow table*), consiste em medir o espalhamento horizontal de uma argamassa moldada na forma de um cone padrão, onde o material é submetido a sucessivos impactos de queda da mesa após a retirada do cone. O teste pode apresentar algumas variações principalmente mudando o número e frequência dos impactos de queda. É um teste dinâmico, onde é também considerada a viscosidade do sistema, e não só a tensão de escoamento. Além disso, é possível avaliar qualitativamente a segregação de fases no sistema, no entanto, os resultados obtidos não dissociam a contribuição de cada um dos parâmetros reológicos (viscosidade e tensão de escoamento), e são apresentados quantitativamente na forma de índice de consistência, ou porcentagem de espalhamento e não em termos de unidades reológicas fundamentais (Cardoso et al, 2005).

3.4.4 Reologia do concreto

O concreto, em seu estado fresco, é compreendido como um material composto, sendo uma concentração de partículas sólidas em suspensão (agregados) em um líquido viscoso (pasta de cimento). Esta pasta, por sua vez, não se configura uma como um líquido homogêneo, sendo composto por partículas (grãos de cimento) e água (FERRARIS, 1999). Desta forma, considerando o concreto fresco um líquido,

para compreender seu comportamento nada mais adequado do que buscar os conceitos da reologia, ciência voltada para o estudo da deformação e do escoamento de um fluido, sob a influência de tensões.

A adequação do comportamento do concreto em seu estado fresco às demandas de aplicação, tem sido tradicionalmente, por meio do subjetivo conceito de trabalhabilidade, que pode ser sintetizado, segundo Romano, Cardoso e Pileggi, (2011), como:

- a) facilidade com a qual o material pode ser misturado, lançado e adensado devida à sua consistência, além da homogeneidade do concreto e do grau de resistência à separação de materiais – *Association of Concrete Engineers* – Japão;
- b) facilidade e homogeneidade do material na mistura, lançamento, adensamento e acabamento – *American Concrete Institute* – ACI;
- c) Propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma quantidade de concreto fresco com uma perda mínima de homogeneidade – *American Society for Testing and Materials* – ASTM;
- d) facilidade de manipulação e adensamento do material – *British Standards Institution*.

Afirmam ainda estes autores, que os conceitos de trabalhabilidade e consistência surgem da necessidade de que sejam explicitadas as características desejáveis dos concretos durante as etapas de transporte, lançamento, consolidação e acabamento. Desta maneira, a consistência tem a ver com a facilidade de escoamento do material e com sua coesão, enquanto a trabalhabilidade está relacionada com a adequação do concreto com todas as etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento. Contudo, o desenvolvimento de uma metodologia sistemática para a formulação e controle tecnológico de concretos requer que tais conceitos sejam convertidos em grandezas reológicas mensuráveis. Então, é condição fundamental o uso de técnicas de caracterização que quantifiquem os parâmetros reológicos dos materiais nas diferentes solicitações físicas impostas pelos processos de aplicação.

O estudo do comportamento reológico direto do concreto não é difícil apenas devido à escala envolvida (necessidade de grande quantidade de material), mas, também, porque dispositivos de leitura para tais operações em grande escala nem sempre são muito sofisticados – o equipamento usado para ensaios em campo deve

ser relativamente barato, de fácil utilização e suficientemente pequeno – e a falta de reprodução das matérias-primas (principalmente dos agregados) acarreta uma grande dispersão dos resultados. Ressalta-se ainda que a dificuldade em desenvolver ensaios e equipamentos capazes de caracterizar reologicamente um concreto, está relacionada ao agregado graúdo que compõe a mistura, pois as distâncias mínimas exigidas entre as superfícies de cisalhamento devem ser iguais a 2 ou 3 vezes a dimensão máxima característica do agregado (FERRARIS; GAIDIS, 1992).

A verificação das propriedades reológicas do concreto no estado fresco é essencial para determinar a qualidade do material, pois seu desempenho, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, é influenciado pelas características apresentadas logo após a mistura dos componentes (SANTOS, 2012).

As propriedades reológicas do concreto são importantes, principalmente no período em que o material é lançado nas fôrmas, e podem ser determinadas em qualquer momento durante o período de hidratação do cimento (CASTRO, 2007).

A reologia do concreto no estado fresco é muito complexa devido à sua composição e às mudanças das propriedades com tempo. Muitos pesquisadores já descreveram o concreto fresco como um material não-newtoniano complexo que possui uma tensão de escoamento e uma viscosidade dependente da taxa de cisalhamento, sendo que ambos mudam com o tempo: a tensão de escoamento e a viscosidade aumentam à medida que o concreto endurece (PETROU *et al.*, 2000).

Em razão de uma vasta evidência experimental das propriedades reológicas do concreto fresco, segundo Castro (2007), pode-se concluir que o concreto se comporta como um fluido binghamiano. Assim, o material deve ser avaliado em termos de dois parâmetros: tensão de escoamento e viscosidade plástica. O primeiro parâmetro reológico está relacionado com o abatimento ou espalhamento do concreto, enquanto o segundo faz a diferença entre um concreto facilmente trabalhável e um tendo um comportamento “pegajoso”, difícil de ser bombeado e apresentando vazios na superfície quando a fôrma for retirada (DE LARRARD; SEDRAN, 2002).

A reologia do concreto fresco, nos últimos anos, tem sido estudada com determinações que variam entre métodos de ensaio simples e práticos, como os ensaios de abatimento de tronco de cone, espalhamento, funil V e caixa L, até equipamentos mais sofisticados, como os reômetros (CHIDIAC *et al.* 2000). Apesar das muitas pesquisas que estão sendo realizadas para definir as propriedades de

escoamento do concreto fresco, os métodos de ensaio existentes ainda não determinam propriedades reológicas semelhantes para um mesmo concreto, pois existem diferenças nas técnicas experimentais e nos equipamentos utilizados.

Os métodos de ensaio normalizados, ou mesmo os métodos empíricos, tentam caracterizar o concreto fresco por uma constante única, de modo que todos eles consideram que o concreto se comporta da maneira mais simples possível, como a água (fluido newtoniano). Porém, essa suposição não pode ser verídica já que o concreto exige a imposição de uma tensão mínima para que ele inicie seu escoamento (CASTRO, 2007).

As técnicas de caracterização reológicas têm como princípio básico submeter os fluidos a esforços e deformações controladas. Na área dos concretos, os inúmeros métodos descritos em literatura são classificados, segundo a NIST – *National Institute os Standars and Technology* (USA) – em quatro categorias de acordo com o procedimento de medida de fluxo ou cisalhamento: 1) Testes de Fluxo Livre: o material flui devido ao seu peso próprio sem nenhum confinamento ou o objeto penetra um material em decorrência da força gravitacional; 2) Testes de Fluxo Confinado: o material flui devido ao seu peso próprio ou sob a aplicação de pressão através de um orifício restrito; 3) Testes de Vibração: um material flui sob a aplicação de vibração; 4) Testes de Cisalhamento sob Fluxo Rotacional: o material é cisalhado pr um sistema placa-placa, por rotação (ROMANO; CARDOSO ; PILEGGI, 2011).

Os principais métodos de caracterização reológica segundo a classificação do NIST estão descritos na Tabela 3-18, identificando os parâmetros reológicos fundamentais cm o qual o ensaio está relacionado. A tabela apresenta ainda uma segunda forma de classificação destes métodos baseada na quantidade de taxa de cisalhamento avaliadas durante os ensaios (monoponto e multiponto).

Tabela 3-18 – Principais métodos para a caracterização reológica do concreto fresco

Classificação NIST	Ensaio	Principal parâmetro mensurado	Tipo de medida
Fluxo Livre	Abatimento de tronco de cone	Tensão de escoamento	Monoponto
	Abatimento modificado	Tensão de escoamento/viscosidade	
Fluxo Confinado	V-Funnel Test Orimet Test	Viscosidade	
	Habilidade de enchimento	Viscosidade	
Vibração	Remoldagem de Powers	Viscosidade	Multiponto
Reômetro Rotacional	Reômetros	Tensão de escoamento/viscosidade	

Fonte: KOEHLER & FOWLER (2003) *apud* ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, (2011)

Em função da complexa composição do concreto e da dificuldade de estabelecer um método para prever o escoamento do material a partir dos seus componentes, também a determinação dos parâmetros reológicos não é facilmente executada devido à ampla variação de tamanho das partículas encontradas na mistura. Assim, a determinação do escoamento do concreto é normalmente avaliada usando-se um dos vários ensaios padrões disponíveis, nos quais as propriedades de escoamento intrínsecas do material são medidas parcialmente (CASTRO, 2007).

3.4.5 Reologia do CAA

O CAA tem suas características fortemente influenciadas por suas propriedades reológicas: a tensão de escoamento (τ_0) e a viscosidade plástica (η). A tensão de escoamento consiste na tensão de cisalhamento mínima necessária para que o escoamento se inicie, e está relacionada ao estado de floculação ou dispersão das partículas. A viscosidade, por sua vez, representa o declive da reta no gráfico de tensão de cisalhamento por taxa de cisalhamento, sendo um indicativo da estabilidade da mistura (BANFILL, 1994). Segundo este autor, o comportamento reológico do concreto tem sido adequadamente descrito pelo modelo de Bingham, definido pela equação 3.17.

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (3.17)$$

Onde τ é a tensão de cisalhamento e $\dot{\gamma}$ correspondente à taxa de cisalhamento.

Os comportamentos reológicos de diferentes tipos de fluídos podem ser observados na figura 3-18. Nota-se que os fluídos Newtonianos, que seguem a Lei de Newton, são caracterizados por uma tensão de escoamento nula, enquanto os fluídos de Bingham a curva intercepta o eixo no ponto referente à tensão de cisalhamento

Figura 3-18: comportamento reológico de diferentes fluídos

Fonte: BANFILL (1994)

Para CAA a tensão de escoamento deve ser baixa, garantindo o aumento da fluidez, e a viscosidade deve ser moderada, para promover a estabilidade necessária. Tais parâmetros são diferentes daqueles definidos para os concretos convencionais, os quais exigem tensão de escoamento muito mais altas e viscosidades mais baixas (GOMES, 2002).

As propriedades reológicas de diversos tipos de concreto estão ilustradas na figura 3-19.

Figura 3-19: comportamento reológico do concreto

Fonte: NUNES (2001)

Nota-se que o CAA está situado na região de baixa tensão de escoamento e alta viscosidade plástica, enquanto o concreto fluido (τ_0) é um pouco maior e (η) é menor, condição que se acentua no caso do concreto convencional.

O melhor modelo que descreve o comportamento do concreto ao longo de sua fase no estado fresco, segundos estudos, é o de Bingham (TATTERSALL, 1991; FERRARIS, 1999; WALLEVIK, 2006). Quanto às argamassas, Banfill (1994) afirma que o modelo de Bingham é suficiente para descrever o comportamento reológico e identificar os parâmetros de tensão de escoamento e viscosidade plástica.

Para o CAA, o modelo que vem sendo usado com maior frequência e considerado o mais adequado para descrevê-lo quanto ao seu comportamento reológico, é o modelo de Herschel – Bulkley (JIN, 2002; WALLEVIK, WALLEVIK, 2011). Uma das razões para uso desse modelo, deve-se principalmente o fato dos valores de tensão de escoamento dificilmente serem negativos, ao contrário, quando se aplica o modelo de Bingham (WALLEVIK; WALLEVIK, 2011). Por outro lado, Lu et

al. (2008) ressaltam que o modelo de Herschel – Bulkley não é capaz de identificar os efeitos dos materiais e de diferentes misturas sobre o comportamento reológico do concreto.

O modelo de Herschel – Bulkley representa um fluido pseudoplástico com tensão de escoamento (PANDOLFELLI *et al.*, 2000). Os fluidos pseudoplásticos, são descritos por meio da equação da Lei das Potências, apresentada na Tabela 3-19.

Tabela 3-19: Equações de modelos reológicos

Modelo	Equação
Bingham	$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}$
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^\eta$
Lei das Potencias	$\tau = A\dot{\gamma}^\eta$
Vom Berg Oswald-de-Waele	$\tau = \tau_0 + B\sin^{-1}(\dot{\gamma}C)$
Eyring	$\tau = a\dot{\gamma} + B\sin^{-1}(\dot{\gamma}C)$
Robertson-Stiff	$\tau = a(\dot{\gamma} + C)b$
Atzeni <i>et al.</i>	$\dot{\gamma} = \alpha\tau^2 + \beta\tau + \delta$
Modelo	Equação
Definição das variáveis:	τ = tensão de cisalhamento τ_0 = tensão de escoamento $A, a, B, b, C, K, \alpha, \beta, \delta$ = constantes $\dot{\gamma}$ = taxa de cisalhamento η = viscosidade

Fonte: Ferraris (1999)

São fluidos que apresentam um comportamento linear com a aplicação da força. Quando o expoente dessa equação é $n < 1$, estes fluidos apresentam um comportamento fluidificante sob ação de uma ação cisalhante. Quando $n > 1$, apresentam um comportamento dilatante ou espessante perante uma ação cisalhante. Em ambos os casos, trata-se de um comportamento não linear, onde a viscosidade não é uma constante (BANFILL, 1994). Nesse contexto, nota-se na Tabela 3-19, que a equação do modelo de Herschel – Bulkley possui o termo da equação da Lei das Potências, mais o termo referente a tensão de escoamento.

Dentre as equações apresentadas na Tabela 3-20, cabe destacar as equações de Bingham e de Herschel-Bulkley que descrevem comportamento de fluidos não-Newtoniano independentes do tempo, as quais são consideradas por vários pesquisadores as mais adequadas para descreverem o comportamento reológico dos materiais cimentícios (WALLEVIK, 2006). Fluidos independentes do tempo são caracterizados pela necessidade da aplicação de uma tensão mínima (tensão de escoamento) para promover seu escoamento, bem como a taxa de cisalhamento em

qualquer ponto do fluido é função somente da tensão de cisalhamento PANDOLFELLI *et al.*, 2000).

O CAA é composto por uma gama de materiais e, por isso, considerado um material complexo. Diferentes proporções desses materiais refletem nas características de autoadensabilidade e de reologia no estado fresco do concreto (SIEDLARZ, GOLASZEWSKI, 2016).

Para diferentes diâmetros de agregado miúdo numa proporção de 10% a 20% com relação ao volume da argamassa, Lu *et al.* (2008) constataram que os valores dos parâmetros reológicos fundamentais (tensão de escoamento e viscosidade plástica) da argamassa não se diferem de forma significativa. No entanto, esses agregados numa proporção entre 30% e 40%, os valores de tensão de escoamento e de viscosidade plástica variam de forma bem nítida e significativa. O aumento de agregados com diâmetros menores tende em aumentar a demanda de água na mistura, devido ao aumento da área específica e, com isso, contribui para reduzir os valores dos parâmetros reológicos (METHA; MONTEIRO, 2014).

A influência de diferentes composições na mistura do material cimentício sobre as características reológicas por meio de reografia, é mostrado por Wallevik (1983), conforme está apresentado na Figura 3-20. A reografia é definida como uma impressão das variações dos parâmetros reológicos em função das propriedades dos materiais, diferentes materiais, diferentes concretos, etc. A par disso, na Figura 3-20 (a), estão apresentados somente os efeitos da adição de água, ar incorporado (ar), superplastificante (SP) e sílica ativa (SA). É importante frisar, que esses resultados são válidos para argamassa e concreto, exceto para pasta devido a sua tixotropia ser mais intensa (WALLEVIK, WALLEVIK, 2011).

Figura 3-20: Reografia dos efeitos de diferentes composições da mistura cimentícia de referência

Fonte: WALLEVIK (1983)

Ainda na Figura 3-20 é possível ainda observar, segundo os autores, que o aumento dos teores de ar (b) e de superplastificante (c) tende a reduzir a tensão de escoamento (T) da mistura, ao contrário de quando se aumenta o teor de substituição do cimento por sílica ativa (d). Quanto à viscosidade plástica (μ), nota-se que o aumento dos teores de ar (b) e de água (e) propicia a redução na viscosidade plástica, enquanto que o aumento de superplastificante não altera este parâmetro. Em particular, o efeito da sílica ativa atua de forma peculiar sobre a viscosidade plástica quando comparado com os outros efeitos. O aumento da adição de sílica ativa tende a diminuir a viscosidade plástica até certo limite, a partir daí há uma convergência tendendo a elevar a viscosidade plástica.

Verifica-se na Figura 3-21, a seguir, uma reografia que reforça e demonstra o efeito do superplastificante sobre os parâmetros reológicos da água, da pasta, da argamassa e do concreto, conforme Wallevik e Wallevik (2011).

Figura 3-21: Reografia dos efeitos do superplastificante em diferentes composições da mistura cimentícia de referência

Fonte: WALLEVIK e WALLEVIK (2011)

A proposta de reografia para CAA foi primeiramente apresentada na conferência em Kochi, Japão, em 1998. Na Figura 3-22, está apresentada a primeira proposta de reografia para concreto auto adensável pelo Wallevik (2002).

Figura 3-22: Proposta de reografia para o CAA

Fonte: WALLEVIK (2002)

Nota-se, nesta figura, que a pequena área em vermelho consta os valores dos parâmetros reológicos mais recomendados para CAA, enquanto que a área envolta da área vermelha consta os valores dos parâmetros reológicos normalmente encontrados para o CAA. Além disso, nessa proposta de reografia relaciona os parâmetros de reologia com os resultados de espalhamento do concreto.

Uma nova proposta de reografia para CAA com base na reografia apresentada na Figura 3-22, foi apresentada por Wallevik e Wallevik (2011). Na nova proposta, eles classificaram os concretos auto adensáveis levando em consideração a magnitude dos valores das propriedades reológicas. Assim, na Figura 3-23, verifica-se que a reografia está dividida em diferentes áreas e cores, sendo que, a área especificada como “HY-SCC”, se refere o CAA com alto valor de tensão de escoamento, a área nomeada como “LV-HY-SCC” se refere o CAA com baixa viscosidade plástica e alta tensão de escoamento e, a área definida como “LV-SCC”, se refere o CAA com baixa viscosidade plástica.

Figura 3-23: Nova proposta de reografia para o CAA

Fonte: WALLEVIK, e WALLEVIK (2011)

Os concretos auto adensáveis com parâmetros reológicos mais recomendados e mais usuais estão apresentados na reografia pelas áreas de cor verde e de cor azul claro (SCC), respectivamente. Além dessas áreas que representam os valores dos parâmetros reológicos dos concretos auto adensáveis, nota-se uma área em azul escuro (Easy-CC) que representa os concretos de fácil adensamento, ou seja, equivalente ao concreto bombeável.

Na Figura 3-24, está apresentada uma reografia adaptada da reografia apresentada na Figura 3-23, na qual consta os prováveis valores dos parâmetros reológicos dos CAA de diferentes países.

Figura 3-24: Reografia referente aos CAA em diferentes países

Fonte: WALLEVIK, e WALLEVIK (2011)

Verifica-se, que os Estados Unidos possuem concretos auto adensáveis na área recomendada por Wallevik, enquanto que os países Alemanha e Japão possuem concretos auto adensáveis na área classificada como mais usuais. No entanto, não consta os prováveis valores dos parâmetros reológicos dos concretos auto adensáveis no Brasil.

Os perfis reológicos, Bingham, Pseudoplástico e Dilatante, são possíveis em concretos autonivelantes, sendo o comportamento pseudoplásticos, o mais indicado para CAA que devam ser transportados por bombeamento. O perfil dilatante não é indicado para lançamento com bomba, mas tem a vantagem conceitual de minimizar eventos de segregação, pois a viscosidade da pasta se eleva quando um agregado tentar acelerar-se no sistema (ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011).

Enfim, afirmam ainda estes autores que, a complexidade associada à reologia, aumenta ainda mais no caso de suspensões reativas, como no CAA, no qual o comportamento do fluido passa ser também dependente da cinética de reação do agente de consolidação (cimento, cal, pozolanas, etc.) presentes no sistema.

4 MATERIAIS

Este trabalho se enquadra em uma linha de pesquisa de grande importância, que é a utilização de resíduos como busca por materiais alternativos, e de relevante interesse ao desenvolvimento sustentável na construção civil. Trata-se de uma forma para agregar mais valor ao resíduo de cerâmica vermelha, já estudado para empregos diversos, tais como, em camadas de pavimentos de baixo volume de tráfego (DIAS, 2004), como agregado graúdo em substituição de agregado natural na produção de concretos (FONSECA, 2006), e na substituição de agregados graúdos e miúdos na produção de concreto auto adensável (SILVA, 2012).

Além do resíduo de cerâmica vermelha, foram utilizados também neste estudo cimento CP V ARI, agregados miúdo e graúdo naturais (areia e brita), e aditivos. Estes materiais foram caracterizados e estão descritos a seguir.

4.1 CIMENTO

O cimento Portland de alta resistência inicial, CP V ARI (ABNT NBR 16697:2018), foi o cimento utilizado na produção dos concretos devido ao fato de ser o cimento utilizado no traço de referência (CAA_{REF}). Este cimento possui desempenho superior, com relação a outros tipos de cimentos de uso mais corriqueiro, devido ao alto grau de finura, ausência de adições (porém pode conter até 5% de material carbonático), de escórias e pozolanas e à alta resistência inicial e final.

O CP V ARI tem alta reatividade em baixas idades em função do grau de moagem a que é submetido. O clínquer é o mesmo utilizado para a fabricação de um cimento convencional, mas permanece no moinho por um tempo mais prolongado. O cimento continua ganhando resistência até os 28 dias, atingindo valores mais elevados que os demais, proporcionando maior rendimento ao concreto. É largamente utilizado em produção industrial de artefatos, na qual se exige deforma rápida, como é o caso de concreto protendido pré e pós-tensionado, pisos industriais e argamassa armada. Devido ao alto calor de hidratação, não é indicado para concreto massa. A ausência de pozolana não o recomenda para concretos com agregados reativos.

No estudo de caracterização foram realizados os ensaios e obtidos os resultados indicados na Tabela 4-1.

Tabela 4-1 – Ensaios e resultados de caracterização do cimento.

Ensaio	Norma	Resultados
Determinação da massa específica	ABNT nbr 16605:2017	3020 kg/m ³
Determinação da finura na peneira 75µm	ABNT NBR 11579:2013	0,8 %
Determinação da finura na peneira 44µm	ABNT NBR 12826:1993	2,2 %
Determinação da consistência normal	ABNT NBR 16606:2017	31,0
Determinação do tempo de pega	ABNT NBR16607:2017	Início = 02h20min Fim = 03h15min
Determinação da expansibilidade a quente	ABNT NBR 11582:2002	0,15 mm
Determinação da área específica	ABNT NM 76:1996	3878 m ² kg ⁻¹
Determinação da resistência à compressão	ABNT NBR 7215:2018	17,6 MPa aos 01 dias
		28,1 MPa aos 03 dias
		36,8 MPa aos 07 dias

Fonte: autor

4.2 AGREGADOS

Os agregados utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa são materiais comumente encontrados no mercado, na cidade de Uberlândia-MG. Suas identificações e procedências estão descritas na Tabela 4-2

Tabela 4-2 – Agregados.

Tipo	Identificação	Procedência
Miúdo	Areia Fina	Porto de Areia Rio da Prata, Prata-MG
	Areia Média	Porto de Areia Rio da Prata, Prata-MG
Graúdo	Pedrisco	Pedreira ECOBRIX, Uberlândia-MG
	Brita 0	Pedreira ECOBRIX Uberlândia-MG

Fonte: autor

Os agregados foram submetidos aos ensaios de caracterização mediante a realização dos seguintes ensaios:

- massa específica (ABNT NBR NM 52:2009);
- absorção de água (ABNT NBR NM 30:2001);
- massa unitária em estado solto (ABNT NM 45:2002);
- teor de materiais pulverulentos (ABNT NBR NM 46:2003);
- impurezas orgânicas (ABNT NBR NM 49:2001);
- granulometria (ABNT NBR NM 248:2003).

As amostras utilizadas para os ensaios foram obtidas mediante a aplicação da metodologia das normas ABNT NBR NM 26 (2009) e NBR NM 27 (2001).

Os resultados médios de ensaios de caracterização dos agregados miúdos estão apresentados nas Tabela 4-3.

Tabela 4-3 – Ensaio de caracterização dos agregados miúdos.

Ensaio	Resultados	
	Areia Fina	Areia Média
Massa específica (kg/m ³)	2620	2641
Absorção (%)	0,4	0,2
Massa unitária em estado solto (kg/m ³)	1314	1366
Material Pulverulento (%)	4,8	3,3
Impurezas orgânicas	isento	isento

Fonte: autor

Nas Tabela 4-4 e Tabela 4-5 estão representados os valores médios para o ensaio da composição granulométrica das areias fina e média, sendo os gráficos das curvas granulométricas demonstrados na Figura 4-1 e na Figura 4-2.

Tabela 4-4 – Composição granulométrica da areia fina.

Abertura (mm)	Areia		
	Massa Retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada
4,8	8,2	0,8	1
2,4	13,2	1,3	2
1,2	87,2	8,8	11
0,6	364,7	36,5	47
0,3	426,2	42,7	90
0,15	95,4	9,6	100
Fundo	4,3	-	-
Módulo de finura = 2,51		Dimensão Máxima = 2,4 mm	

Fonte: autor

Figura 4-1: Curva Granulométrica da areia fina

Fonte: autor

Tabela 4-5 – Composição granulométrica da areia média.

Abertura (mm)	Areia		
	Massa Retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada
4,8	28,1	2,8	3
2,4	78,5	7,9	11
1,2	308,4	30,9	42
0,6	408,9	40,9	83
0,3	143,7	14,4	97
0,15	31,6	3,2	100
Fundo		-	-
Módulo de finura = 3,36			
Dimensão Máxima = 4,8 mm			

Fonte: autor

Figura 4-2: Curva Granulométrica da areia média

Fonte: autor

Os agregados miúdos, normalmente, devem cumprir os limites de somente uma das zonas indicadas na Tabela 4-6 extraída da ABNT NBR 7211:2009.

Tabela 4-6 – Limites granulométricos de agregado miúdo.

Peneira ABNT (mm)	Porcentagem em massa retida acumulada			
	Limites Inferiores		Limites Superiores	
	Zona Utilizável	Zona Ótima	Zona Utilizável	Zona Ótima
9,5	0	0	0	0
6,3	0	0	0	7
4,8	0	0	5	10
2,4	0	10	20	25
1,2	5	20	30	50
0,6	15	35	55	70
0,3	50	65	85	95
0,15	85	90	95	100

Nota 1 – O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90

2 – O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20

3 – O módulo de finura da zona utilizável superior varia 2,90 a 3,50

Fonte: ABNT NBR 7211:(2009)

Os resultados dos ensaios de caracterização dos agregados graúdos estão apresentados nas Tabela 4-7.

Tabela 4-7 – Ensaio de caracterização dos agregados graúdos.

Ensaio	Resultados	
	Pedrisco	Brita 0
Massa específica (kg/m ³)	2784	2706
Absorção (%)	1,5	0,4
Massa unitária em estado solto (kg/m ³)	1,517	1,492
Material Pulverulento (%)	8,4	2,6

Fonte: autor

Nas Tabela 4-8 e Tabela 4-9 estão representados os valores médios para o ensaio da composição granulométrica dos agregados graúdos, sendo os gráficos das curvas granulométricas demonstrados nas Figura 4-3 e Figura 4-4, respectivamente.

Tabela 4-8 – Composição granulométrica do Pedrisco.

Abertura (mm)	Resultados		
	Massa Retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada
4,8	2,3	2,0	2
2,4	477,6	47,8	50
1,2	261,6	26,2	76
0,6	109,4	11,0	87,
0,3	8,4	0,8	88
0,15	63,9	6,4	94
Fundo	59,1	5,9	100,0
Módulo de finura = 3,97		Dimensão Máxima = 4,8 mm	

Fonte: autor

Figura 4-3: Curva Granulométrica do Pedrisco

Fonte: autor

Tabela 4-9 – Composição granulométrica da brita 0.

Abertura (mm)	Resultados		
	Massa Retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada
12,5	21,0	0,70	1
9,5	332,7	11,10	12
6,3	1329,5	44,30	56
4,8	849,1	28,30	84
2,4	396,3	13,20	98
1,2	24,0	0,80	98
0,6	15,2	0,50	99
0,3	5,4	0,20	99
0,15	5,9	0,20	99
Fundo	19,4	0,70	100
Módulo de finura = 5,89			
Dimensão Máxima = 12,5 mm			

Fonte: autor

A norma ABNT NBR NM 248:2003, apresenta os requisitos granulométricos do agregado graúdo, indicados na Tabela 4-10 (Tabela 2 da ABNT NBR 7211:2009 – Agregado para concreto, para a graduação respectiva).

Tabela 4-10 – Limites granulométricos de agregado graúdo.

Abertura da malha (mm)	Porcentagem em massa retida acumulada				
	Zona Granulométrica d/D ¹				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75	-	-	-	-	0-5
63	-	-	-	-	5-30
50	-	-	-	0-5	75-100
37,5	-	-	-	5-30	90-100
31,5	-	-	0-5	75-100	95-100
25	-	0-5	5-25 ²	87-100	-
19	-	2-15 ²	65 ² -95 ²	95-100	-
12,5	0-5	40 ² -65 ²	92-100	-	-
9,5	2-15 ²	80 ² -100	95-100	-	-
6,3	40 ² -65 ²	92-100	-	-	-
4,8	80 ² -100	95-100	-	-	-
2,4	95-100	-	-	-	-

Notas

¹ Zona granulométrica correspondente à menor (d) e maior (D) dimensões do agregado graúdo

² Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados com ². Essa variação pode também estar distribuída em vários desses limites.

Fonte: NBR 7211 (2019)

Figura 4-4: Curva Granulométrica da Brita 0

Fonte: autor

4.3 RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA – RCV

O RCV utilizado nesta pesquisa foi obtido a partir de material coletado por Dias (2004) que compôs uma amostra com 4.795 kg de cacos de telha de três indústrias cerâmicas da cidade de Monte Carmelo - MG. Os cacos de telhas já cozidos, foram retirados, amontoados e depositados nas indústrias visitadas, com o uso de máquinas carregadeiras disponíveis nos locais. O material coletado foi transportado para a cidade de Uberlândia, onde foi feita a primeira partida na central de britagem de uma empresa, no Distrito Industrial de Uberlândia, utilizando o seguinte equipamento: Rebritador Cônico - FAÇO MOD. 60S, com capacidade de produção de 8 a 26 m³/h, possuindo fechamento mínimo: para grossos (½" ou 12,5mm); para médios (3/8" ou 10mm) e para finos (¼" ou 6,3mm) e, a qual tem abertura máxima na boca de entrada: para grossos (4 ½" ou 114,3mm); para médios (3" ou 75mm) e para finos (2" ou 54,8mm). A segunda partida foi britada em outra empresa na cidade de Uberlândia, utilizando-se um britador primário de mandíbulas, que possui classificação nas peneiras de 19 mm e 9,5 mm (SILVA, 2012).

Este RCV foi então separado em duas frações, sendo uma fração graúda com dimensão máxima característica (D_{max}) de 19 mm e a outra fração miúda com dimensão máxima característica de 4,8 mm. Estes materiais estão ilustrados na Figura 4-5 e na Figura 4-6, e se encontram disponíveis em baias, totalizando

aproximadamente 2 metros cúbicos, no Laboratório de Materiais de Construção Civil, da Faculdade de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Uberlândia.

Figura 4-5: RCV D_{amx} 19mm

Fonte: autor

Figura 4-6: RCV D_{amx} 4,8mm

Fonte: autor

Com a fração de dimensão máxima característica de 19mm, produziu-se o RCV_{75μm}, ou seja, o material reduzido à dimensão máxima de 75μm, através de moagem utilizando-se um moinho de bolas, cujos valores dos ensaios de caracterização estão apresentados na Tabela

Tabela 4-11 – Ensaios e resultados de caracterização do RCV_{75μm}

Ensaio	Norma	Resultados
Determinação da massa específica	ABNT NM 16605:2017	2660 kg/m ³
Determinação da finura na peneira 75μm	ABNT NBR 11579:2013	0,5 %
Determinação da finura na peneira 44μm	ABNT NBR 12826:2014	2,5 %
Determinação da área específica	ABNT NM 16372:2015	3189 m ² kg ⁻¹

Fonte: autor

4.4 ADITIVOS

Foram utilizados dois tipos de aditivos na produção dos concretos escolhidos para a realização da pesquisa. Estes aditivos foram fornecidos pela empresa responsável pela produção do concreto de referência adotado na pesquisa.

O primeiro é um aditivo plastificante polifuncional redutor de água. Segundo a norma ABNT NBR 11768:2011, este é um aditivo que tem como finalidade permitir a redução do conteúdo de água de um concreto, sem modificar sua consistência estado fresco, ou que, possibilite modificar a consistência, sem alterar a quantidade de água, aumentando o abatimento e a fluidez, ou ainda, que produza estes dois efeitos simultaneamente. Tem a designação tipo PR/PA/PN, segunda esta norma.

Conforme especificações do fabricante, o aditivo pode ser utilizado numa ampla gama de dosificações, podendo ser aplicado em concretos dosados em centrais, convencionais ou bombeáveis, ou ainda em concretos leves. Ainda de acordo este fabricante, o aditivo proporciona benefícios no estado fresco, tais como:

- a) redução da água de amassamento;
- b) aumento da fluidez com manutenção desta por tempo prolongado;
- c) facilita o adensamento e lançamento;
- d) aumenta a coesão do concreto.

Afirma ainda o fabricante, que o aditivo também pode contribuir, no estado endurecido, para:

- a) proporcionar altas resistências iniciais e finais;
- b) melhorar aderência e textura da superfície do concreto;
- c) reduzir permeabilidade;
- d) reduzir retrações e fissuras de origem plástica;
- e) aumentar durabilidade.

O segundo aditivo é um superplastificante polifuncional com elevada redução de água que, de acordo com a norma ABNT NBR 11768:2011, modifica a consistência do concreto, permitindo uma elevada redução no conteúdo de água, ou que, sem alterar a quantidade de água, aumenta consideravelmente o abatimento e fluidez do concreto, ou ainda produz estes dois efeitos simultaneamente. Designado por SP-II R/ SP-II A/ SP-II N, de acordo com a referida norma.

Além das especificações para o primeiro aditivo, este também pode ser utilizado para pisos e paredes de concreto, pré-moldado e pré-fabricado. Também proporciona os mesmos benefícios que o primeiro aditivo, segundo o fabricante. Na tabela 4-12 estão demonstradas as principais características dos aditivos.

Tabela 4-12 – Características dos aditivos.

Aditivo	Aspecto/cor	Dosagem (%SPC)	Massa específica (g/cm³)
1º	Líquido marron escuro	0,6 – 1,0	1,110 – 1,1170
2º	Líquido alaranjado	04 – 1,2	1,065 – 1,105

Fonte: autor

Os materiais utilizados no desenvolvimento deste trabalho foram os mesmos que estavam sendo usados na produção do concreto de referência, como será exposto mais adiante, sendo o RCV_{75μm}, o único novo material a ser introduzido.

5 MÉTODOS

A metodologia adotada para o desenvolvimento desta pesquisa foi baseada na necessidade de obter o resíduo finamente moído, realizar ensaios para a verificação das características deste material quanto à sua pozolanicidade, verificar, através do parâmetro de resistência à compressão, os percentuais de utilização do resíduo em substituição do cimento, avaliar as propriedades de pastas e argamassas com diferentes percentuais de resíduo em substituição ao cimento, e a avaliação das propriedades dos concretos produzidos com os diferentes percentuais de resíduo. Esquemáticamente esta metodologia pode ser definida da seguinte sequência:

- a) obter o RCV através de moagem em moinho de bolas, tipo aparelho de abrasão “*Los Angeles*”;
- b) caracterizar o RCV com dimensão máxima característica de $75\mu\text{m}$ ($\text{RCV}_{75\mu\text{m}}$) quanto às suas características e potencial pozolânico,
- c) estabelecer o percentual adequado de substituição parcial do cimento CPV ARI pelo $\text{RCV}_{75\mu\text{m}}$,
- d) avaliar comparativamente a influência da substituição parcial do cimento pelo RCV nas propriedades da pasta e da argamassa,
- e) avaliar as características reológicas, físicas e as propriedades do CAA referência (CAA_{REF}) e do CAA de resíduo de cerâmica vermelha (CAA_{RCV}).

De acordo com este programa de necessidades, foram realizadas as etapas que estão descritas a seguir.

5.1 OBTENÇÃO DO $\text{RCV}_{75\mu\text{m}}$

Para obter o RCV na dimensão desejada utilizou-se o resíduo britado $D_{\text{max}}19\text{mm}$, material existente no Laboratório de Materiais de Construção Civil, da Faculdade de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Uberlândia, ilustrado na Figura 5-1. A partir deste material, realizou-se a moagem utilizando equipamento Aparelho de “*Los Angeles*”, tipo Moinho de Bolas, conforme ilustrado na Figura 5-2. Desta moagem resultou uma fração fina do RCV, apresentado na Figura 5-3, que foi peneirado para a obtenção do material com dimensão máxima característica de $75\mu\text{m}$, ou seja, passante na peneira ABNT 200.

A dimensão máxima característica de 75 μm foi adotada para que o resíduo tivesse a mesma dimensão máxima dos grãos do cimento e também por ser a partir desta dimensão que os grãos do resíduo começam a apresentar atividade pozolânica.

Foram testados diferentes processos para a obtenção do RCV_{75 μm} . Primeiramente, foi buscado a moagem mediante o uso de dispersores de amostra de solos, tipo hélice com lâminas. O procedimento foi descartado porque se mostrou ineficiente devido à pouca quantidade de material produzido a cada etapa, e o tempo que demandaria para produzir a quantidade de material necessário à pesquisa. Tentou-se ainda obter o material utilizando moagem com moinho de esferas cerâmicas, no Laboratório de Materiais Cerâmicos, Campus II, do Departamento de Engenharia de Materiais, da USP-SC. Neste também a pouca quantidade produzida por etapa tornava o método inadequado. A utilização do moinho de bolas com esferas de aço, Aparelho “Los Angeles” foi o procedimento que se mostrou mais adequado, onde conseguiu-se processar a quantidade de material necessária para a realização dos ensaios de caracterização e produzir os concretos.

Figura 5-1: RCV graúdo

Fonte: autor

Figura 5-2: Equipamento tipo moinho de bolas

Fonte: autor

Figura 5-3: RCV_{75 μm}

Fonte: autor

No procedimento de moagem foi adotado uma carga abrasiva de 5000 gramas, definida pelo número de esferas de aço, ou seja, 12 esferas, sendo a massa total de material cerâmico colocado no moinho, de 10000 gramas. O tempo de moagem para cada etapa foi de 30 minutos. Após a moagem o material foi submetido ao peneiramento mecânico por 15 minutos, e em seguida, o material ainda retido na peneira 200 (75 μ m), reservado para uma segunda moagem. O procedimento foi realizado até que os materiais retidos formassem uma nova amostra de 10000 gramas, quando eram submetidos à segunda moagem e o material novamente retido, descartado. Foram produzidos aproximadamente meio metro cúbico de RCV_{75 μ m}, para a realização dos ensaios de caracterização, estudos das pastas, argamassas e dos concretos.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DO RCV_{75 μ m}

Obtido o material na fração desejada - RCV_{75 μ m} - iniciou-se a investigação para verificação dos requisitos físicos para materiais pozolânicos, estabelecidos pela norma ABNT NBR 12653:2014, mediante a realização dos ensaios de determinação do teor de cálcio fixado – Método Chapelle modificado - conforme norma ABNT NBR 15895:2010, determinação do índice de atividade pozolânica com cal aos 7 dias de idade, conforme norma ABNT NBR 5751:2015, determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, conforme norma ABNT NBR 5752:2014. Foi realizado ainda o ensaio para a determinação do material retido na peneira 45 μ m, conforme norma ABNT NBR 15894-3:2010. Nas Figuras 5-4 e 5-5 estão ilustrados equipamentos utilizados no ensaio pelo Método Chapelle modificado.

Figura 5-4: Banho Maria termostatzado

Fonte: autor

Figura 5-5: Frasco Erlenmeyer

Fonte: autor

Este ensaio apresenta como resultado o teor de cálcio fixado, em miligramas de Ca(OH)_2 por grama de material, aproximado à dezena, conforme a equação 5.1 a seguir.

$$I_{\text{Ca(OH)}_2} = \frac{28(V_3 - V_2) \cdot F_c}{M_2} \times 1,32 \quad (5.1)$$

Onde $I_{\text{Ca(OH)}_2}$ é o índice de atividade pozolânica Chapelle, correspondente ao teor de cálcio fixado, em mg de Ca(OH)_2 , por grama de material, M_2 é a massa de material pozolânico em gramas, V_2 é o volume de HCl 0,1 M consumido com amostra no ensaio, em mL, V_3 é o volume de HCl 0,1 M consumido no ensaio em branco, em mL, F_c é o fator de correção do HCl para uma concentração de 0,1 M, e 1,32 a relação molecular $\text{Ca(OH)}_2/\text{CaO}$.

A determinação do índice de atividade pozolânica com cal aos 7 dias de idade, foi realizado em conformidade com a norma ABNT NBR 5751:2014. Esta norma estabelece que, o material para ser considerado pozolânico, é necessário que apresente valor de resistência à compressão, determinado conforme norma ABNT NBR 7215:2019, ≥ 6 MPa, aos 7 dias de idade, determinado pela média da resistência de três corpos de prova cilíndricos, diâmetro nominal de 50 mm.

Para a determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias de idade, segundo norma ABNT NBR 5752:2014, foram preparadas duas argamassas, sendo a argamassa A com 100% de cimento e a argamassa B com 25% de substituição parcial do cimento pelo resíduo. Moldou-se quatro corpos de prova cilíndricos de cada, para a realização do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias de idade, conforme especificação da norma ABNT NBR 7215:2019. O índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias de idade foi calculado conforme a equação 5.2.

$$I_{\text{cimento}} = \frac{F_{cB}}{F_{cA}} \times 100 \quad (5.2)$$

Onde I_{cimento} é o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, expresso em porcentagem, F_{cB} é a resistência média aos 28 dias, em megapascals, dos corpos de prova moldados com 25% de cimento – Argamassa B, e F_{cA} é a resistência média aos 28 dias, em megapascals, dos corpos de prova moldados com 100% de cimento – Argamassa A.

O ensaio para a determinação do material retido na peneira 45µm, realizado conforme norma ABNT NBR 15894-3:2010, foi adaptado para o RCV, substituindo o metacaulim, e seu resultado calculado segundo a equação 5.3.

$$F_{45\mu m} = \frac{M_f \cdot C}{M_i} \times 100 \quad (5,3)$$

Onde $F_{45\mu m}$ é a finura representada pelo teor de resíduo retido na peneira 45µm, expressa em porcentagem, M_i é a massa inicial da amostra, expressa em gramas, e M_f a massa final da amostra expressa em gramas.

A realização dos ensaios de determinação do teor de cálcio fixado pelo Método Chapelle modificado, do índice de atividade pozolânica com cal aos 7 dias de idade, do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias de idade e do material retido na peneira 45µm, tiveram como objetivo verificar a conformidade do RCV_{75µm} quanto aos requisitos estabelecidos pela norma para sua utilização como material pozolânico, nas quais são desejadas ações aglomerantes, além de outras propriedades normalmente atribuídas às adições finamente divididas.

A verificação da distribuição granulométrica do RCV_{75µm}, foi realizada mediante a utilização do equipamento Malvern, que utiliza a técnica de espalhamento de luz laser de baixo ângulo, conhecida genericamente por “espalhamento de luz”. Este método de análise de dimensão das partículas, também conhecido como difração laser, consiste na medição dos ângulos de difração do raio laser, que são relacionados ao diâmetro da partícula. A realização deste ensaio teve como objetivo verificar se o RCV_{75µm} atende ao requisito quanto à dimensão máxima.

Foram realizados ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV), no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LPU), da Faculdade de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Uberlândia. Estes ensaios tiveram como objetivo avaliar comparativamente as dimensões e forma dos grãos do RCV_{75µm}, conforme apresentado na Figura 5-6, e do cimento CP V ARI, apresentado na Figura 5-7. Utilizou-se o *software* ImageJ para processamento dos dados e imagens.

Figura 5-6: MEV cimento

Fonte: autor

Figura 5-7: MEV RCV_{75µm}

Fonte: autor

No processamento das imagens foram utilizados cálculos do diâmetro de *Feret*, que consiste em medir um objeto numa direção especificada, podendo ser definido como a distância entre dois pontos paralelos, que limitam o objeto perpendicular a esta direção. Esta medida é usada na análise do tamanho de uma partícula em que é aplicado às projeções de um objeto tridimensional sobre um plano bidimensional. Utilizou ainda o cálculo da circularidade, que faz relação das dimensões do objeto com a forma circular, onde valores tendendo a 1 indicam a forma circular, e os valores, na medida que se se aproximam de 0, indicam forma alongada. A avaliação do tamanho e forma dos grãos do resíduo, em comparação ao cimento, buscou dar subsídio para análise quanto à possível influência destes na trabalhabilidade de pastas, argamassas e concretos, investigados nesta pesquisa.

Os ensaios de MEV foram realizados utilizando-se o equipamento Microscópio Eletrônico de Varredura Hitachi TM3000, ilustrado na Figura 5-8.

Figura 5-8: Microscópio Eletrônico de Varredura

Fonte: autor

5.3 PERCENTUAL DE SUBSTITUIÇÃO

Após a avaliação do potencial pozolânico do RCV_{75µm}, iniciou-se os ensaios para a verificação do teor ideal de substituição parcial do cimento CPV ARI pelo resíduo. O parâmetro inicialmente adotado para determinar este percentual de substituição foi o da resistência à compressão da argamassa.

Os traços para a preparação das argamassas para a determinação da resistência à compressão, foram adaptados a partir das recomendações da norma ABNT NBR 5752:2014. Foram preparadas 06 argamassas com a proporção de uma parte de aglomerante, composto por cimento e RCV_{75µm}, para três partes de agregado miúdo – areia normal do IPT – em massa, sendo a relação água/cimento fixada em 0,48. As argamassas foram preparadas conforme procedimentos recomendados pela norma ABNT NBR 7215:2019, sendo primeiramente utilizados teores de substituição parcial do cimento CPV ARI pelo RCV_{75µm}, variando de 0% a 50%. As substituições foram realizadas com os percentuais relativos à massa do cimento, conforme ABNT NBR 5752:2014, cujos quantitativos dos materiais estão descritos na Tabela 5-1.

Tabela 5-1 – Quantidade em massa dos materiais

Teor de substituição (%)	Massa (g)			
	cimento	RCV _{75µm}	Areia	Água
0	312,0	-	936,0	150,0
5	296,4	13,6		
10	280,8	27,1		
20	249,6	54,3		
30	218,4	81,4		
40	187,2	108,6		
50	156,0	135,7		

Fonte: autor

Para a realização dos ensaios de determinação da resistência à compressão, foram moldados 12 corpos de prova para cada argamassa, sendo os ensaios realizados em três corpos de prova de cada, nas idades de 07, 14, 28 e 56 dias. Posteriormente foram adotados somente os teores de substituição parcial do cimento pelo RCV_{75µm} de 0%, 5%, 10%, 15% e 20%, por apresentarem mais adequados ao desenvolvimento da pesquisa.

5.4 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA PASTA

Para uma pré-avaliação das propriedades da pasta no estado fresco, foram realizados ensaios para a determinação da consistência normal, conforme ABNT NBR 16606:2017, e dos tempos de início e fim de paga, conforme ABNT NBR 16607:2017.

As pastas foram preparadas com os percentuais de 0%, e 20% de substituição parcial do cimento pelo RCV_{75μm}, para avaliação comparativa destas propriedades. Na Figura 5-9 está demonstrado o aparelho de *Vicat*, utilizado para a realização do ensaio de determinação da consistência das pastas, com teor 20% de substituição do cimento.

Figura 5-9: Ensaio de consistência mediante o emprego do aparelho de *Vicat*.

Fonte: autor

Estes ensaios possibilitaram a verificação da influência da substituição parcial do cimento CPV ARI pelo RCV_{75μm} em propriedades do estado fresco da pasta, e suas possíveis implicações no estudo do comportamento reológico do CAA_{RCV}

Na sequência foram realizados ensaios de reometria de fluxo contínuo, no Laboratório de Furnas, na cidade de Aparecida de Goiânia-GO. Foram adotados os teores de 0%, 5%, 10%, 15% e 20% de substituição. Estes ensaios visaram determinar a influência da substituição parcial do cimento pelo RCV_{75μm} na reologia das pastas. O equipamento utilizado para a realização dos ensaios foi o reômetro rotacional modelo AR G2, acoplado a um computador para a aquisição de dados, como mostra a Figura 5-10.

Figura 5-10: Reômetro de Fluxo Contínuo.

Fonte: autor

As características do equipamento estão descritas na Tabela 5-2. Utilizou-se o programa computacional *Rheology Advantage Instrument Control AR* para a aquisição de dados e controle dos parâmetros do ensaio. Foram medidos valores reológicos de torque (Γ) e velocidade angular (Ω). Com estes valores e as variáveis de ensaio de raio da geometria das placas paralelas (R) e distância entre as placas (h ou gap), foi possível, utilizando-se as equações 5.4, 5.5 e 5.6, calcular a tensão de cisalhamento (σ), a taxa de cisalhamento (γ) e a viscosidade (η).

$$\sigma = 2\Gamma/\pi R^3 \quad (5.4)$$

$$\gamma = \Omega R/h \quad (5.5)$$

$$\eta = 2\Gamma h/\pi \Omega R^4 \quad (5.6)$$

Onde σ é a tensão de cisalhamento, Γ é o torque, R é a geometria das placas, γ a taxa de cisalhamento, h é o gap, Ω a velocidade angular e η é a viscosidade.

Tabela 5-2: Características do Reômetro AR G2

Torque	0,003 μ N.m a 200 mN.m
Frequência	0,12 μ Hz a 100 Hz
Alcance de frequência	7.5 E -7 a 628 rad s ⁻¹
Deformação mínima	0,00006
Força normal	0,005 a 50 N
Resolução de deslocamento linear	25 N Rad

Fonte: Agostinho (2017)

Foi possível ainda inserir características desejadas do ensaio, como a temperatura, distância entre as placas (gap), a força normal na superfície de contato placa/amostra, a intensidade da taxa de cisalhamento aplicada, o tempo de incremento da taxa de cisalhamento (aceleração) e desaceleração, a quantidade e intervalo de leituras e a duração total do ensaio.

O procedimento para a realização dos ensaios seguiu as etapas:

- adição do pó na água, por 2 minutos à velocidade de 600rpm, e 3 minutos à velocidade de 1500 rpm;
- colocação da pasta no reômetro, 3 minutos;
- medição da tensão de cisalhamento sob taxa de cisalhamento variando de 0 a 400 s⁻¹, por 1 minuto;

- d) medição da tensão de cisalhamento sob taxa de cisalhamento variando de 400 s^{-1} a 0.

A relação água/cimento utilizado foi constante para todas as pastas, sendo o valor adotado de 0,4, levando-se em consideração a limitação do equipamento quanto à consistência mínima necessária para a realização dos ensaios.

O ensaio de fluxo contínuo se mostrou adequado às propriedades investigadas, principalmente para a viscosidade. Para a determinação da tensão de escoamento partindo de dados de fluxo rotacional, é necessário a utilização de um modelo reológico, que neste caso foi utilizado o Hershel-Bulkley. Os valores absolutos obtidos nos ensaios não foram os parâmetros principais para a avaliação, mas sim a correlação destes com o aumento dos teores de substituição do cimento pelo resíduo cerâmico.

Utilizou-se o software *TRIOS* para a interpretação e análise dos resultados. Tal recurso se deu devido à compatibilidade com computador utilizado para a realização dos ensaios e a sua simplificada interface, possibilitando gerar gráficos dos dados de ensaios obtidos e tabelas dos dados medidos.

5.5 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA ARGAMASSA

Os ensaios para a avaliação de propriedades da argamassa no estado fresco foram realizados conforme especificações da norma ABNT NBR 13276:2016, para a determinação do índice de consistência, *flow test*, e ABNT NBR 15839:2010, para a determinação do comportamento reológico da argamassa em solicitações de *squeeze-flow*.

O *flow test* é um ensaio que consiste em medir o espalhamento horizontal de uma argamassa moldada em forma de cone padrão, onde o material é submetido a sucessivos impactos após a retirada do cone. Este ensaio teve como objetivo uma avaliação quantitativa, na forma de índice de consistência da argamassa, da influência da substituição do cimento CPV ARI pelo RCV_{75µm} no espalhamento das argamassas. O ensaio está demonstrado da Figura 5-11.

Figura 5-11: ensaio de determinação da consistência (*flow test*)

Fonte: autor

O outro ensaio utilizado para avaliação do comportamento das argamassas no estado fresco, foi o *squeeze flow*. Este ensaio consiste em comprimir uma amostra cilíndrica entre duas placas paralelas, sendo interessante para a caracterização de argamassas, pois as mudanças geométricas inerentes ao ensaio, simulam condições de utilização das destes materiais em operações como espalhamento, nivelamento e acabamento. Na Figura 5-12 está ilustrada a realização do ensaio.

Figura 5-12: ensaio de *squeeze flow*

Fonte: autor

5.6 Avaliação do CAA_{REF} e do CAA_{RCV}

O concreto auto adensável de referência (CAA_{REF}) foi escolhido por ser um concreto de uso corriqueiro produzido por uma Central de Concreto na cidade de Uberlândia. Este concreto foi utilizado para a produção de mais de 12500 unidades habitacionais do Programa Minha Casa minha Vida, do Governo Federal. O material foi empregado na confecção das paredes de concreto das unidades, totalizando em média 15 m³ por unidade. A composição do CAA_{REF} fornecido pela Central Dosadora está apresentada na Tabela 5-3.

Tabela 5-3: Composição do CAA_{REF}

Dados da Composição (kg/m³)	Cimento CPV ARI	330
	Água	73
	Areia fina	95
	Areia média	132
	Pedrisco	97
	Brita 0	297
	Plastificantes 1 (polifuncional)	3,96
	Plastificantes 2 (policarboxilato)	2,6

Fonte: Autor

Os resultados de ensaios de caracterização, também fornecidos pela Central Dosadora, estão apresentados na Tabela 5-4.

Tabela 5-4: Resultados de ensaios de caracterização do CAA_{REF}

Resultados de Ensaios			
Concreto no estado Fresco	Espalhamento (mm)		650
	Ar Incorporado (%)		2,1
	Massa Específica (kg/m ³)		2347
	Temperatura (°C)		28,5
Concreto no estado endurecido	Resistência à compressão (MPa)	01 dia	15,3
		03 dias	21,0
		07 dias	24,5
	Módulo de elasticidade (GPa)	01 dia	12,7
		03 dias	20,5
		07 dias	28,1

Fonte: JUSTMIX

A opção por adotar um concreto que já estava sendo utilizado, em vez de dosar um concreto no laboratório, foi em razão da proposta do estudo de utilizar o RCV_{75µm} diretamente em substituição parcial ao cimento CP V ARI numa situação de uso rotineiro. Não se pretendeu aqui dosar um concreto com o resíduo, e sim, adequar este resíduo a uma situação de uso.

Para a produção dos concretos auto adensáveis com o resíduo de cerâmica vermelha (CAA_{RCV}), foram adotados os mesmos teores de substituição do cimento pelo RCV_{75µm} utilizados nos estudos das pastas e das argamassas, ou seja, 0%, 5%, 10%, 15% e 20%. Os percentuais superiores à 20% não foram utilizados em razão da grande perda de resistência mecânica que ficou evidenciado na realização dos ensaios com argamassas. Os ensaios escolhidos para a caracterização dos concretos no estado fresco seguiram as recomendações da norma ABNT NBR 15823-1:2017,

para fins de classificação e controle comparativo entre os concretos, visando determinar a influência das substituições parciais nas propriedades reológicas dos concretos. Os ensaios dos concretos no estado endurecido tiveram como objetivo avaliar a influência das substituições em algumas de suas propriedades mecânicas. Na Tabela 5-5 estão relacionados os ensaios e as respectivas normas.

Tabela 5-5: Ensaios para a caracterização dos concretos CAA_{REF} e CAA_{RCV}.

Condição	Parâmetro avaliado	Método de ensaio	Norma
Estado Fresco	Espalhamento	Cone de Abrams	ABNT NBR 15823-2:2017
	Habilidade passante	Caixa L	ABNT NBR 15823-4:2017
	Viscosidade	Funil V	ABNT NBR 15823-5:2017
	Segregação	Coluna de Segregação	ABNT NBR 15823-6:2017
Estado Endurecido	Massa específica	Balança hidrostática	ABNT NBR 9778:2009
	Absorção de água		
	Índice de Vazios		
	Resistência à compressão axial	Compressão de corpos de prova cilíndricos	ABNT NBR 5739:2018
	Módulo de elasticidade	Metodologia A Tensão fixa	ABNT NBR 8522:2017

Fonte: autor

A Tabela 5-6 apresenta requisitos para a classificação por Classe de espalhamento.

Tabela 5-6: Classes de espalhamento do CAA em função de sua aplicação

Classe de espalhamento	Espalhamento	Aplicação
SF 1	550 a 650	Lajes, estacas e fundações
SF 2	660 a 750	Paredes, vigas e pilares
SF 3	760 a 850	Pilares-paredes e Paredes- diafragma

Fonte: ABNT NBR 15823-1:2017

Para fins de avaliação de desempenho, os concretos foram ensaiados e classificados conforme requisitos estabelecidos pela a norma ABNT NBR 15823-1:2017.

A viscosidade plástica aparente é uma importante característica dos CAA. Uma baixa viscosidade apresenta um rápido espalhamento, porém com curta duração. Uma alta viscosidade apresenta um espalhamento lento e progressivo, por um tempo maior. Na Tabela 5-7 estão demonstradas as especificações para classificação da viscosidade em função da aplicação.

Tabela 5-7: Classes de viscosidade do CAA em função de sua aplicação

Classe de viscosidade	T ₅₀₀ (s)	Funil V (s)	Aplicação
VS 1 / VF 1	≤ 2	≤ 8	Pilares-paredes e Paredes- diafragma
VS 2 / VF 2	> 2	9 a 25	Vigas, lajes e outras

Fonte: ABNT NBR 15823-1:2017

A habilidade passante indica a capacidade do CAA fluir, sem perder sua uniformidade ou causar bloqueio, através de espaços confinados e descontinuidade geométrica, como áreas de alta densidade de armaduras e embutidos (ABNT NBR 15823-1:2017).

Na Tabela 5-8 estão demonstradas as classes de habilidade passantes para o ensaio da Caixa L, que foi o ensaio realizado neste trabalho.

Tabela 5-8: Classes de habilidade passante do CAA em função de sua aplicação

Classe de habilidade passante	Caixa L (H2/H1)	Aplicação
PL 1 / PJ 2	≤ 0,8 com duas barras de aço	Lajes, painéis e fundações
PL 2/ PJ 1	≤ 0,8 com três barras de aço	Vigas, pilares, tirantes e pré fabricados

Fonte: ABNT NBR 15823-1:2017

A resistência à segregação é fundamental para a homogeneidade e a qualidade do CAA, sendo particularmente importante em concretos de maior fluidez e baixa viscosidade. O CAA pode sofrer segregação dinâmica durante o lançamento e estática após o lançamento. As classes de segregação estão apresentadas na Tabela 5-9.

Tabela 5-9: Classes de segregação do CAA em função de sua aplicação

Classe de segregação	Coluna de segregação	Distância a ser percorrida	Aplicação
SR1	≤ 20	> 5	Lajes de pequenas espessuras
SR 2	≤ 15	< 5	Elementos de fundações, pilares, paredes e elementos pré fabricados

Fonte: ABNT NBR 15823-1:2017

Os ensaios utilizados para caracterização dos concretos CAA_{REF} e CAA_{RCV} estão ilustrados nas Figuras 5-13, 5-14, 5-15 e 5-16.

Figura 5-13: Teste do espalhamento

Fonte: autor

Figura 5-14: Teste da caixa L

Fonte: autor

Figura 5-15: Teste do Funil

Fonte: autor

Figura 5-16 Teste da Coluna de Segregação

Fonte: autor

Os ensaios de determinação da massa específica, absorção de água e índice de vazios, da resistência à compressão e do módulo de elasticidade, foram escolhidos por serem usuais e práticos para a avaliação das propriedades mecânicas do concreto no estado endurecido. Essas propriedades foram verificadas e avaliadas por meio de ensaios em laboratório, visando detectar qualquer alteração que possa ter ocorrido em razão da substituição parcial do cimento CP V ARI pelo RCV_{75μm}, do concreto de referência para os concretos de estudo.

A determinação da massa específica, absorção de água por imersão e índice de vazios dos concretos, seguiram os procedimentos recomendados pela norma ABNT NBR 9778:2009, sendo os ensaios realizados na idade de 28 dias. Segunda esta norma, a massa específica (ρ) é definida como sendo a relação entre a massa do material seco e o seu volume, excluindo os poros permeáveis e impermeáveis, conforme demonstrado na equação 5.7. O índice de vazios (I_v) é a relação entre o

volume de poros permeáveis e o volume total da amostra, demonstrado na equação 5.8. A absorção de água (a), calculada conforme equação 5.9, é o processo pelo qual a água é conduzida e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido e poroso, podendo ser definida ainda como o incremento o incremento de massa de um corpo sólido poroso, devido à penetração de água em seus poros permeáveis, em relação à sua massa no estado seco.

$$\rho = \frac{Ms}{(Msat - Mi)} \quad (5.7)$$

$$I_v = \frac{(Msat - Ms)}{(Msat - Mi)} * 100 \quad (5.8)$$

$$a = \frac{(Msat - Ms)}{Ms} * 100 \quad (5.9)$$

Onde ρ é a massa específica, I_v o índice de vazios, a é absorção de água, $Msat$ é massa saturada em água após imersão, Ms a massa da amostra seca em estufa e Mi a massa da amostra saturada imersa em água.

A resistência à compressão pode ser considerada a principal propriedade do concreto no estado endurecido. Por ser um dos ensaios mais simples e de fácil execução, a determinação da resistência à compressão axial em corpos de prova cilíndricos de concreto é o ensaio mais utilizado para a verificação da qualidade de um concreto. Estes ensaios foram realizados nos concretos com idades de 07, 28 e 56 dias. Foram moldados 04 corpos de prova para ensaio nas datas programadas.

O ensaio para a determinação do módulo estático de elasticidade à compressão em corpos de prova cilíndricos de concreto, foi escolhido para ser utilizado na caracterização dos concretos devido à importância das propriedades que determina e por ser um ensaio que tem tido seu emprego cada vez mais difundido para controle de qualidade dos concretos. O módulo de elasticidade do concreto pode ser definido como sendo a relação entre a tensão aplicada e deformação instantânea dentro de um limite proporcional adotado, e os procedimentos de ensaios são definidos pela norma ABNT NBR 8522: 2017. A realização destes ensaios seguiu a mesma programação dos ensaios de determinação da resistência à compressão, já

que os valores obtidos desta resistência foram utilizados como referência para a execução do ensaio de módulo de elasticidade. Na Figura 5-17 está ilustrado a realização do ensaio de resistência à compressão e na Figura 5-18, a realização do ensaio de módulo de elasticidade.

Figura 5-17: Ensaio de resistência à compressão

Fonte: autor

Figura 5-18: Ensaio de módulo de elasticidade

Fonte: autor

A metodologia usada para o desenvolvimento desta pesquisa buscou caracterizar os materiais e avaliar o comportamento de pastas, argamassas e do concreto quando ocorre a substituição do Cimento Portland CP V ARI pelo RCV_{75μm}. A proposta foi de detectar modificações ocorridas nas características dos compósitos, no estado fresco e no estado endurecido, com a introdução deste novo material

6 RESULTADOS E ANÁLISES

6.1 CARACTERIZAÇÃO DO RCV_{75μm}

A realização dos ensaios de caracterização do RCV_{75μm} evidenciou que o resíduo nesta dimensão possui atividade pozolânica.

Desta forma, o RCV_{75μm} enquadra dentro da Classe N, que são pozolanas naturais e artificiais e que obedecem aos requisitos aplicáveis da ABNT NBR 12653:2014, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográficos ácido, cherts silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas. Este resíduo pode ser definido, segundo a esta norma, como uma pozolana artificial, já que é resultante de processo industrial com tratamento térmico que resulta em atividade pozolânica. É também incluído dentro das argilas calcinadas, que são materiais provenientes de calcinação de certas argilas submetidas a altas temperaturas de modo a garantir sua reatividade com hidróxido de cálcio.

Na sequência serão apresentados os resultados e análise dos ensaios de caracterização do RCV_{75μm}

6.1.1 Determinação do teor de cálcio fixado – Método Chapelle modificado

De acordo com valores obtidos na literatura, os materiais podem ser considerados pozolânicos quando, no ensaio de determinação do teor de cálcio fixado, pelo Método Chapelle Modificado, norma ABNT NBR 15895:2010, o consumo de CaO for superior a 330 mg CaO/g de pozolana, por estequiometria, valor este que corresponde a 436 mg Ca(OH)₂/grama de pozolana.

Foram realizados ensaios de determinação do teor de cálcio fixado, pelo Método Chapelle modificado em 06 amostras RCV_{75μm}, nos laboratórios do Instituto de Química, da Universidade Federal de Uberlândia. Os resultados dos ensaios estão apresentados na Tabela 6-1.

Tabela 6-1– Resultados de ensaios de determinação do teor de cálcio fixado

Ensaio	Amostra	Índice de hidróxido de cálcio fixado (mg Ca(OH) ₂ /g)
Chapelle modificado	1	715
	2	707
	3	662
	4	838
	5	712
	6	716

Fonte: autor

Os resultados dos ensaios apresentaram um valor médio de 725 mg CaO/g, e desvio padrão de 53,6 mg CaO/g. O resultado dos ensaios foi calculado pela média dos valores obtidos para as 6 amostras, representando um valor 66% maior do que o valor mínimo encontrado na literatura, que é de 436 mg Ca(OH)₂/g, confirmando assim que o material possui significativa atividade pozolânica, conforme este requisito.

6.1.2 Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal aos 7 dias

Segundo a norma ABNT NBR 12653:2014; nos requisitos físicos, o material para ser considerado pozolânico, é necessário que apresente também um índice de atividade pozolânica com cal (IAP) aos 7 dias ≥ 6 MPa. Na Tabela 6-2 estão demonstrados os valores obtidos para este ensaio.

Tabela 6-2 – Índice de atividade pozolânica com cal - IAP

Ensaio	Corpo de prova	Resistência à compressão (MPa)
Atividade pozolânica com cal 7 dias (MPa)	1	6,9
	2	7,3
	3	7,5
	Média	7,2
	Desvio relativo máximo (%)	4,5

Fonte: autor

O valor médio da resistência à compressão obtido para o ensaio de índice de atividade pozolânica com cal aos 7 dias, que foi de 7,2 MPa, indica que o material atende ao requisito, podendo ainda ser aceito o resultado do ensaio no qual o desvio relativo máximo foi de 4,5 %, portanto, em conformidade com especificações para o ensaio.

6.1.3 Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias

Para atender ao requisito de índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, a argamassa preparada com o RCV_{75µm} (argamassa B) deve apresentar um valor de resistência à compressão $\geq$ a 90% da resistência à compressão da argamassa preparada com o do cimento de referência (argamassa A). Na Tabela 6-3 estão apresentados os valores obtidos para o ensaio.

Tabela 6-3 – Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias

Ensaio	CP (nº)	Resistência à compressão (MPa)	
		Argamassa A	Argamassa B
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (%)	1	37,6	33,7
	2	36,9	33,5
	3	35,8	30,8
	4	37,0	31,4
	Média	36,8	32,4
	Desvio relativo máximo (%)	2,7	5,0
	Índice de desempenho = 88 %		

Fonte: autor

Conforme os valores obtidos para este ensaio, a argamassa B, preparada com 25% de RCV_{75µm}, não atendeu ao requisito mínimo de desempenho, que é de 90% do valor da resistência à compressão da argamassa A, preparada com 100% de cimento Portland. Os valores médios das resistências à compressão da argamassa A (36,8 MPa), e da argamassa B (32,4), apresentam uma relação de 88%, portanto, não conforme quanto ao requisito físico de desempenho, segundo a norma ABNT NBR 12653:2014.

Mesmo não atendendo ao limite mínimo estabelecido pela norma, ainda assim o resíduo pode ser considerado como material pozolânico, tendo em vista que atendeu aos requisitos mínimos necessários quanto na realização dos demais ensaios de caracterização.

6.1.4 Material retido na peneira 45µm

Para este requisito, a norma ABNT NBR 12653:2014 estabelece que o ensaio, determinado conforme a norma ABNT NBR 15894-3:2010, apresente um valor < 20%. Na Tabela 6-4 estão demonstrados os valores obtidos no ensaio.

Tabela 6-4 – Material retido na peneira 45µm

Ensaio	Massa inicial	Massa final
Material retido na peneira 45µm	20,53	2,47
	Material retido na peneira 45 µm = 12,0 %	

Fonte: autor

Na análise desta propriedade, o RCV_{75μm}, atende às especificações, podendo então ser considerado em conformidade com a especificação da norma, quanto a este requisito de finura.

6.1.5 Microscopia Eletrônica de Varredura

A avaliação da forma e dimensão dos grãos do cimento CP V ARI e do RCV_{75μm}, foi realizada através de micrografias obtidas no Microscópio Eletrônico de Varredura Hitachi TM3000. Estas micrografias tiveram ampliações de 100, 300, 500 e 1000 vezes, sendo as ampliações de 300 vezes escolhidas para o propósito da avaliação. As micrografias dos dois materiais foram utilizadas como parâmetro comparativo para verificar a possível influência da morfologia destes no desempenho das pastas, argamassas e concretos pesquisados neste trabalho

6.1.5.1 MEV – Cimento CPV ARI

As micrografias obtidas para a amostra de cimento CP V ARI, foram obtidas utilizando-se a amostra em pó, impregnada em fita de carbono. Nas Figuras 6-1, 6-2, 6-3 e 6-4 estão apresentadas as micrografias do material, em diferentes resoluções.

Figura 6-1: Micrografia do cimento CP V ARI resolução 100 vezes

Fonte: autor

Figura 6-2: Micrografia do cimento CP V ARI resolução 300 vezes

Fonte: autor

Figura 6-3: Micrografia do cimento CP V ARI resolução 500 vezes

Fonte: autor

Figura 6-4: Micrografia do cimento CP V ARI resolução 1000 vezes

Fonte: autor

No processamento das imagens, a micrografia com ampliação de 300 vezes foi a que apresentou a melhor definição para avaliação pretendida. Foram escolhidos 20 fragmentos, entre os maiores visualizados aleatoriamente, para determinação das dimensões e forma, e estes estão identificados na Figura 6-5.

Figura 6-5: micrografia analisada do cimento CP V ARI

Fonte: autor

Os valores obtidos para a dimensão das partículas do cimento CP V ARI estão representados no gráfico da Figura 6-6. Estes valores representam a maior distância medida entre dois planos paralelos de cada um dos fragmentos. Analisando estes dados, processados pelo *software* ImageJ, chegou-se um valor médio de 34 μm . 75% dos fragmentos verificados nesta condição, apresentaram dimensão abaixo do valor médio e 25% ficaram acima desta média.

O *software* utilizado para análise e processamento dos dados, possibilitou ainda calcular valores para estimativa de um parâmetro, definido como circularidade dos fragmentos. Os valores obtidos estão demonstrados no gráfico da Figura 6-7. Esta análise apresentou um valor médio de 0,776 para a circularidade das partículas.

Figura 6-6: dimensão das partículas do cimento CP V ARI

Fonte: autor

Figura 6-7: circularidade das partículas do cimento CP V ARI

Fonte: autor

6.1.5.2 MEV – RCV_{75µm}

O RCV_{75µm} foi submetido às mesmas condições de ensaio do cimento CP V ARI para a obtenção das micrografias. As imagens estão demonstradas nas Figuras 6-8, 6-9, 6-10 e 6-11.

Figura 6-8: Micrografia do RCV_{75μm}
resolução 100 vezes

Fonte: autor

Figura 6-9: Micrografia do cimento
RCV_{75μm} resolução 300 vezes

Fonte: autor

Figura 6-10: Micrografia do RCV_{75μm}
resolução 500 vezes

Fonte: autor

Figura 6-11: Micrografia do RCV_{75μm}
resolução 1000 vezes

Fonte: autor

Neste caso também a micrografia com ampliação de 300 vezes foi a que apresentou a melhor definição de imagem para avaliação. Foram escolhidos 20 fragmentos do RCV_{75μm}, dentre os maiores visualizados aleatoriamente, para a verificação das dimensões, sendo estes identificados na Figura 6-12.

Figura 6-12: micrografia analisada do RCV_{75μm}

Fonte: autor

Os resultados fornecidos para as dimensões dos fragmentos pela análise através do *software* ImageJ, estão representados no gráfico da Figura 6-13. O valor de 39 μm foi a média obtida para a dimensão fragmentos do RCV_{75μm}. O maior valor obtido foi 67 μm e o menor, 19 μm , representado, respectivamente, 45 % acima do valor médio e 55 % abaixo do valor médio, em relação ao número de fragmentos analisados.

Figura 6-13: dimensão das partículas do RCV_{75μm}

Fonte: autor

Avaliando o parâmetro circularidade, calculado pelo *software*, obteve-se um valor médio de 0,709. Os valores estão demonstrados no gráfico da Figura 6-14.

Figura 6-14: Circularidade das partículas do RCV_{75μm}

Fonte: autor

A utilização das imagens obtidas pelo MEV e os dados processados pelo *software*, possibilitaram avaliar que não existem diferenças significativas quanto ao tamanho dos fragmentos do cimento CP V ARI e o RCV_{75μm}, que pudessem influenciar diretamente a trabalhabilidade das pastas, argamassas e concretos produzidos com estes materiais. Embora a dimensão média obtida dos grãos do cimento CP V ARI seja 13% menor do que os grãos do RCV_{75μm}, não se verifica nisso uma diferença significativa, devido à ordem de grandeza desses grãos.

O parâmetro circularidade, que faz uma relação com a forma dos grãos, apresentou uma diferença de 9,4 % menor do RCV_{75μm}, em relação aos grãos do cimento CP V ARI. Estes valores também demonstram que não existe diferença significativa quanto à forma destes grãos. Lembrando que valores tendendo a 0 indicam forma alongada, e valores próximo a 1, ao círculo perfeito, os valores 0,776 e 0,709, respectivamente, cimento e resíduo, possibilita avaliar que são formatos que se assemelham.

6.1.6 Análise granulométrica do RCV_{75μm}.

O gráfico ilustrado na Figura 6-15 mostra a curva granulométrica do RCV_{75μm} obtida por meio da técnica de espalhamento de luz laser de baixo ângulo, conhecida genericamente como difração laser.

Figura 6-15 Curva granulométrica do RCV_{75μm}.

Fonte: autor

Conforme resultados obtidos neste ensaio, verificou-se que 98,5% das partículas possuem dimensão inferior a 75 μm. Foram detectadas partículas com dimensão a partir de 0,2 μm e o maior percentual individual foi de 6,4%, referente às partículas com dimensão de 65,5 μm. Para favorecer a reação pozolânica, é preciso que o resíduo apresente granulometria com dimensão máxima característica (D_{max}), menor que a cimento, ou seja, 75 μm. Neste requisito o RCV_{75μm} apresentou 1,5% de partículas maiores que este limite, o que não se caracteriza desconformidade pois, para o cimento CP V ARI, este valor pode ser de até 12%, o que pode ser aplicado também ao resíduo.

6.2 PERCENTUAL DE SUBSTITUIÇÃO

As argamassas foram submetidas ao ensaio de determinação da resistência à compressão, nas idades de 07, 14, 28 e 56 dias. Na Tabela 6-5 estão demonstrados os valores obtidos pelos ensaios.

Foi verificado um decréscimo nos valores de resistência à compressão, em todas as idades de ensaio, na medida em que aumenta o teor de substituição do cimento CPV ARI pelo RCV_{75μm}. Este decréscimo se torna mais acentuado a partir do teor de 20% de substituição, principalmente nas idades de 07 e 14 dias, onde a atividade pozolânica do resíduo ainda pode ser considerada baixa, tendendo a

aumentar nas idades mais avançadas. Para as idades posteriores, 28 e 56 dias, as argamassas com teores de substituição de 30%, 40% e 50%, apresentaram aumento no ganho de resistência, mas ficando ainda bem abaixo da resistência da argamassa com, 0%, 10% e 20% de substituição.

Tabela 6-5– Resultados de ensaios de resistência à compressão

Teor de substituição (%)	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)			
	07 dias	14 dias	28 dias	56 dias
0	34,5	35,2	36,1	37,4
10	33,2	33,4	34,0	35,8
20	33,7	34,0	34,1	34,9
30	26,2	27,9	30,9	31,4
40	23,3	26,0	26,5	30,8
50	20,9	22,3	23,7	26,9

Fonte: autor

A argamassa com 0% de substituição apresentou um ganho na resistência à compressão de apenas 8,4% da idade de 7 para 56 dias, já esperado por se tratar de um cimento de alta resistência inicial. As argamassas com teores de substituição de 30%, 40% e 50% apresentaram um ganho de resistência de 19,8%, 32,1% e 28,7%, respectivamente, possivelmente em razão da atividade pozolânica que o resíduo possui, mas que ainda assim, se mostrou uma perda significativa de resistência com estes teores de substituição. Este maior ganho resistência também pode ser atribuído ao possível efeito fíler, que aumenta a resistência mecânica da matriz cimentícia, quando comparada ao sistema de cimento puro com mesma relação água/cimento (Damineli, 2013). A Figura 6-16 apresenta o gráfico com o decréscimo das resistências à compressão das argamassas, na medida em que ocorre o aumento progressivo do teor de substituição do cimento CPV ARI pelo RCV_{75µm}, em cada idade de ensaio.

Figura 6-16: Gráfico da resistência à compressão das argamassas

Fonte: autor

Com isto foi definido que seriam adotados para o estudo, teores de substituição de até 20%, tomando como referência apenas o parâmetro da resistência à compressão.

6.3 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA PASTA

Nesta seção foram avaliadas as pastas com os teores de substituição do cimento CP V ARI pelo RCV_{75µm}, com os teores de 0% e 20%, para os ensaios de determinação da consistência normal, e dos tempos de início e de fim de pega. Para os ensaios de reometria de fluxo contínuo, foram investigados os teores de 0%, 5%, 10%, 15%, e 20%.

6.3.1 Determinação da Consistência Normal e dos Tempos de Pega

As pastas foram submetidas aos ensaios para a determinação da consistência normal e início e fim de pega, cujos resultados estão representados na Tabela 6-6.

Tabela 6-6 – Resultados de ensaios de consistência normal e início e fim de pega da pasta

Ensaio	Resultados	
	0% de substituição	20% de substituição
Consistência normal	31,0	35,6
Início de pega (h:min)	2:20	2:55
Fim de pega (h:min)	4:52	5:18

Fonte: autor

Observa-se que a pasta com 20% de resíduo cerâmico requereu 14,8 % a mais de água para atingir a consistência normal. Os tempos de início e fim de pega também apresentaram valores superiores para a pasta com resíduo cerâmico. O início de pega foi aumentado em 35 minutos, e o fim de pega, em 26 minutos. É possível avaliar que nesta pasta, na qual a substituição representa o maior percentual com o resíduo cerâmico, não se verifica uma alteração significativa no comportamento relativo aos tempos de início e de fim de pega, porém, a pasta requer maior quantidade de água para atingir a mesma consistência do que a pasta sem resíduo. Tal fato pode ser atribuído à maior absorção de água que o resíduo cerâmico apresenta, e que poderia alterar a resistência mecânica desta pasta e sua durabilidade.

6.3.2 Ensaio de Reometria de Fluxo Contínuo

A realização dos ensaios de Reometria de Fluxo Contínuo avaliaram a influência da substituição parcial do cimento CPV ARI pelo RCV_{75μm}, nas propriedades reológicas (viscosidade e tensão de escoamento), das pastas com teores de 0%, 5%, 10%, 15% e 20% de substituição. Na Figura 6-17 estão apresentados os valores para tensão de escoamento.

Figura 6-17: Gráfico da tensão de escoamento das pastas

Fonte: autor

Avaliando a tensão de escoamento como sendo tensão mínima necessária para iniciar o escoamento do material, verifica-se um grande aumento, na ordem de 150% desta tensão, da pasta com 0%, em relação à pasta com teor de 5% de substituição. Este mesmo comportamento não é verificado quando se correlaciona com o teor de 10% de substituição, onde o valor cresce, em apenas 4,1%. Em relação ao teor de 15%, ocorre também um aumento da tensão de escoamento, em 59%, e de 101% para o teor de 20%. Nota-se que no ensaio relativo ao teor de 5%, os valores fogem da tendência verificada para os demais teores, mas que tal comportamento pode ser verificado em outros ensaios apresentados mais adiante.

A viscosidade, que pode ser definida como sendo a resistência ao escoamento, apresentou os valores de ensaio que estão demonstrados na Figura 6-18. Pelo gráfico é possível avaliar que, para este comportamento, também o teor de substituição de 5%, apresentou valor que difere da lógica do ensaio, se comparado aos valores dos demais teores com relação à referência, que é sem substituição. Ocorreu uma redução de 30% na viscosidade da pasta com teor de 5% de substituição em relação à referência. Para as demais pastas, houve um aumento de 80%, 85% e 110% no

valor da viscosidade, na medida em que foram aumentados os teores para 10%, 15% e 20% de resíduo.

Figura 6-18: Gráfico da viscosidade das pastas

Fonte: autor

6.4 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS

Foram avaliadas 5 argamassas, com teores de substituição do cimento CPV ARI pelo RCV_{75µm}, de 0%, 5%, 10%, 15% e 20%. As argamassas foram submetidas aos ensaios de determinação consistência, pelo método da mesa de consistência (*flow test*) e pelo método de determinação do comportamento reológico da argamassa em solicitações de *squeeze-flow*.

6.4.1 Flow Test

O ensaio de *flow test* foi realizado pelo método da mesa de consistência, onde procedeu-se a tomada de duas medidas ortogonais de abertura da argamassa após 25 golpes da mesa. Este ensaio teve como objetivo avaliar quantitativamente a influência da substituição do cimento pelo resíduo cerâmico, no espalhamento horizontal das argamassas. Os valores médios das aberturas obtidos no ensaio, estão apresentados na Tabela 6-7.

Tabela 6-7 – medida da abertura das argamassas no *flow test*

	Medida da Consistência (mm)				
	0%	5%	10%	15%	20%
	165	162	159	155	147

Fonte: autor

Verifica-se pelos resultados de ensaio, uma redução progressiva no valor das aberturas das argamassas, na medida em que ocorre o aumento do percentual de RCV_{75µm}, em substituição do cimento CP V ARI. Isso pode ser relacionado ao fato de que, a pasta com resíduo pode requerer até 14,8% a mais de água para atingir a uma mesma consistência, em relação à pasta somente com o cimento, e tal comportamento pode ser também estendido às argamassas. Os percentuais de perda de consistência, foram na ordem de 1,8%, 3,8%, 6,5% e 12,2%, na ordem crescente dos teores de substituição. Desta forma é possível afirmar que a argamassa com resíduo requer mais água para atingir o mesmo índice de consistência da argamassa somente com cimento, o que possivelmente acarretaria uma redução em sua resistência, o que pode ser combatido mediante o uso de aditivos redutores de água.

6.4.2 Squeeze Flow

O ensaio de *squeeze flow* foi realizado seguindo os mesmos procedimentos adotados para a preparação das argamassas do ensaio de *flow test*. O objetivo deste ensaio foi avaliar o comportamento reológico das argamassas, com o incremento do teor de resíduo cerâmico. Os resultados destes ensaios são apresentados através de um gráfico da carga (N) versus o deslocamento (mm) e estão apresentados no gráfico da Figura 6-19.

Figura 6-19: Gráfico do *squeeze flow*

Fonte: autor

Foi possível observar no ensaio que o comportamento reológico das argamassas não seguiu a tendência verificada nos ensaios de *flow test*. As

argamassas com 0%, 10% e 15% de $RCV_{75\mu m}$, apresentam comportamento muito semelhante e as argamassas com 5% e 20% apresentaram comportamento discrepantes.

A argamassa com 0% de resíduo deformou 3,42 mm a uma força de 1000 N. Para esta mesma carga, as argamassas com 10% e 15% apresentaram, respectivamente, 3,89 mm e 3,96 mm, ou seja, deformabilidade um pouco maior, mas ainda assim, um comportamento bem semelhante à argamassa de referência, sem a adição do resíduo.

A pasta com 5% de substituição apresentou alta deformabilidade, atingiu o limite de 4mm com uma força de 421 N, enquanto a argamassa com 20% de substituição apresentou a menor deformação, 3,4mm, com a força de 1000 N. Mais uma vez ficou demonstrado que o teor de substituição de 5% apresenta comportamento diferenciado aos demais teores com relação à deformação sob tensão.

Neste caso não se verificou a variação no comportamento reológico das argamassas, com a perda de consistência medida pela deformabilidade, com o incremento do teor de resíduo.

6.5 AVALIAÇÃO DOS CONCRETOS - CAA_{REF} E CAA_{RCV}

Os ensaios de caracterização realizados para os concretos de referência e com resíduo cerâmico, visaram classificar estes concretos quanto aos requisitos da norma NBR 15823-1:2017 e identificar a possível influência da adição do $RCV_{75\mu m}$ no comportamento reológico e em algumas propriedades destes concretos no estado endurecido. Para isto, optou-se por fazer ensaios práticos, de resposta rápida, eficaz, e de baixa complexidade, como forma de viabilizar sua realização.

6.5.1 Estado fresco

Como forma de caracterização e classificação dos concretos no estado fresco, foram realizados ensaios que determinassem algumas das principais propriedades requeridas para os CAA:

- a) espalhamento, tempo de escoamento T_{500} e índice de estabilidade visual;

- b) habilidade passante;
- c) viscosidade $T_{10\text{seg}}$;
- d) resistência à segregação.

Estas propriedades foram determinadas pelos métodos ensaios do espalhamento pelo Cone Abrams, teste da Caixa L, teste do Funil V e teste da Coluna de Segregação, respectivamente, e os valores obtidos estão apresentados na Tabela 6-8.

Tabela 6-8 – Resultados dos ensaios dos concretos no estado fresco

Método	Cone de Abrams			Caixa L	Funil V	Coluna de Segregação
Caract.	Espalh. SF (mm)	Tempo de escoamento T_{500} VS (s)	Índice de estabilidade visual IEV	Habilidade passante PL (H2/H1) (mm)	Tempo de escoamento $T_{10\text{seg}}$ VF (s)	Resistência à segregação SR (%)
CAA_{REF}	820	2	0	0,75	6,2	8,3
CAA_{RCV5%}	812	4	0	0,77	8,5	12,0
CAA_{RCV10%}	795	3	0	0,80	8,0	9,9
CAA_{RCV15%}	770	3	0	0,73	8,5	14,3
CAA_{RCV20%}	625	6	2	0,94	9,7	17,5

Fonte: autor

Os valores destes ensaios permitiram a classificação dos CAA, segundo a norma ABNT NBR 15823-1:2017, conforme os requisitos para sua aplicação. Com base nos valores obtidos, estes concretos podem ser classificados conforme demonstrado na Tabela 6-9.

Tabela 6-9 – Classificação dos CAA_{REF} e CAA_{RCV} no estado fresco.

Método	Cone de Abrams			Caixa L	Funil V	Coluna de Segregação
Caract.	Slump flow (SF)	Viscosidade plástica (VS)	Índice de estabilidade visual (IEV)	Habilidade passante (PL)	Viscosidade plástica pelo funil (VF)	Resistência à segregação (SR)
CAA_{REF}	SF 3	VS 1	IEV 0	PL 2	VF 1	SR 2
CAA_{RCV5%}	SF 3	VS 2	IEV 0	PL 2	VF 1	SR 2
CAA_{RCV10%}	SF 3	VS1	IEV 0	PL 2	VF 1	SR 2
CAA_{RCV15%}	SF 3	VS2	IEV 0	PL 2	VF 1	SR 2
CAA_{RCV20%}	SF 1	VS2	IEV2	PL 2	VF 2	SR 1

Fonte: autor

Os concretos CAA_{REF} e CAA_{RCV10%}, tiveram as mesmas classificações em todos os requisitos analisados, portanto, possuem mesmas características.

Os concretos CAA_{RCV5%} e CAA_{RCV15%} somente não atenderam ao requisito de viscosidade plástica, quando comparados ao CAA_{REF}. Em todos os outros requisitos, obtiveram a mesma classificação do CAA_{REF}.

Somente o CAA_{RCV20%} teve classificação diferente em quase todos requisitos, em relação ao CAA_{REF}. No requisito de habilidade passante, assim como todos os outros concretos, possui a mesma classificação.

Com relação ao índice de estabilidade visual (IEV), somente o CAA_{RCV20%} apresenta classificação diferente das demais, conforme pode ser observado nas Figuras 6-20 e 6-21.

Figura 6-20: IEV do CAA_{REF}

Fonte: autor

Figura 6-21 – IEV CAA_{RCV20%}

Fonte: autor

Desta forma, fica evidenciado não haver diferença acentuada nas características dos concretos no estado fresco, com teores de substituição de até 15%. Somente com o teor de 20% de substituição do cimento é que as características deste concreto começam a ser alteradas, comprometendo assim sua aplicação para as mesmas exigências do que os demais concretos analisados.

6.5.2 Estado endurecido

Foram avaliadas propriedades dos concretos no estado endurecido mediante a realização dos seguintes ensaios:

- a) determinação da massa específica, absorção de água e índice de vazios;

- b) determinação da resistência à compressão;
- c) determinação do módulo de elasticidade estático.

Os resultados dos ensaios de massa específica, absorção de água e índice de vazios estão apresentados na Tabela 6-10. Estes ensaios foram realizados na idade de 28 dias.

Tabela 6-10 – resultados dos ensaios dos concretos no estado endurecido

Ensaio	Massa específica (kg/m ³)	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)
CAA _{REF}	2355	5,3	12,0
CAA _{RCV5%}	2326	5,7	12,7
CAA _{RCV10%}	2274	5,9	12,9
CAA _{RCV15%}	2258	6,3	13,5
CAA _{RCV20%}	2220	6,0	13,6

Fonte: autor

Nestes ensaios foi possível avaliar que houve redução nos valores das massas específicas dos concretos, com o aumento do teor de resíduo. Estas reduções foram de 1,2%, 3,4%, 4,1% e 5,7%, na ordem crescente dos teores de resíduo, em relação ao concreto de referência. Na figura 6-22 está apresentado o gráfico das massas específicas do CAA_{REF} e dos concretos CAA_{RCV75µm}

Figura 6-22: Gráfico da massa específica dos CAA

Fonte: autor

Esta redução nos valores da massa específica pode estar associada ao fato de que o RCV_{75μm} possui massa específica menor do que o cimento CP V ARI, com isso, ao substituir o cimento pelo resíduo, tem-se este decréscimo verificado. Esperava-se que ocorresse uma redução menor da massa específica com o aumento do teor de substituição já que ocorreria o efeito fíler proporcionado pelo resíduo, reduzindo os vazios da pasta.

Na Figura 6-23 estão representados graficamente os valores obtidos no ensaio da absorção de água dos concretos.

Figura 6-23: Gráfico da absorção de água dos CAA

Fonte: autor

Observa-se neste gráfico o aumento da absorção de água dos CAA_{RCV75μm} em relação ao CAA_{REF}. Estes aumentos são de 7,1%, 11,1% e 17,5% e 11,90%. Até o percentual de 15% de substituição, os valores aumentaram conforme também aumentou o percentual de substituição.

Para o CAA_{RCV20%} ocorre uma redução no valor da absorção de água, comparado ao o CAA_{RCV15%}. Tal fato pode ser atribuído possivelmente à execução dos ensaios, já que o mesmo comportamento não ficou evidenciado na determinação de outras propriedades destes concretos no estado endurecido.

O ensaio de determinação do índice de vazios dos concretos apresentou valores crescentes para os CAA_{RCV75μm} em relação ao CAA_{REF}, conforme foram aumentados os teores de substituição do cimento CP V ARI pelo RCV_{75μm}. Os

aumentos foram de 5,9%, 7,4%, 12,6% e 13,1%. A figura 6-24 apresenta o gráfico com os valores deste ensaio.

Figura 6-24: Gráfico do índice de vazios dos concretos

Fonte: autor

O aumento no índice de vazios dos CAA_{RCV75µm} acompanha a mesma tendência de aumento nos valores da absorção de água e queda dos valores de massa específica, conforme são aumentados os teores de substituição.

Os ensaios para a determinação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade do concreto, foram realizados nas idades de 07, 28 e 56 dias, sendo os valores apresentados para a resistência à compressão, referente a 4 corpos de prova, e para o ensaio de módulo de elasticidade, 2 corpos de prova para cada concreto por idade. Os valores são apresentados na Tabela 6-11.

Confirmando a tendência de redução nos valores da resistência à compressão com o aumento dos teores de substituição do cimento pelo resíduo, para estes concretos, cujos teores de substituição foram aumentados em 5% até o máximo de 20%, observa-se que a redução foi menor do que verificado nas argamassas. A evolução dos valores da resistência à compressão com o aumento das idades, mostra também redução na diferença das resistências com o aumento do teor de resíduo. Isto ocorre em razão da atividade pozzolânica que este material possui., como pode ser observado no gráfico da Figura 6-25

Tabela 6-11 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos.

Ensaio	Resistência à compressão (MPa)			Módulo de elasticidade (GPa)		
	Idade (dias)			Idade (dias)		
	7	28	56	7	28	56
CAA _{REF}	23,3	26,0	27,9	26,7	28,4	28,8
CAARCV5%	22,8	25,7	27,3	25,8	27,1	28,1
CAARCV10%	19,6	22,8	25,7	23,7	25,4	27,9
CAARCV15%	18,9	21,5	24,0	22,1	24,2	26,7
CAARCV20%	16,2	19,0	21,1	18,8	21,8	24,0

Fonte: autor

Figura 6-25: Gráfico da evolução da resistência à compressão.

Fonte: autor

Todos os concretos apresentaram ganho no valor da resistência à compressão com o aumento das idades, como era de se esperar. Porém, este ganho se mostra mais evidenciado para àqueles concretos com os maiores teores de substituição do cimento CP V ARI pelo RCV_{75µm}. Para o CAA_{REF} e o CAARCV5% a evolução da resistência à compressão de 7 para 56 dias foi de 19,7%. O aumento foi de 31,1% para o CAARCV10%, de 27,0% para o CAARCV15% e de 30,2% para o CAARCV20%.

Com relação aos valores obtidos nos ensaios de determinação do módulo de elasticidade, as mesmas tendências observadas nos ensaios de resistência à compressão podem ser confirmadas, porém são menores os percentuais de evolução

do módulo com o aumento das idades, conforme é possível observar no gráfico da Figura 6-26.

Figura 6-26: Gráfico da evolução do módulo de elasticidade.

Fonte: autor

O CAA_{REF} apresentou um ganho de 7,9% de 7 para 56 dias de idade no valor do módulo de elasticidade. Este aumento foi de 8,9% para o CAA_{RCV5%}, de 17,7% para o CAA_{RCV10%}, 20,8% para o CAA_{RCV15%} e de 27,6% para o CAA_{RCV20%}.

Os resultados dos ensaios propostos para a caracterização e avaliação das pastas, argamassas e dos concretos, possibilitaram detectar as modificações que ocorreram nestes, com a introdução do RCV_{75μm}. O entendimento das características e das propriedades dos materiais e misturas, permitiram compreender as limitações, e alternativas, do uso quando da substituição do Cimento CP V ARI pelo RCV_{75μm}. na produção do CAA_{REF}.

Com os resultados obtidos, é possível fornecer parâmetros para a utilização do RCV_{75μm} diretamente na produção do CAA_{REF} na concreteira. Desta forma poderia representar uma opção de redução de consumo de cimento e, conseqüentemente, possível redução dos custos de produção.

7 CONCLUSÃO

A evolução nas produções mundiais da indústria do cimento, verificada através de uma demanda crescente, resultante, dentre vários fatores, do desenvolvimento observado no setor da construção civil, de novas exigências e de novas tecnologias, tem como consequências também um crescimento dos impactos causados pela produção deste material, com o aumento da emissão de CO₂, resultante da produção do clínquer. Sob esta ótica, pesquisas que visam buscar novas tecnologias e/ou o uso de materiais alternativos, principalmente de resíduos industriais em substituição ao cimento, representam um dos caminhos para a redução dos impactos causados pela fabricação do cimento na natureza, e também para a sustentabilidade da atividade da construção civil. Desta forma, o emprego de resíduo cerâmico de telha vermelha, finamente moído, apresentou potencial para utilização em substituição parcial do cimento. Os teores de substituição estudados apresentaram resultados motivadores, que demonstram a viabilidade desta utilização.

O resíduo cerâmico apresentou potencial pozolânico, possibilitando assim seu emprego em substituição parcial do cimento na produção do CAA, com percentuais expressivos desta substituição, sem alterar substancialmente algumas de suas propriedades, principalmente no estado fresco. No estado endurecido, foi verificado queda nos valores da resistência à compressão e no módulo de elasticidade, com o incremento dos teores de substituição. Isto não deve representar limitação quanto ao seu emprego, pois pode ser investigado a otimização destes concretos de maneira a atender às exigências para cada situação desejada.

Os aspectos reológicos do CAA com resíduo cerâmico, investigados nesta pesquisa, também não apresentaram alterações significativas com o emprego do resíduo cerâmico em substituição parcial ao cimento. A caracterização do CAA no estado fresco evidenciou que, com teores de substituição de até 15% do cimento pelo resíduo cerâmico, importantes características deste concreto, tais como a viscosidade e a coesão, não sofreram alterações que pudessem restringir sua aplicação.

Dentro das propostas desta Tese, foi possível concluir ainda, de maneira específica, que:

- a) O RCV_{75µm} apresentou resultados, na maioria dos ensaios para a verificação de sua atividade pozolânica, que o qualificam como material

pozolânico com grande potencial para emprego. O material possui capacidade de fixação de cálcio que supera valores mínimos de referência encontrados na literatura. O Índice de Atividade Pozolânica com Cal apresenta valores de resistência à compressão superiores ao mínimo estabelecido por norma, porém, no ensaio de desempenho com cimento, a resistência à compressão não atingiu o limite mínimo aos 28 dias de idade, mas apresentou resultado muito próximo, o que não desqualificaria o resíduo quanto a sua capacidade de emprego como material pozolânico;

b) A análise do teor de substituição do cimento pelo resíduo cerâmico, dentro da faixa investigada, evidenciou que 15% é o valor mais adequado, conforme os aspectos avaliados. Tal valor pode representar um percentual significativo, levando-se em conta o que poderia representar considerando a possibilidade de redução no consumo de cimento, de forma geral. O teor de 5% de substituição representou grandes variações na maioria dos ensaios realizados, o que requer uma investigação mais minuciosa para o entendimento deste comportamento. Para os demais teores, os resultados de ensaios apresentaram tendência coerente com o incremento da substituição. A faixa de teores investigada se mostrou eficiente para este estudo, porém pode ser ampliada de forma a melhorar o entendimento da influência da substituição do cimento nas propriedades do concreto e na definição de um percentual mais adequado de forma a não modificar as propriedades deste concreto.

c) Os aspectos reológicos das pastas e das argamassas sofreram alterações mais marcantes com a substituição do cimento pelo resíduo, do que quando se avalia estes mesmos aspectos para o concreto. Para obtenção de uma mesma consistência, a pasta de cimento CP V ARI com 20% de RCV_{75µm}, requer 14,8% a mais de água, devido ao fato de que o resíduo possui elevada absorção de água, que não foi objeto de investigação nesta pesquisa, mas conhecido por referências anteriores, o que acarretou assim, perda de consistência com o incremento do resíduo. Os ensaios de *flow test* e *squeeze flow* realizados nas argamassas apresentaram diferentes tendências, impossibilitando determinar de forma mais precisa a influência do acréscimo do resíduo na reologia das argamassas. Embora tenha sido importante avaliar o comportamento das pastas e das argamassas, verificou-se que estes mesmos comportamentos não ocorreram no concreto, e devem ser avaliados de forma

mais específica e criteriosa, de forma a possibilitar melhor seu entendimento e sua aplicação, quando na avaliação do desempenho do concreto.

d) As características dos concretos CAA_{REF} e CAA_{RCV75µm} no estado fresco com teores de substituição de até 15% não foram modificadas de maneira a alterar a classificação destes conforme a norma ABNT NBR 15823-1:2017, determinada pelo espalhamento, habilidade passante, viscosidade e segregação. Os parâmetros adotados para a avaliação se mostraram eficientes e possibilitaram uma boa avaliação dos comportamentos dos concretos com os crescentes teores de substituição do cimento pelo resíduo. No entanto, no estado endurecido, observou-se queda nos valores da massa específica e aumento da absorção de água e da porosidade, para todos os concretos investigados. As quedas nos valores destas propriedades não eram esperadas, tendo em vista que, sendo um material fino a ser acrescentado, mesmo que este não tivesse ação aglomerante, o mesmo teria o efeito de um fíler, proporcionando uma redução dos vazios da pasta, e, consequentemente, um aumento nos valores de massa específica, redução da absorção de água e de porosidade. As influências da substituição nestas propriedades foram menores do que observado para valores de ensaio da resistência à compressão e no módulo de elasticidade, com queda mais acentuada.

Nesta Tese ficou demonstrado a possibilidade de emprego do resíduo cerâmico finamente moído, como parte do aglomerante, e em substituição parcial do cimento, na produção de concreto auto adensáveis. Ficou evidenciado ainda que os quantitativos de substituição justificariam este uso. Para o concreto investigado, com um consumo de 330 quilos por metro cúbico de concreto, a redução poderia ser de aproximadamente 50 quilos, valor este que pode ser bastante significativo, dependendo do volume de concreto utilizado em um determinado empreendimento. Avaliando comparativamente os aspectos reológicos e as propriedades físicas do concreto auto adensável com substituição parcial de cimento pelo resíduo de telha cerâmica, as características deste concreto não sofreram modificações tão significativas que pudessem impossibilitar o uso do RCV_{75µm} como material aglomerante alternativo à substituição parcial do cimento para a produção destes concretos. Deve-se avaliar, portanto que, para o uso do resíduo como parte do aglomerante em substituição parcial do cimento, as limitações aqui verificadas,

principalmente como a redução nos valores de resistência à compressão e do módulo de elasticidade, devem ser melhor investigadas de forma a minimizar seus efeitos.

Mesmo que ainda ocorram algumas modificações nas características de concretos produzidos com resíduo cerâmico, exigindo com isso adequar este material em função de sua aplicação, a utilização do RCV_{75μm}, em substituição parcial do cimento, se mostrou viável devido aos benefícios que isto pode representar, tanto nos aspectos técnicos, econômicos e sociais. A utilização deste resíduo, abundante em vários locais, seja pela perda e descarte irregular na fabricação, pela deposição irregular de resíduo de demolição e construção, ou pela própria substituição por novos materiais, é uma forma de contribuição significativa para sustentabilidade do setor da construção civil, e pode ser considerada a principal contribuição desta pesquisa, num cenário onde cada vez mais se vê a necessidade de buscar o reaproveitamento dos resíduos em razão, principalmente, da necessidade de economia de energia e da preservação dos recursos naturais.

Esta pesquisa mostrou-se promissora quanto possibilidade de continuidade de exploração do tema. Dentre as sugestões para trabalhos futuros, tem-se:

- Investigar a pozolanicidade do RCV na dimensão máxima característica de 45μm. Embora na dimensão de 75μm já tenha apresentado resultados satisfatórios, espera-se que com uma dimensão ainda menor dos grãos, esta pozolanicidade possa ser aumentada;
- Verificar o método mais adequado para a produção do RCV finamente moído, através da variação do tipo de equipamento de moagem e o tempo de processamento do material; e das características do material obtido, conforme tipo de equipamento utilizado;
- Avaliar uma faixa mais ampla de substituição do resíduo pelo cimento buscando definir exatamente com qual teor de substituição as propriedades da pasta, da argamassa e do concreto começam a sofrer modificações mais significativas;
- Proceder um estudo de dosagem para a utilização do resíduo como parte do aglomerante, buscando avaliar os concretos através do BI (Índice de Eficiência);
- Verificar a influência da substituição do resíduo cerâmico pelo cimento na durabilidade do CAA;

- Avaliar o emprego do resíduo de telha cerâmica vermelha diretamente na produção do clínquer do cimento Portland pozolânico (CP IV);
- Realizar um estudo com vistas à avaliação econômica da produção e utilização do resíduo de telha cerâmica finamente moído, em substituição parcial do cimento na produção de argamassas e concretos;
- Avaliar a possível redução dos custos com a introdução do RCV na produção do CAA diretamente na central dosadora.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, R.; JEANRENAUD, S.; BESSANT, J.; DENYER, D.; OVERY, P. Sustainabilityoriented innovation: a systematic review. **International Journal of Management Reviews**, v. 18, n. 2, p. 180-205, 2016.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 237R-07: Self-Consolidating Concrete, 2007.

ANGULO, S.C. et al. *Desenvolvimento de novos mercados para a reciclagem massiva de RCD*. In: **V SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL. IBRACON CT-206/IPEN**. São Paulo. 2002. p. 293-308.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 26**: Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 27**: Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 30**: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 33**: Concreto – Amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 46**: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 49**: Agregado miúdo – Determinação das impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 51**: Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e da massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

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

_____. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

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

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

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão em corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

____ **NBR 5751 – Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2015.

____ **NBR 5752 – Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2014.

____ **NBR 7211:** Agregado para concreto – Especificações. Rio de Janeiro, 2019.

____ **NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 2019.

____ **NBR 8522: Concreto –** Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

____ **NBR 9778:** Argamassas e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, Rio de Janeiro, 2009.

____ **NBR 10004 – Resíduos sólidos: Classificação.** Rio de Janeiro, 2004.

____ **NBR 11768 – Aditivos químicos para concreto de cimento Portland: Requisitos.** Rio de Janeiro, 2011.

____ **NBR 12653 – Materiais pozolânicos – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2014.

____ **NBR 13276 –** Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

____ **NBR 15823-1:** Concreto auto adensável – Classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro, 2017.

____ **NBR 15839:** Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método do *squeeze-flow*. Rio de Janeiro, 2010.

____ **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó. – Determinação da massa específica–** Rio de Janeiro, 2017.

____ **NBR 16606: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal –** Rio de Janeiro, 2017.

____ **NBR 16607. Cimento portland: Determinação do tempo de pega.** Rio de Janeiro, 2017.

AGOSTINHO, L. B. **Estudo reológico de pastas de cimento contendo polímero superabsorvente e nano partículas de sílica.** 2017. 128 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS INDÚSTRIAS CERÂMICAS – ANICER. Disponível em <<http://www.anicer.com.br>> Acesso em 21/03/2017.

ATZENI, C.; MASSIDDA, L.; SANNA, U. Comparison between rheological models for portland cement pastes. *Cement and Concrete Research*, Amsterdam, v. 15, n. 3, p. 511-519, May. 1985.

AZEVEDO, G. O. D., KIPERSTOK, A., MORAES, L. R. S. **Resíduos da Construção Civil em Salvador: Os Caminhos para uma Gestão Sustentável**. Salvador, 2006.

BARBOSA, M. P. et al. Determinação de parâmetros reológicos de argamassas e concreto através de técnicas alternativas. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 4, n. 3, p. 440-480, ago. 2011.

BANFILL, P. F. G. Rheological methods for assessing the flow properties of mortar and related material. **Construction and Building Material**, v8, n.1, p. 43-49, 1994.

BIBM, CEMBUREAU, EFCA, EFNARC. The European Guidelines for Self-compacting Concrete. Specification, Production and Use, 2005.

BETIOLI, A. M. **Influência dos polímeros MHEC e EVA na hidratação e comportamento reológico de pastas de cimento Portland**. 2007. 211 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

BOSILJKOV, V.B. *Scc mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler*. In: *Cement and Concrete Research*, n. 33, p.1279-1286, 2003.

BRETAS, R. E. S.; D'AVILA, M. A. **Reologia de polímeros fundidos**. 2. ed. São Carlos: Ed. da UFSCar, 2005. 257 p.

BUI, V. K.; MONTGOMERY, D.; HINCZAK, I.; TURNER, K. *Rapid testing method for segregation resistance of self-compacting concrete*. In: **Cement and Concrete Research**, n. 32, p.1489-1496, 2002.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concreto produzido com agregado reciclado, considerando-se a variabilidade de composição do RCD**. São Carlos-SP, 2007. 280p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

CAMARGOS, U. A. Concreto Auto Adensável e Autonivelante. *Téchne*, São Paulo, n. 59, p. 04-05, fevereiro 2002.

COPPOLA, L. *Self-compacting concrete*. In: **Concrete Technology**, p. 42-47, 2002.

CARASEK, H. Argamassas. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais**. V 02. 2ª edição. IBRACON. São Paulo, 2010.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R.G.; JOHN, V.M. **Caracterização reológica de argamassas pelo método do squeeze flow**. Anais do VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Florianópolis, 2005.

CASTRO, A. L. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. 2007. 303 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CAVALCANTI, D. J. H. **Contribuição ao estudo das propriedades do concreto auto adensável visando sua aplicação em elementos estruturais**. Maceió, 2006. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2006.

CHIDIAC, S. E. et al. Controlling the quality of fresh concrete – a new approach. **Magazine of Concrete Research**, London, v. 52, n. 5, p. 353-363, Oct. 2000.

CHOI, P.; YEON, J. H.; YUN, K-K. Air-void structure, strength, and permeability of wet-mix shotcrete before and after shotcreting operation: The influences of silica fume and air-entraining agent. **Cement & Concrete Composites**, v. 70, p. 69-77, 2016.

CINCOTTO, M. A. Reações de Hidratação e Pozolânicas. In: **Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações**. Editor Geraldo C. Isaia, v01. 1ª Edição. Editora Ibracon. São Paulo 2011.p. 185-233.

CLAISSE, P. A.; LORIMER, O.; AL OMARI, M. Workability of cement pastes. **ACI Materials Journal**, Detroit, v. 98, n. 6, p. 476-482, Nov.-Dec. 2001.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente (2002). **Resolução Nº 307, de 5 de julho de 2002**. Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Habitação. Publicada no Diário Oficial da União em 17/07/2002.

CORDEIRO, C. G. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana de açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais no concreto**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CUNHA, A. C. **Caracterização e estudo de aplicação de rejeito catalítico de unidade de FCC como material pozolânico**. 2012. 110 f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Curso de P's-Graduação em Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2012.

CURTIUS, A. J.; FIEDLER, H. D. Análise de metais e qualidade analítica. **Meio ambiente e carvão: impactos da exploração e utilização**. Porto Alegre: FEPAM, 2002. p. 211-227.

DACZKO, J. A. **Stability of self-consolidating concrete, assumed or ensured? Conference Proceedings**: First North American Conference on the Design and Use of SelfConsolidating Concrete. Master Builders, Inc., Cleveland, Ohio: 2002.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais para concreto estrutural. In: **Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações**. Editor Geraldo C. Isaia, v01. 1ª Edição. Editora Ibracon. São Paulo 2005. p. 345-379.

_____. Técnicas experimentais para a o estudo da microestrutura. In: ISAIA, G. C. **Materiais de construção Civil e princípios de ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2 ed. 2010. V1, Cap 14, p. 405-438.

DIAS, J.F. **Avaliação de agregados reciclados de resíduos de fabricação de telhas de cerâmica vermelha para seu uso em camadas de baixo custo**, 2004.

Tese (Doutorado) Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

DAMINELE, B. L. **Conceitos para a formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão das partículas.** São Paulo, 2013. 237p. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013.

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. Mixture-proportioning of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research, Kidlington**, v. 32, n. 11, p. 1699-1704, Nov. 2002.

DONATELLO, S.; TYER, M.; CHEESEMAN, C. R. Comparison of test methods to assess pozzolanic activity. **Cement & Concrete Composites**. Nº 32. 121-127. 2010.

DOMONE, P, *Proportioning of self-compacting concrete – the UCL method*, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering, University College, London, pp.1-30, 2009.

DOMONE, P. L.; JIN, J. **Properties of Mortar for Self-Compacting Concrete.** Edição: A. Skarendhal; Petersson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 1st, 1999, Stockholm. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 1999, p.109-120.

DWECK, J.; BUCHLER, P. M.; COELHO, A. C. V.; CARTLEDGE, F. K. Hydration of a Portland cement blended with calcium carbonate. **Thermochimica Acta**, 2000, Vol 346(1), p. 105-113.

EMBORG, M. Rheology tests for self-compacting concrete – how useful are they for the design of concrete mix for the full scale production? Edição: A. Skarendahl; O. Petersson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 1st. 1999, Stockholm. **Proceeding...** France RILEM Publication, 1999. p.95-105.

EFNARC – THE EUROPEAN FEDERATION OF SPECIALIST CONTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS. **The European guidelines for selfcompacting concrete.** Specification, production and use. Maio, 2005.

EUROPEN FEDERATON FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (EFNARC). *Specification and guidelines for self-compacting concrete.* In: **EFNARC**. Fevereiro, 2002.

FARIAS, A.; COSTA, D.; FREITAS, L.; CÂNDIDO, G. Utilização de eco inovação no processo de manufatura de cerâmica vermelha. **Revista de Administração e Inovação**, v. 9, n. 3, p. 154-174, 2012.

FENATO, T. M. et al. **Verificação da existência de propriedades auto adensáveis em concretos de alto desempenho, através de ensaios experimentais.** Seminário: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, v. 28, n. 1, p. 65-78, 2007.

FERRARIS, C. F.; GAIDIS, J. M. Connection between the rheology of concrete and rheology of cement paste. **ACI Materials Journal**, Farmington Hills, v. 89, n. 4, p. 388-393, July-Aug. 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**, Kidlington, v. 31, n. 2, p. 245-255, 2001.

FERRARIS, C., F. *Measurement of the Rheologic Properties of High Performance Concrete State of the Art Report. In: CJournal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, v.104, n.5, p. 462 – 478, 1999.

_____. **Measurement of rheological properties of high performance concrete: state of the art report**. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, July 1996. 34 p. (NISTIR, 5869)

FILHO, R. S. A. **Avaliação da influência do direcionamento de fibras de aço no comportamento de concreto auto adensável aplicado em elementos planos**. 2016 106p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

FONSECA, A. P. **Estudo comparativo de concretos com agregado graúdo reciclado de telha cerâmica e agregado graúdo natural**. 2006. 223p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, 2006.

FRAGA, M. F. **Panorama da geração de resíduos da construção civil em Belo Horizonte: Medidas de minimização com base em projeto e planejamento de obras**. 2006. 75p. Mestrado (Dissertação). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.

FREITAS, S.; OLIVEIRA, J. Avaliação dos resíduos da indústria de cerâmica vermelha como insumo para a produção de cimento Portland. **Revista Ambiental**, v. 2, n. 1, p. 80-87, 2016.

GETTU, R. AGULLÓ, L. **Estado del arte del hormigón autocompactable y su caracterización**. Informe C4745/1. Departamento de engenharia de construção E.T.S. de engenheiros de caminhos, canais e portos. Universidade Politècnica da Catalunya. Barcelona, 2003.

GIROTTI, L. S. **Investigação da retração plástica e da fissuração da argamassa do concreto auto-adensável**. 2012. 226 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

GOBBI, A. **Atividade pozolânica de adições minerais pelas NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012: uma análise crítica a partir de métodos complementares**. 2014. 146p. Dissertação (Mestrado). Materiais e Estruturas, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

GOMES, P.C.C. **Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete**. 2002. 139p. Tese - Escola Técnica Superior D'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 2002.

GONÇALVES, J. P. **Desenvolvimento e caracterização de concreto de baixo impacto ambiental e contendo argila calcinada e areia artificial**. 2005. 273p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil).- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

HANSEN, D. M. **Avaliação das propriedades pozolânicas de um resíduo de cerâmica vermelha para emprego como material cimentício**. 2016. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. São Leopoldo, 2016.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1992. 349p.

JIN, J., DOMONE, P. L. J.; Relationships between the fresh properties of SCC and its mortar component. In: SKARENDAHL, A.(Ed.), *The 1st North American Conference on the design and use of self-consolidating concrete*, p. 33 – 38, Chicago, 2002.

KASMIERCZAK, C. S. Produtos de cerâmica vermelha. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais**. V 01. 2ª edição. IBRACON. São Paulo, 2010.

KLUG, Y.; HOLSCHEMACHER, K. Compareson of the hardened properties of self-compacting and normal vibrated concrete. Edição: Wallevik; I. Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3rd. 2003, Reykjacik. **Proceeding...** France RILEM Publication, 2003. p.596-605.

LISBÔA, E.M. **Obtenção do Concreto Auto-Adensável Utilizando Resíduo do Beneficiamento do Mármore e Granito e Estudo de Propriedades Mecânicas**. - Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2004. 121p

LU, G.; WANG, K.; RUDOLPHI, T. J. *Modeling rheological behavior of highly flowable mortar using concepts of particle and fluid mechanics*. In: **Cement and Concrete Composites**, n.30, p. 1-12, 2008.

LÚXAN, M. P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. **Cement and Concrete Reserch**, Janeiro 1989. Vol(1). p. 63-68.

MADALENA, L. M. N. **Influência do teor de pozolana na reatividade e nas caracyerísticas mecânicas de argamassas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova Lisboa, Lisboa, 2013.

MATIAS, G.; FARIA, P.; TORRES, I.; TOMÁS, A.; FERREIRA, T.; DUARTE, T. Argamassa de cal aérea com resíduo de cerâmica. In: 4º Congresso de Argamassas de Construção da APFAC. Coimbra, 2012.

MASSAZZA, F., COSTA, U. Aspects of the pozzolanic activity and properties of pozzolanic cements; **Il Cemento** 76:3-18; Jan.-March 1998.

MEHTA, P.K. Natural Pozzolan. In: **Supplementary Cementing Materials**. Ottawa: V. M. Malhotra. 1987. 427p

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994. 573p.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 667 p.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2014.

MONTANHEIRO, T. J., YAMAMOTO, J. K., KIHARA, Y. Características e propriedades pozolânicas de arenitos opalinos da Serra de Itaqueri, SP. **Revista do Instituto Geológico**. São Paulo. p.13-24, 2002.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução de Ruy Alberto Cremonini. 5a Edição. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888 p.

NUNES, S. C. B. **Betão Auto Compactável: Tecnologia e Propriedades**. 2001. 198 p. Pós-Graduação em Estruturas de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto, Porto.

OKAMURA, H. *Self-compacting High-performance concrete*. In: **Concrete International**, v.19, n.7, p. 50-54, Julho 1997.

OKAMURA, H. OZAWA, K. OUCHI, M. **Self-compacting concrete. Structural Concrete, Nº 1**. Março, 2000. pp. 3-17.

OKAMURA, H. OUCHI, M. **Self-compacting concrete. Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, Nº 1**. Abril, 2003. pp. 5-15.

OKAMURA, H. **Self-compacting high-performance concrete. Concrete International**. Julho, 1997. pp. 50-54.

OLIVEIRA, M. P. de, BARBOSA, N. P. Potencialidades de um caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento portland em argamassas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.10, n.2, p.490–496, 2006.

OLIVEIRA, C. O. **Análise das propriedades reológicas de materiais cimentícios associando o conceito de empacotamento de partículas**. 2013 141 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. São Paulo, 2013.

PEREIRA, T. A. C. **Concreto auto adensável de alta resistência com baixo consumo de cimento Portland e com adição de fibras de lã de rocha ou poliamida**. 2010 218p. Dissertação (Mestrado). Departamento de Estruturas . EESC. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

PILEGGI, R. G. et al. Novel rheometer for refractory castables. **American Ceramic Society Bulletin**, Westerville, v. 79, n. 1, p. 54-58, Jan. 2000.

PANDOLFELLI, V. C.; OLIVEIRA, I.R., STUDART, A. R., PILEGGI, R. G. **Dispersão e Empacotamento de Partículas: princípios básicos e aplicações em processamento cerâmico**. 2000, São Paulo: Fazendo Arte Editorial. 224.

PETROU, M. F. et al. A unique experimental method for monitoring aggregate settlement in concrete. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 30, n. 5, p. 809-816, May 2000.

PONTES, J. M. P. N. **Reatividade de pozolanas para argamassas e betões**. 2011, 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova Lisboa, Lisboa 2011.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. 2006. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2006.

POWERS, T. C. **The properties of fresh concrete**. New York: John Wiley & Sons, 1968. 664p.

PUCCI, R. B. **Logística de resíduos de construção civil, atendendo à resolução CONAMA 307/RB**. 2006. 137p. Dissertação (Mestrado) Departamento de Engenharia de Transporte da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

RAGO, F.; CINCOTTO, M. A. **Influência do tipo de cal hidratada na reologia de pastas**. São Paulo: EPUSP, 1999. 24 p. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, 233)

RAVINDRA GETTU; ZERBINO, R. L.; BARRAGÁN, B. E.; AGULLÓ, L. **Propuesta de Procedimientos Experimentales para la Evaluación de La Autocompactabilidad Del Hormigón Fresco**. Informe C4745/2, Departamento de Ingeniería de la Construcción, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2004.

REIS, J. F. A. **Determinação de parâmetros reológicos de concretos através do ensaio de abatimento de tronco de cone modificado : estudo de caso**. 2008. 177 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação, Ilha Solteira, 2008.

RIBEIRO, C. C., PINTO J. D. S. e STARLING, T. **Materiais de Construção Civil**. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2006.

ROMANO, R. C. de O; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G. Propriedades do concreto no estado fresco. I: **Concreto ciência e tecnologia**. Editor Geraldo C. Isaia, v01. 1 ed. São Paulo. 2011. p. 453-497.

ROUSSEL, N.; LE ROY, R. The Marsh cone: a test or a rheological apparatus? **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 35, n. 5, p. 823-830, 2005.

SANTOS, S. **Produção e Avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho**. 2006, 267p. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2 ed. São Paulo, 1989. 408p.

SANTOS, R. F. C. **Estudo de concretos auto-adensáveis, com adição de aditivo incorporador de ar, utilizados na produção de paredes de concreto armado moldadas no local**. 2012. 109 f. Dissertação (Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2012.

SCHWARTZENTRUBER, L. D. A. ROY, R. CORDIN, J. **Rheological behaviour of fresh cement pastes formulated from a self-compacting concrete (SCC)**. *Cement and Concrete Research*, 36. 2006. pp. 1203-1213.

SHI, C., et al, "Design and application of self-compacting lightweight concrete", In: SCC2005-China: 1st international symposium on design, performance and use of self-consolidating concrete. RILEM Publications SARL, 2005.

SIEDLARZ, A. K., GOLASZEWSKI, J.: **Rheological properties of High Performance Self-Compacting Concrete: Effects of composition and time**, *Construction and Building Materials*. v. 115, pp. 705-715, 2016.

SILVA, M. G. Cimento Portland com Adições Minerais. In: **Materiais de Construção Civil e Princípios de Engenharia**. Editor Geraldo C. Isaia, v01. 1ª Edição. São Paulo 2005. p. 761-763.

SILVA, M. G. Cimento Portland com Adições Minerais. In: **Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais**. Editor Geraldo C. Isaia, v01. 1 ed. São Paulo. 2005. p. 761-763.

_____. Cimento Portland com Adições Minerais. In: **Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais**. São Paulo. Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON) 2 ed. 2010. v 1, cap 25. p. 791-823.

SILVA, W. G. **Avaliação de concreto auto adensável produzido com agregado reciclado de telha**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2012. 134p.

SOUZA, P. S. L., DAL MOLIN, D. C.C. Estudo da viabilidade do uso de argilas calcinadas, como metacaulim de alta reatividade (MCAR). **Revista Engenharia Civil**. Guimarães, Portugal, n. 15, p.45-54.2002.

SU, N.; HSU, K.C.; CHAI, H.W. *A simple mix design method for self-compacting concrete*. In: **Cement and Concrete Research**, n. 31, p. 1799-1807, 2001.

TANNER, R. I. **Engineering rheology**. 2. ed. New York: Oxford University Press, 2000. 559 p.

TATTERSALL, G. H. Workability and quality control of concrete, E & FN Spon, London, 1991.

TATTERSALL, G. H.; BANFILL, P. F.G. **The rheology of fresh concrete**. London: Pitman, 1983. 347p

TORALLES-CARBONARI, B. M.; GETTU, R.; AGULLÓ, A.; ACEÑA, V. **A Synthetic Approach for the Experimental Optimization of High Strength Concrete**. 4th International Symposium on Utilization of High Strength/Higt Performance Concrete, 1996, p. 161-167, Paris. F. De Larrard and R. Lacroix, Laboratoire Central des Ponts e Chaussées (editores).

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto auto adensável**. 1. ed. São Paulo: Pini, 2008. 142 f.

TUTIKIAN, B. F. DAL MOLIN, D. CREMONINI, R. **Viabilização econômica do concreto auto adensável**. 12º Concurso Falcão Bauer. 2005.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P.; **Dosagem dos Concretos de Cimento Portland**. In: ISAIA, Geraldo C. (Ed.). *Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo: Ipsis, 2011. P. 416 – 451.

TUTIKIAN, B. F. et al. *Lightweight Concrete With Eva Recycled Aggregate For Impact Noise Attenuation*. **Materiales de Construcción**, v. 19, n. 2, p. 75–88 , 2012.

VALENZUELA, F. A. DE O.; CHODOUNSKY, M. A. **Novos conceitos na produção e concretos de alto desempenho para pisos industriais**. ANAPRE – Associação Nacional de Pisos e Revestimentos de Alto Desempenho. 2010.

VIEIRA, A., de A. P. **Estudo de aproveitamento de resíduo de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concreto**. 2005. 127p Dissertação (Mestrado). Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba. Paraíba, 2005.

WALLEVIK, J. E. *Relationship between the Bingham parameters and slump*. In: **Cement and Concrete Research**, n.36, p. 1214 – 1221, 2006.

WALLEVIK, O. H. **Description of fresh concrete properties by use of two-point workability test instrument**, 1983. Dissertação (mestrado em Engenharia) – *The Norwegian Institute of technology*, Norway, 1983.

WALLEVIK, O. H., WALLEVIK, J. E. “Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes”, *Cement and Concrete Research*, n.41, pp. 1279 – 1288, 2011.

WU, H.; LIU, Z.; SUN, B.; YIN, J. Experimental investigation on freeze-thaw durability of Portland cement pervious concrete (PCPC). **Construction and Building Materials**, v. 117, p. 63-71, 2016.