

Rennan Medeiros

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DA
CINZA VOLANTE NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO
ESTADO FRESCO E ENDURECIDO: PROPOSTA DE MÉTODO
SIMPLIFICADO EM ARGAMASSA**

Dissertação submetida ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade
Federal de Santa Catarina para a
obtenção do Grau de mestre em
Construção Civil.
Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto
Prudêncio Jr.

Florianópolis
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Medeiros, Rennan

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DA
CINZA VOLANTE NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO
ESTADO FRESCO E ENDURECIDO : PROPOSTA DE MÉTODO
SIMPLIFICADO EM ARGAMASSA / Rennan Medeiros ;
orientador, Luiz Roberto Prudêncio Jr., 2018.
249 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Materiais Cimentícios
Suplementares. 3. Cinza volante. 4. Dosagem de
concreto. I. Prudêncio Jr., Luiz Roberto. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Rennan Medeiros

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DA
CINZA VOLANTE NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO
ESTADO FRESCO E ENDURECIDO: PROPOSTA DE MÉTODO
SIMPLIFICADO EM ARGAMASSA**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de *mestre*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Florianópolis, 09 de agosto de 2018.

Prof. EneDir Ghisi, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Luiz Roberto Prudêncio Jr., Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.^a Janaíde Cavalcante Rocha, Dr.^a
Moderadora
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Fernando Pelisser, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.^a Denise Carpena Coitinho Dal Molin, Dr.^a
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (videoconferência)

O sucesso não é obtido por acaso, é resultado de muita resiliência e persistência.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Elita de Medeiros, amiga e parceira no desenvolvimento deste e de muitos outros trabalhos científicos. Obrigado pela confiança na minha capacidade, até mesmo quando eu já não confiava tanto assim.

As minhas irmãs Rayani Medeiros e Rayssa Medeiros pelo incentivo e apoio, mesmo não sabendo muito do que se tratava “[...] não deu certo ainda, vai ensaiar mais, então!”.

Ao meu orientador, Professor Luiz Roberto Prudêncio Jr. que, mesmo sem me conhecer pessoalmente, estando em seu último pós-doutorado na *University of California, Berkeley*, aceitou-me como seu orientando de mestrado. Muito obrigado pela oportunidade e, acima de tudo, pelos ensinamentos ímpares, por mostrar diferentes formas de pensar na solução para um mesmo problema, além da confiança depositada para o desenvolvimento desta pesquisa, mesmo que longe dos seus olhos.

Ao amigo Denis Fernandes Weidmann que mesmo com pouco tempo de convivência fez o contato inicial com o Professor Prudêncio, Muito Obrigado!

Ao Professor Maurício Motta e à Professora Lucimara Schambeck pelo incentivo, desde a graduação, para continuar na carreira acadêmica. Hoje colegas de docência, mas eternamente meus mestres.

Aos meus alunos do LEC – Laboratório de Engenharia Civil da UNISUL, André Mello, Eloisa Anacleto, Matheus Speck, Nathanael Prange e Thomas de Medeiros, pelo essencial apoio na preparação das amostras de cinza volante e na realização dos exaustivos ensaios em concreto.

A minha orientada durante sua graduação, hoje parceira de LEC e, acima de tudo amiga, Beatriz Anselmo, muito obrigado por toda ajuda com este trabalho e na colaboração com todos os outros, até mesmo em fins de semana e feriados.

A minha parceira para todos os momentos, Monica Martins, muito obrigado pela ajuda durante as madrugadas fazendo ensaios de ciclos de 22 horas para esta pesquisa, e em muitos outros trabalhos. Agradeço, também, pela compreensão de minha ausência, quando me dedicava ao desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao grande amigo Engenheiro Cristian Vitoreti Fernandes pela ajuda com quase 2 toneladas de agregados para o desenvolvimento desta pesquisa.

A Wagek Pré-moldados, na pessoa de Fernando Alano, pela disponibilização de mais de 1 tonelada de cimento e alguns litros de aditivo para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao amigo Helmuth Lima pela disponibilização das Cinzas volantes moídas comercial e natural provenientes da UTL B e C.

Ao aluno de graduação Guilherme de Oliveira, pelas amostras das demais usinas instaladas no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda.

Ao amigo Thiago Delfino, pelas longas viagens à Florianópolis para assistir às aulas das disciplinas deste mestrado. Muito obrigado!

À Universidade do Sul de Santa Catarina, pelas instalações dos laboratórios para o desenvolvimento desta pesquisa.

To my friend who, even a few miles away in Denmark, can help with his mathematical brilliance. Thank you so much, Juliano Souza!

Ao meu amigo Danilo Mendonça, pela constante ajuda e incentivo para concluir esta etapa, além sua disposição para ler os originais deste trabalho, apontando correções e sugestões inestimáveis. Muito obrigado!

As colegas do Grupo de Pesquisa em Engenharia e Ciência dos Materiais (GPmat - UNISUL), Dr Jonathan Alexsander Bork e Dr^a Michelle Medeiros, pelos conhecimentos compartilhados e pelo incentivo e motivação para conclusão deste trabalho.

Agradeço ao Professor Fernando Pelisser e as Professoras Janaíde Rocha e Denise Dal Molin por se disporem a participar da banca avaliadora desta dissertação, fazendo suas considerações e expondo seu ponto de vista quanto a esta pesquisa.

Enfim, a todos que, de alguma forma, contribuíram, ajudando ou apoiando ao longo destes últimos anos, para que esta dissertação fosse concluída.

Muito obrigado!

RESUMO

A Cinza Volante (CV) tem sido cada vez mais utilizada para produção de concreto em substituição parcial ao cimento Portland. Porém, por se tratar de um subproduto das termelétricas, seu desempenho pode ser variável em função de sua origem e beneficiamento, comprometendo o seu uso quando realizado sem um controle de suas características. Frente a esta situação, foram estudadas nesta dissertação as diversas CV geradas no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda (CTJL) das Usinas Termelétricas UTL A, UTL B e UTL C. Estas CV foram investigadas sob diferentes condições de suas partículas – na forma natural, sua fração retida na peneira 45 μm , a fração passante na malha 45 μm e nela retida, submetida à moagem em moinho de bolas até a obtenção da área específica de Blaine da sua fração passante. Foram realizadas caracterização química e física, além da determinação da capacidade de fixar o Ca(OH)_2 , de cada CV-condição das partículas. Também foi realizado um estudo em argamassa utilizando a areia padrão como agregado, e outro utilizando a combinação de areia grossa de britagem e areia fina de cava objetivando verificar a influência do tipo e teor da CV na demanda de água das e resistência à compressão das misturas. Posteriormente foram realizados ensaios em nove famílias de concreto, com os mesmos objetivos, a fim de estabelecer correlações com os estudos em argamassa. Estes estudos foram realizados com 10, 20, 30 e 35% de substituição ao cimento em volume absoluto. Como resultado desse estudo, pôde-se concluir que a capacidade de fixação do Ca(OH)_2 é expressivamente influenciada pela finura do Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) e pelo teor de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . O uso de areia padrão para avaliação do desempenho das MCS por meio de estudos em argamassa não é o mais indicado, pois os teores de ar incorporados são muitos altos. Observou-se que a demanda de água do concreto pode ser prevista pelos estudos em argamassa pela mesa flow com boa precisão. O teor de argamassa do concreto pode ser reduzido com o uso de CV e a melhora em seu indicador de bombeabilidade é considerável, além de apresentar expressivo aumento da resistência à compressão em idades superiores a 28 dias. Com os resultados obtidos foi possível propor um método de avaliação da Suplementares MCS

em concreto por meio de estudos em argamassa. Desta forma, os resultados mostraram que o uso de CV com baixo teor de carbono e com partículas menores que 45 μm contribuem para a melhora das propriedades tanto no estado fresco quanto endurecido do concreto. Verificou-se que o desempenho de MCS em concreto pode ser previsto satisfatoriamente com ensaios em argamassa. Além disso, concluiu-se que a CV com maior potencial de utilização, com menor necessidade de beneficiamento, é a proveniente da mistura das CV UTL B e UTL C.

Palavras-chave: Cinza volante. Atividade pozolânica. Propriedades do concreto. Estado fresco. Estado endurecido.

ABSTRACT

Fly Ash (FA) has been increasingly used in production of concrete as partial replacement of Portland cement. However, due to the provenience of FA as a by-product of thermoelectric plants, there are still some concern when using it, since its performance can be affected by its origin and pre-treatments, imposing a challenge of application when carried out without a control of its characteristics. For this reason, this dissertation studies the various FA generated in the Jorge Lacerda Thermoelectric Complex (CTJL) of the UTL A, UTL B and UTL C Thermoelectric Power Plants. The CTJL's FA were investigated under different conditions of their particles, being: the natural form, the retained fraction in 45 μm mesh, the passing fraction of 45 μm mesh and the grinded retained, which was ground in a ball mill until the same Blaine's specific area of the passing fraction was achieved. Chemical and physical characterization were performed, as well as the ability to fix $\text{Ca}(\text{OH})_2$, for each fraction of these FA samples. Two mortar studies were carried out, the first using standard sand as aggregate and the second using the combination of coarse milled sand and fine mined sand, aiming on determine the effect of FA type and content on the needed water volume and the compression resistance of the concrete mixtures. Subsequently, tests with the same purpose were performed on nine concrete families to establish correlations with the mortar studies, which were conducted using 10, 20, 30 and 35% of total volume cement replacement. Accordingly, it was possible to conclude that the $\text{Ca}(\text{OH})_2$ fixation capacity is significantly influenced by the Supplementary Cementitious Materials (SCM) particle size and the SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3 content. The use of standard sand for Supplementary Cementitious Materials (SMC) evaluation on mortar studies is not the preferred one because the air contents within are very high. It was determined that the needed water for the concrete can be predicted by the mortar studies on the Flow Table with reseanable precision. The concrete's mortar content can be reduced by using FA and the improvement of pumpability is considerable, besides an expressive increase of the compressive resistance for curing times higher than 28 days. By using the obtained results, it was possible to suggest an evaluation method for the influence of each SCM employing mortar studies. Hence, the results showed that the use of FA <45 μm with low carbon content contribute to the enhancement of both

the fresh and hardened concrete properties. It was verified that the performance of concrete SMC can be predicted by mortar testing with enough precision. Furthermore, it was determined that the FA with greater potential, with less pretreatment required is the one coming from the mixture of the UTL B and UTL C fly ashes.

Keywords: Fly ash. Pozzolanic activity. Concrete properties. Fresh concrete. Hardened concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos Materiais Cimentícios Suplementares (MCS)	33
Figura 2 – Microscopia eletrônica de varredura de cenosfera ...	40
Figura 3 – Microscopia eletrônica de varredura de CV	40
Figura 4 – Esquema de um equipamento genérico para análise térmica diferencial (DTA).....	52
Figura 5 – Curva de análise termogravimétrica (TGA) e análise termogravimétrica diferencial (DTG) – Pasta com 45% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e 55% de cinza volante, na relação água-sólidos de 0,60	53
Figura 6 – Curva de saturação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ em função da alcalinidade.....	58
Figura 7 – Difratoograma da evolução da reação pozolânica de pasta de cinza volante- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ em 5 idades.....	60
Figura 8 – Esquema de funcionamento de uma usina termelétrica	64
Figura 9 – Comparativo do comportamento da resistência à compressão de concretos de duas classes de resistência com diferentes teores de CV em diferentes idades.....	72
Figura 10 – Resistência à compressão de misturas com diferentes teores de CV em duas relações a/ag.....	73
Figura 11 – Distribuição granulométrica areia de britagem e areia de cava	79
Figura 12 – Distribuição granulométrica brita	79
Figura 13 – Organograma principal da pesquisa.....	82
Figura 14 – Diferentes CV investigadas nesta pesquisa	85
Figura 15 – Sequência ilustrativa do ensaio de chappelle modificado	87
Figura 16 – Organograma do processo de beneficiamento das cinzas volantes para obtenção das amostras R, P e M – apresentadas na Figura 14	89
Figura 17 – Sequência dos ensaios em argamassa.....	95
Figura 18 – Sequência dos ensaios em concreto.....	100
Figura 19 – Diagrama de dosagem – modelo de comportamento proposto inicialmente	103
Figura 20 – Diagrama de dosagem dos concretos de cimento Portland	104
Figura 21 – Diagrama de dosagem para CCV.....	105
Figura 22 – Relação da capacidade de fixação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ com teor de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ com área específica de Blaine	119

Figura 23 – Correlação entre a capacidade de fixação do $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ e (a) área específica (b) teor de $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$	120
Figura 24 – Relação entre o espalhamento estático e dinâmico com o teor de ar das argamassas com areia padrão (a) cinzas volantes UTL A (b) cinzas volantes UTL B (c) cinzas volantes UTL C (d) cinzas volantes UTL B e C.....	124
Figura 25 – Areia padrão – Correlação entre o teor de ar e (a) <i>Flow</i> 0 (b) <i>Flow</i> 5 (c) <i>Flow</i> 10	133
Figura 26 – Areia padrão – Correlação entre a área específica e (a) <i>Flow</i> 0 (b) <i>Flow</i> 5 (c) <i>Flow</i> 10	135
Figura 27 – Relação entre a resistência à compressão com cura em 23 °C e 38 °C com o teor de ar das argamassas com areia padrão (a) Cinzas volantes UTL A (b) Cinzas volantes UTL B (c) Cinzas volantes UTL C (d) Cinzas volantes UTL B e C	138
Figura 28 – Areia padrão – Correlação entre o teor de ar e (a) Resistência à compressão 23 °C (b) Resistência à compressão 38 °C.....	144
Figura 29 – Areia padrão – Correlação entre a área específica e (a) Resistência à compressão 23 °C (b) Resistência à compressão 38 °C.....	146
Figura 30 – Relação entre o espalhamento estático e dinâmicos com o teor de ar das argamassas com areia padrão, com cinza volante UTL B e C (a), Natural (b), Retida 45 µm (c), Passante 45 µm (d), Retida 45 µm e moída (e), e Moída comercial.....	148
Figura 31 – Areia de cava e de britagem – Correlação entre o teor de ar e (a) <i>Flow</i> 0 (b) <i>Flow</i> 5 (c) <i>Flow</i> 10.....	152
Figura 32 – Areia de cava e de britagem – Correlação entre a área específica e (a) <i>Flow</i> 0, (b) <i>Flow</i> 5 e (c) <i>Flow</i> 10.....	154
Figura 33 – Relação entre a resistência à compressão com cura em 23 °C e 38 °C, com o teor de ar das argamassas com areia padrão com cinza volante UTL B e C (a), natural (b), Retida 45 µm (c), Passante 45 µm (d), Retida 45 µm e moída (e) e Moída comercial	156
Figura 34 – Areia de cava e de britagem – Correlação entre o teor de ar e (a) Resistência à compressão 23 °C, e (b) Resistência à compressão 38 °C.....	159
Figura 35 – Areia de cava e de britagem – Correlação entre a área específica e (a) Resistência à compressão 23 °C, e (b) Resistência à compressão 38 °C.....	161
Figura 36 – Diagrama de dosagem – Família de concreto referência.....	183

Figura 37 – Diagrama de dosagem – Família de concreto 10% CV UTL B e C N	185
Figura 38 – Diagrama de dosagem – Família de concreto 20% CV UTL B e C N	187
Figura 39 – Diagrama de dosagem – Família de concreto 30% CV UTL B e C N	189
Figura 40 – Diagrama de dosagem – Família de concreto 35% CV UTL B e C N	191
Figura 41 – Diagrama de dosagem – Família de concreto 10% CV UTL B e C Mc	193
Figura 42 – Diagrama de dosagem – Família de concreto 20% CV UTL B e C Mc	195
Figura 43 – Diagrama de dosagem – Família de concreto 30% CV UTL B e C Mc	197
Figura 44 – Diagrama de dosagem – Família de concreto 35% CV UTL B e C Mc	199
Figura 45 – Correlação entre a demanda de água inicial do concreto (kg/m^3) e (a) Flow 0 e (b) Flow 10	205
Figura 46 – Correlação entre a resistência à compressão em argamassa aos 28 dias com cura a 23 °C e a resistência à compressão aos 28 dias em concreto	206
Figura 47 – Correlação entre a resistência à compressão em argamassa aos 28 dias com cura a 38 °C e a resistência à compressão aos 63 dias em concreto	207
Figura 48 – Fluxograma do método proposto para avaliação preliminar do desempenho de MCS para uso em concreto	211

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química de uma cinza volante brasileira	38
Tabela 2 – Intervalo dos componentes presentes nas classes F e C das cinzas volantes	39
Tabela 3 – Classificação da atividade pozolânica pelo método de Luxán.....	54
Tabela 4 – Proporção dos consumos das diferentes fontes para geração de energia elétrica.....	62
Tabela 5 – Capacidade instalada do Complexo Jorge Lacerda.	64
Tabela 6 – Propriedades físicas do cimento Portland	76
Tabela 7 – Propriedades químicas do cimento Portland.....	76
Tabela 8 – Composição mineralógica potencial do cimento Portland (Método de Bogue).....	77
Tabela 9 – Caracterização dos índices físicos dos agregados ..	78
Tabela 10 – Características do aditivo <i>mira flow 973</i>	80
Tabela 11 – Traços unitários em volume absoluto das argamassas, tanto com areia padrão quanto com as combinações de areia de britagem e de cava.....	90
Tabela 12 – Equações de comportamento do concreto utilizadas para construção dos diagramas de dosagem.....	108
Tabela 13 – Caracterização química das CV	112
Tabela 14 – Capacidade de fixação do Ca(OH)_2 das CV determinada pelo método de Chapelle modificado	114
Tabela 15 – ANOVA – influência da condição e da Usina Termelétrica (UTL) de origem na capacidade de fixação do Ca(OH)_2 determinado pelo método de Chapelle modificado ...	115
Tabela 16 – Caracterização física e tempos de moagem das CV	117
Tabela 17 – Coeficientes que investigam a correlação entre uma variável dependente e outra independente – Figura 23 (a) e (b)	121
Tabela 18 – ANOVA – influência da condição, da Usina Termelétrica (UTL) de origem e do teor de substituição nas propriedades no estado fresco das argamassa com areia padrão	132
Tabela 19 – Coeficientes que investigam a correlação entre uma variável dependente e outra independente – figura 25 (a), (b) e (c)	134

Tabela 20 – Coeficientes que investigam a correlação entre uma variável dependente e outra independente – figura 26 (a), (b) e (c)	136
Tabela 21 – ANOVA – influência da condição, da Usina Termelétrica (UTL) de origem e do teor de substituição nas resistências à compressão com cura a 23 °C e 38 °C – Areia padrão.....	143
Tabela 22 – Coeficientes que investigam a correlação entre uma variável dependente e outra independente – Figura 28 (a) e (b)	145
Tabela 23 – Coeficientes que investigam a correlação entre uma variável dependente e outra independente –Figura 29 (a) e (b)	147
Tabela 24 – ANOVA – Influência da condição e do teor de substituição nas propriedades no estado fresco das argamassas com areia de britagem e areia de cava.....	151
Tabela 25 – Coeficientes que investigam a correlação entre uma variável dependente e outra independente – Figura 31 (a), (b) e (c)	153
Tabela 26 – Coeficientes que investigam a correlação entre uma variável dependente e outra independente – Figura 32 (a) e (b)	155
Tabela 27 – ANOVA – Influência da condição da Usina Termelétrica (UTL) de origem e do teor de substituição nas resistências à compressão com cura a 23 °C e 38 °C das argamassas com areia de britagem e areia de cava.....	158
Tabela 28 – Coeficientes que investigam a correlação entre uma variável dependente e outra independente – Figura 34 (a), (b) e (c)	160
Tabela 29 – Coeficientes que investigam a correlação entre uma variável dependente e outra independente – Figura 35 (a) e (b)	162
Tabela 30 – Resultados da avaliação das propriedades no estado fresco e endurecido para a família de concreto referência	164
Tabela 31 – Resultados da avaliação das propriedades no estado fresco e endurecido para a família de concreto 10% CV UTL B e C N	166
Tabela 32 – Resultados da avaliação das propriedades no estado fresco e endurecido para a família de concreto 20% CV UTL B e C N	168

Tabela 33 – Resultados da avaliação das propriedades no estado fresco e endurecido para a família de concreto 30% CV UTL B e C N.....	169
Tabela 34 – Resultados da avaliação das propriedades no estado fresco e endurecido para a família de concreto 35% CV UTL B e C N.....	171
Tabela 35 – Resultados da avaliação das propriedades no estado fresco e endurecido para a família de concreto 10% CV UTL B e C Mc.....	172
Tabela 36 – Resultados da avaliação das propriedades no estado fresco e endurecido para a família de concreto 20% CV UTL B e C Mc.....	174
Tabela 37 – Resultados da avaliação das propriedades no estado fresco e endurecido para a família de concreto CV UTL B e C Mc 30%	175
Tabela 38 – Resultados da avaliação das propriedades no estado fresco e endurecido para a família de concreto 35% CV UTL B e C Mc.....	177
Tabela 39 – Razão entre as resistências de cada família de concreto e a família referência.....	178
Tabela 40 – ANOVA – Influência do traço, da família e idade na razão entre a resistência de cada família e a família referência	179
Tabela 41 – Equações de comportamento e R^2 – Família de concreto referência.....	182
Tabela 42 – Equações de comportamento e R^2 – Família de concreto 10% CV UTL B e C N.....	184
Tabela 43 – Equações de comportamento e R^2 – Família de concreto 20% CV UTL B e C N.....	186
Tabela 44 – Equações de comportamento e R^2 – Família de concreto 30% CV UTL B e C N.....	188
Tabela 45 – Equações de comportamento e R^2 – Família de concreto 35% CV UTL B e C N.....	190
Tabela 46 – Equações de comportamento e R^2 – Família de concreto 10% CV UTL B e C Mc	192
Tabela 47 – Equações de comportamento e R^2 – Família de concreto 20% CV UTL B e C Mc	194
Tabela 48 – Equações de comportamento e R^2 – Família de concreto 30% CV UTL B e C Mc	196
Tabela 49 – Equações de comportamento e R^2 – Família de concreto 35% CV UTL B e C Mc	198

Tabela 50 – Comparativo de traços para diferentes f_{ck} com as famílias de concreto (a) 30 MPa, (b) 35 MPa, (c) 40 MPa, e (d) 45 MPa	202
Tabela 51 – Coeficientes que investigam a correlação entre uma variável dependente e outra independente – Figura 45, Figura 46 e Figura 47	208

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al_2O_3	Óxido de alumina
Al_3^+	Íon alumínio
C_2S	Silicato dicálcico – Belita
C_3A	Aluminato tricálcico – Celita
C_3S	Silicato tricálcico – Alita
C_4AF	Ferroaluminato tetracálcico – Ferrita
CO_2	Dióxido de carbono
$Ca(OH)_2$	Hidróxido de cálcio, portlandita
Ca^{+2}	Íon Cálcio
Fe_2O_3	Óxido de ferro
K_2O	Óxido de potássio
Na_2O	Óxido de sódio
SO_3^{2-}	Íon Sulfito
SiO_2	Óxido de silício
a/ag	Relação água/aglomerante
a/c	Relação água/cimento
a/Ce	Relação água/cimento equivalente
ABNT	Associação Brasileira de Norma Técnicas
ACI	American Concrete Institute
AFm	Etringita primária
AFNOR	<i>Association Française de Normalisation</i>
AFt	Monossulfato
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	American Society for Testing and Materials
BET	<i>Brunauer, Emmett, Telle</i>
BSI	<i>British Standards Institution</i>
CaO	Óxido de Cálcio
CCV	Concreto convencional
Ce	Consumo de equivalente de cimento Portland
CENTEC	Centro Tecnológico
CH	Hidróxido de cálcio, portlandita
correspondente a 10^{-6} metro	
CP II E	Cimento Portland composto com escória
CP II Z	Cimento Portland composto com pozolana
CP III	Cimento Portland de Alto Forno
CP IV	Cimento Portland Pozolânico
CP V ARI	Cimento Portland de Alta resistência Inicial
CR	Consumo real de cimento

C-S-A-H	Silicoaluminato de cálcio hidratado
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
CTJL	Complexo Termelétrico Jorge Lacerda
CUB-SC Catarina	Custo unitário básico da construção civil em Santa Catarina
CV	Cinza Volante
DEF <i>Formation</i>	Formação de Etringita Tardia – <i>Delete Etringite</i>
DRX	Difração de raio X
DTA	Análise termogravimétrica
DTG	Análise termogravimétrica diferencial
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
fck	Resistência à compressão característica
fcm	Resistência à compressão média
GTec	Grupo de Tecnologia em Materiais e componentes à Base de Cimento
HCl	Ácido clorídrico
IPT	Instituto de Pesquisa tecnológicas de São Paulo
LAQ	Laboratório de análises químicas
LCPC <i>Paris</i>	<i>Laboratoire contral des Ponts et Chaussées de Paris</i>
LEC-TB	Laboratório de Engenharia Civil
M	mol/litro
m	Relação unitária de materiais secos
MCS	Materiais Cimentícios Suplementares
MgO	Óxido de magnésio
MW	Mega Watt, unidade de medida de potência
NANOTEC	Laboratório de Nanotecnologia
NBR	Norma Brasileira Registrada
pH	Potencial hidrogeniônico
PNE	Plano Nacional de Energia
SNIC	Sindicato Nacional da Industria de Cimento
SOTELCA	Sociedade Termelétrica de Capivari
TGA	Curva termogravimétrica
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UNISUL	Universidade do Sul de Santa Catarina
UTL	Usina Termelétrica
α	teor de argamassa

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Hidratação da alita – silicato tri-cálcico (C_3S)	42
Equação 2 – Hidratação da belita – silicato di-cálcico (C_2S).....	42
Equação 3 – Hidratação da celita – aluminato tri-cálcio (C_3A) formação de etringita	42
Equação 4 – Hidratação da celita – aluminato tri-cálcio (C_3A) formação de monossulfato.....	42
Equação 5 – Hidratação da ferrita – ferro aluminato tetra-cálcico (C_4AF).....	43
Equação 6 – Reação de hidratação do óxido de silício (SiO_2)...	43
Equação 7 – Reação de hidratação do óxido de silício (SiO_2) e do óxido de alumínio (Al_2O_3).....	43
Equação 8 – Reação de hidratação do óxido de silício (SiO_2), do óxido de alumínio (Al_2O_3) e do óxido de ferro (Fe_2O_3)	44
Equação 9 – Determinação do teor de óxido de cálcio pelo método de Fratini.....	57
Equação 10 – Lei de Bragg (DRX)	59
Equação 11 – Correção da quantidade de água para atingir o slump desejada	98
Equação 12 – Lei de Abrams.....	101
Equação 13 – Lei de Lyse.....	102
Equação 14 – Lei de Prizskulnik e Kirilos (Molinari).....	102
Equação 15 – Determinação da resistência média de dosagem	201
Equação 16 – Determinação do consumo de cinza volante	201
Equação 17 – Determinação do consumo de cimento real.....	201

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA	24
1.2	DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA	27
1.3	OBJETIVOS	27
1.3.1	<i>Objetivo geral</i>	28
1.3.2	<i>Objetivos específicos</i>	28
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	28
2	MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES	31
2.1	DEFINIÇÕES E CLASSIFICAÇÃO	32
2.2	CINZA VOLANTE	35
2.2.1	<i>Características físicas e químicas</i>	38
2.2.2	<i>Considerações preliminares</i>	45
2.3	ATIVIDADE POZOLÂNICA	47
2.3.1	<i>Métodos de determinação da atividade pozolânica</i>	48
2.3.2	<i>Considerações preliminares</i>	60
2.4	CENÁRIO ATUAL	62
2.4.1	<i>Complexo termelétrico Jorge Lacerda</i>	63
2.5	CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND COM CINZA VOLANTE	68
2.5.1	<i>Influência da cinza volante nas propriedades de concretos de cimento Portland no estado fresco</i>	69
2.5.2	<i>Influência da cinza volante nas propriedades de concretos de cimento Portland no estado endurecido</i>	71
3	METODOLOGIA	75
3.1	MATERIAIS	75
3.1.1	<i>Cimento Portland</i>	75
3.1.2	<i>Água de amassamento</i>	77
3.1.3	<i>Agregados</i>	77
3.1.4	<i>Cinza volante</i>	80
3.1.5	<i>Aditivos</i>	80
3.2	PROGRAMA EXPERIMENTAL	81
3.2.1	<i>Variáveis investigadas</i>	83
3.2.2	<i>Etapa 1 - Caracterização das cinzas volantes</i>	86
3.2.3	<i>Etapa 2 - Estudo em argamassa</i>	89
3.2.4	<i>Etapa 3 - Estudo em concreto</i>	96
3.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS	109
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	111
4.1	PROPRIEDADES DAS CINZAS VOLANTES	111

4.1 .1	<i>Caracterização química</i>	111
4.1.2	<i>Capacidade de fixar o Ca(OH)₂</i>	114
4.1.3	<i>Caracterização física</i>	116
4.1.4	<i>Compilação das propriedades das cinzas volantes</i>	118
4.2	ESTUDO EM ARGAMASSA	121
4.2.1	<i>Ensaio com areia padrão</i>	122
4.2.2	<i>Ensaio com combinação de areia de cava de britagem</i> 147	147
4.3	ESTUDO EM CONCRETO	163
4.3.1	<i>Diagramas de dosagem</i>	180
4.4	CORRELAÇÃO ENTRE O ESTUDO EM ARGAMASSA E O ESTUDO EM CONCRETO	204
4.5	PROPOSTA DE MÉTODO DE ENSAIOS EM ARGAMASSA PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MCS EM CONCRETO	208
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	213
5.1	CONCLUSÕES GERAIS	213
5.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	218
	REFERÊNCIAS	219
	APÊNDICE A	238
	APÊNDICE B	240
	APÊNDICE C	241

1 INTRODUÇÃO

A partir do último século, o concreto de cimento Portland vem ocupando o posto de segundo material mais consumido do mundo, ficando atrás apenas da água. Porém, aproximadamente 16% de seu volume absoluto é água, sendo então um contribuinte para o seu consumo. Este material é de fundamental importância para o desenvolvimento da humanidade, pois constitui tanto as obras de infraestrutura como pontes, túneis, viadutos e até certas rodovias, quanto os edifícios habitacionais e comerciais.

Segundo o Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC, 2017), o cimento Portland, principal constituinte do concreto, teve, no Brasil, em torno de 60 milhões de toneladas consumidas no ano de 2016. O SNIC destaca, ainda, que nenhum outro material foi tão amplamente utilizado. A produção deste cimento contribui para a emissão de gases poluentes, considerando que, ao se produzir uma tonelada de clínquer, é emitida, aproximadamente, a mesma quantidade de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera (DAL MOLIN, 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2014; SCHNEIDER, 2015; CELIK, *et al.*, 2015). Além disso, a grande quantidade de energia consumida na produção do cimento Portland, aliada à energia empregada para a decomposição do calcário, sua matéria prima básica, resulta em cerca de 3 a 8% da emissão global de CO_2 lançado na atmosfera (NANOCEM, 2016). A estimativa é de que o uso do cimento Portland deve duplicar até o ano de 2050, fazendo com que estudos para redução da emissão de gases neste seguimento se tornem cada vez mais importantes (SCHNEIDER, 2015). Com o intuito de reduzir a quantidade de cimento Portland a ser produzida, iniciou-se a busca por materiais que pudessem ser adicionados a este material sem prejudicar as propriedades do concreto no estado endurecido, como sua baixa porosidade e suas consideráveis resistências mecânicas (CELIK, *et al.*, 2015; NEVILLE, 2016).

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico que, na presença de uma quantidade mínima de água, gera silicato de cálcio hidratado (C-S-H) + portlandita (CH), pela hidratação de sua fase de silicato (C₂S e C₃S). A CH é um cristal com baixa resistência mecânica e parcialmente solúvel em água, além de ser susceptível à carbonatação quando na presença de CO₂, o que pode desencadear a redução do potencial hidrogeniônico (pH) do concreto, possibilitando a instalação de processo de corrosão da armadura. Porém, certos materiais naturais, tanto na condição encontrada na natureza quanto após serem submetidos a processo de queima, e subprodutos de outros setores industriais quando colocados em solução aquosa, na presença de portlandita, formam cristais de C-S-H semelhantes aos gerados pela hidratação da fase de silicato do cimento. Logo, seu uso promove a redução dos potenciais vazios da pasta, contribuindo para a proteção das armaduras do concreto. Contudo, ocorre certa redução no pH do concreto. Isaia (1995) comenta entre seus resultados que concretos contendo diferentes MCS em substituições de até 50% do cimento apresentam pH entre 11,9 12,3. Este intervalo está acima do valor crítico do pH para despassivação da armadura, que segundo Pourbaix (1974) é de 9,4.

Entre estes materiais, podem ser listados a cinza volante – resíduo das termelétricas a carvão, a sílica ativa – resíduo da produção de ferro silício ou de silício metálico, o metacaulim – proveniente da calcinação de argilas cauliniticas ou indústria de celulose de papel, entre outros (NEVILLE, 2016). NANOCEM (2016) destaca que estes materiais são classificados como Materiais Cimentícios Suplementares (MCS), com potencial de utilização na construção civil como substituto parcial ao cimento. Dal Molin (2011) comenta que os MCS já são utilizados nas centrais dosadoras de concreto há décadas, em substituição parcial ao cimento Portland. Além de os tipos de cimento Portland disponíveis no mercado brasileiro possuírem certas quantidades de MCS. Seus benefícios para obtenção de estruturas mais duráveis têm sido atestados em ensaios de laboratório e nas obras onde são aplicados. Contudo, as características dos MCS podem contribuir atrapalhar no desenvolvimento das propriedades do

concreto tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Entre estas características, podem ser apontadas a finura, a capacidade de fixação do CH, forma dos grãos e sua amorficidade.

Na região sul do Brasil está instalado o Complexo Termelétrico Jorge Lacerda (CTJL), que gera aproximadamente 1.500.000 (um milhão e quinhentas mil) de toneladas/ano de cinzas volantes (CV) com diferentes características. Estas variações nas características têm despertado receio nos engenheiros tecnologistas de concreto quanto ao seu uso nos concretos produzidos em central dosadora, pois isto pode desencadear expressiva variabilidade nas propriedades dos concretos produzidos, podendo comprometer elementos estruturais fundamentais para as construções que compõem. Uma alternativa para padronização destas cinzas volantes seria um processo de seleção, constatado o potencial de uso desta fração escolhida, e um processo de beneficiamento para garantir sua finura.

Também, na região sul do Brasil, grandes edifícios têm sido construídos, especificamente na cidade de Balneário Camboriú. Estas edificações, em função de suas grandes alturas e/ou grande peso, necessitam de fundações compatíveis com tais dimensões e seu somatório de cargas, garantindo, assim, a estabilidade e o funcionamento durante sua vida útil.

No decorrer da construção destes grandes elementos de fundação em concreto armado, além da preocupação estrutural, considera-se a possibilidade de ocorrência de problemas relacionados à *Tecnologia de Concreto*, ressaltando os problemas térmicos, já que se tratam de concretos massa (MEHTA; MONTEIRO, 2014; TORRES; ANDRADE, 2016). Esses problemas térmicos que ocorrem pela hidratação do cimento Portland podem desencadear retrações acentuadas e fissuração durante o resfriamento do concreto. Gibergues e Hornain (2014) comentam que, caso a temperatura exceda 65 °C, pode ocorrer a Formação de Etringita Tardia (DEF).

Alguns MCS, como a cinza volante, têm sido empregados como solução para este problema. Segundo Marques Filho (2011), os MCS são aplicados em concretos massa destinados a barragens desde o início das construções desta magnitude no Brasil e em outras partes do mundo. Contudo, de acordo com Junckes (2015), esta consideração deve ser repensada para concretos de grande volume que não são empregados em

barragens, visto que, acima de certo consumo de aglomerante (cimento Portland e MCS), a temperatura dos concretos massa não é reduzida conforme o cimento Portland é substituído por cinza volante. Graeff (2017) comenta, entre os resultados de sua pesquisa, que a hidratação das partículas de cinza volante é ativada quando a temperatura do meio em que estão ultrapassa valores de 50 °C, liberando tanto calor quanto aquele oriundo da hidratação do cimento puro. No caso de concretos massa para blocos de fundação, gradientes de temperatura desta ordem são facilmente atingidos. Logo, a hidratação da cinza volante inicia junto com a hidratação do cimento e, com isso, a substituição de cimento por cinza volante, ou outro MCS, não soluciona o problema térmico. Assim, deve-se optar por outras soluções tecnológicas para arrefecer o concreto. Por outro lado, as pesquisas desenvolvidas por Ramlochan *et al.* (2003) e Ramlochan, Thomas e Hooton (2004) apontaram que os concretos com substituição de cimento Portland por teores maiores que 20% de cinza volante e metacaulim não desencadearam a DEF, ao contrário de outras adições, como escória de alto forno e a sílica ativa, mesmo quando a temperatura do concreto ultrapassou 80 °C.

Porém, certas cinzas volantes afetam as propriedades tecnológicas do concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido (JUNCKES, 2015; SALUM, 2016). Os métodos para avaliação dos MCS em concreto enfocam apenas superficialmente as propriedades tecnológicas em estado fresco e endurecido, enfatizando somente as propriedades pozolânicas que, para certos MCS, são relevantes apenas em idades muito avançadas, quando comparadas com as especificadas nos projetos estruturais.

Pesquisas mais recentes (KOCABA; GALLUCCI; SCRIVENER, 2012; HU, 2014; ZENG; LI, 2014) destacam os compostos formados pelas reações pozolânicas, suas caracterizações químicas e microestruturais, enquanto sua influência no desempenho das propriedades tecnológicas do concreto no estado fresco e endurecido é modestamente considerada.

O CTJL, em suas três unidades geradoras, produz diferentes cinzas volantes que possuem potencial de aplicação em concretos. Assim, estudos da influência de cinzas volantes são de extrema importância, principalmente nas propriedades

tecnológicas do concreto nos estados fresco e endurecido, além de sua correlação com as propriedades químicas e físicas destas CV. Isto possibilitará maior segurança para uso destes materiais em obras correntes que, a cada dia, vêm desafiando com mais intensidade os engenheiros tecnologistas de concreto.

1.2 DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA

Cada vez mais tem se buscado aprimorar as técnicas construtivas e os materiais utilizados para construção das obras de infraestrutura, e as edificações comerciais e habitacionais. Para os materiais, esta busca é direcionada à maior durabilidade nos diferentes ambientes onde as estruturas que estes compõem são construídas. Isto vai ao encontro da maior vida útil requerida para estas construções. O que tem levado a indústria produtora de concreto a investigar o uso de MCS como substituto parcial ao cimento Portland, que, além de possuírem potencial de contribuir com o desenvolvimento das propriedades do concreto, colaboram com a redução do consumo de cimento puro, cooperando com a diminuição das emissões de gases poluentes liberadas durante a produção do cimento Portland.

Diante do exposto, investigações quanto ao potencial de uso da cinza volante em concreto têm sido cada vez mais recorrentes. Entretanto, as cinzas volantes provenientes do sul do Brasil têm apresentado desempenho aquém do desejado, o que desencadeou o interesse em otimizar suas características.

Já que a cinza volante é uma das opções para mitigar a formação de etringita tardia, e sua liberação de calor independe das suas características físicas, existe a necessidade da investigação do potencial que um processo de beneficiamento possa otimizar as características da cinza volante proveniente do complexo Jorge Lacerda. Isso pode resultar em uma cinza volante que não prejudique as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido.

1.3 OBJETIVOS

Neste item são apresentados os objetivos geral e específicos desta pesquisa.

1.3.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo geral avaliar a influência das cinzas volantes provenientes do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, submetidas ou não a um processo de moagem, nas propriedades tecnológicas do concreto no estado fresco e endurecido.

1.3.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral desta pesquisa, foram elencados os seguintes objetivos específicos:

- Investigar as propriedades químicas e físicas das CV para possibilitar a construção de correlação com os estudos em argamassa e concreto;
- Propor uma metodologia de estudo em argamassa para avaliação da influência dos MCS nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido;
- Investigar o impacto econômico na constituição de concretos com uso das cinzas volantes que apresentarem melhor desempenho no estudo em argamassa por meio da construção de curvas de dosagem de concreto;
- Identificar as melhores cinzas volantes do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda para a produção de concreto, considerando suas propriedades no estado fresco e endurecido.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos. No primeiro, é apresentada a introdução, que contempla importância, contextualização e relevância do tema selecionado para estudo, além da delimitação do problema de pesquisa, seus objetivos e estrutura.

O segundo capítulo constitui a revisão de literatura, apresentando os principais aspectos dos concretos de cimento Portland com cinza volante, a influência da cinza volante na

cinética de hidratação do cimento e os métodos consagrados para determinação da atividade pozolânica de Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) destinados ao uso em concreto.

No capítulo três, são abordados os materiais e os métodos empregados no desenvolvimento desta pesquisa. O programa experimental relatado neste capítulo foi desenvolvido especificamente para a presente pesquisa com base nos estudos bibliográficos realizados e nos estudos preliminares de laboratório.

O capítulo quatro contém a apresentação dos resultados obtidos, o tratamento estatístico para sua validação, e a análise e discussão de todos os resultados obtidos pelo programa experimental.

Por fim, o quinto capítulo contempla as considerações finais e as conclusões, bem como sugestões para trabalhos futuros.

2 MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES

Nos dias atuais não é mais considerado pertinente o uso de cimento Portland puro (NANOCEM, 2016). Inicialmente, passou-se a utilizar materiais naturais substituindo parte da quantidade de cimento. Porém, começaram a ganhar espaço outros materiais, agora resultantes de processos industriais. Em um primeiro momento, essa mudança ocorreu em razão das questões ambientais, em que apenas se promovia uma destinação para materiais residuais e poluentes de certos setores da indústria. Em momento mais atual, tal utilização é feita devido às melhorias promovidas em certas propriedades do concreto, que acarretaram na promoção destes resíduos a subprodutos. O desempenho dos resíduos utilizados assemelha-se ao das pozolanas naturais.

Mehta e Monteiro (2014) salientam que os MCS, em geral, são silicosos, com tamanho médio das partículas semelhante ou inferior à do cimento Portland, sendo adicionados ao concreto em uma taxa de 6 a 70% em massa do material cimentício total. Subprodutos “[...] como cinzas volantes, escórias, sílica, cinzas de casca de arroz, de óleo de palma, de bagaço de cana, de resíduos de madeira, de bambu e de espiga de milho [...]” vêm ganhando espaço nos diversos estudos voltados aos MCS (EVI, 2015, p. 1).

Os diversos MCS têm influência na hidratação do cimento Portland em função da sua composição química, *reatividade com o cimento* e suas características físicas, como tamanho, forma e distribuição de seus grãos (NEVILLE, 1997; LOTHENBACH; SRIVENER; HOOTON, 2011; SURANENI; WEISS, 2017). Estas características físicas têm influência direta nas propriedades do concreto em seu estado fresco.

Neville (1997) e Jeknavorian *et al.* (2017) mencionam que o uso de cinza volante ou escória de alto forno, em um mesmo volume absoluto, reduz o volume de água necessária por unidade de volume de concreto para determinada trabalhabilidade. Além disso, Kabay *et al.* (2015) comentam que concretos contendo até 20% de cinza volante apresentam menor perda de trabalhabilidade, em relação ao seu concreto referência produzido apenas com cimento Portland e outros concretos com diferentes teores de pozolanas naturais. A redução na quantidade de água promovida pela cinza volante é atribuída ao efeito físico da

modificação da floculação das partículas de cimento Portland. Isto promove refinamento de poros da pasta hidratada.

Entretanto, pode-se destacar que os estudos realizados que apresentam estes dados são, em geral, resultados de pesquisas desenvolvidas com materiais regionais, que são subprodutos dos processos de determinadas indústrias. Isto impede a generalização desses comportamentos, pois promove certa variabilidade nas características já mencionadas para esses materiais. Essa variabilidade se deve aos processos industriais que, em certas situações, não são sequenciais, como os das centrais termelétricas que, em muitos países, não são a principal fonte de energia elétrica. As particularidades dos processos das termelétricas serão exploradas no item 2.4.1.

2.1 DEFINIÇÕES E CLASSIFICAÇÃO

As adições minerais, atualmente chamadas de MCS, são utilizadas desde 1500 a. C., portanto anteriormente à descoberta do cimento, conforme Malhotra e Mehta (1996). Malinowski e Garfinkel (1991, *apud* ISAIA, 2011) destacam que trabalhos arqueológicos desenvolvidos em Jericó constataram a presença de pisos de material congênere ao concreto deste século, despertando dúvida quanto à idealização de que o concreto com pozolanas e cal seja advento dos gregos ou dos romanos. Sobre a construção grego/romana, existem documentos que relatam os processos construtivos, além de apresentar características dos materiais utilizados. Por este motivo, creditava-se a estes povos o título de pioneiros no uso e desenvolvimento do concreto. Na Grécia, utilizavam-se materiais naturais de origem vulcânica. Em seguida, o uso deste material difundiu-se pelo império romano, onde o monte Vesúvio era a principal fonte de cinza vulcânica.

Vistas as vantagens que estes materiais apresentavam, buscou-se utilizá-los em outras partes do mundo. Porém, não havia disponibilidade de materiais naturais como os citados. Por esta razão, iniciou-se o processo de identificação de outros materiais potenciais para a aplicação, como MCS, chegando às argilas calcinadas. Nos dias atuais, os MCS utilizados são provenientes de processos industriais onde, em um primeiro momento, foram classificados como resíduos; mas, em seguida, com a identificação de seu potencial de utilização como MCS,

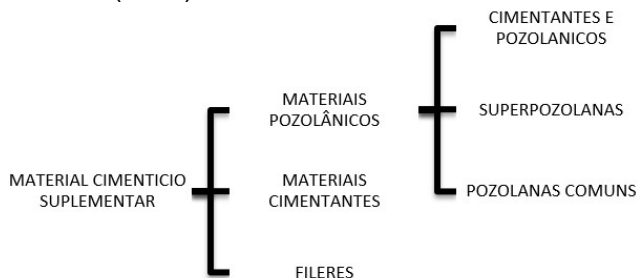
passaram a ser classificados como subprodutos destas indústrias. Destacam-se, entre eles, a Sílica Ativa, a Cinza de Casca de Arroz, a Escória de Alto Forno, a Cinza Volante e nos últimos anos o resíduo cerâmico. O Metacaulim mais utilizado é proveniente da queima controlado caulim. A Escória de Alto Forno e a Cinza Volante são os mais utilizados, pois compõem quatro tipos de cimento Portland disponíveis no mercado brasileiro. O CP II – E e o CP III, que são cimento Portland com adições de escória de alto forno, e o CP II – Z e CP IV, que são cimentos Portland com pozolanas¹ como a cinza volante, configurando os quatro tipos de cimento Portland mencionados. O que os diferencia são os teores de adição especificados pela NBR 16697 (ABNT, 2018). Mehta e Monteiro (2014) ensinam que os MCS acima mencionados são divididos em dois grupos:

Materiais naturais que são aqueles processados por britagem, moagem e separação por tamanho.

Subprodutos, aqueles que não são produtos primários das indústrias que os produzem. São os subprodutos industriais que podem ou não exigir algum processamento como separação por tamanho ou moagem para serem usados como MCS.

Os MCS são organizados em 3 (três) classes, conforme a Figura 1.

Figura 1 – Classificação dos Materiais Cimentícios Suplementares (MCS)



Fonte: Desenvolvido pelo autor com base em Malhotra e Mehta (1996); Dal Molin (2011); Mehta e Monteiro (2014).

¹ Na região nordeste do Brasil é comercializado cimento CP IV contendo adição de argilas calcinadas.

Desta maneira, Dal Molin (2011, p. 264) ressalva que os MCS, em geral, “[...] produzem efeitos químicos e físicos na microestrutura dos concretos e argamassas [...]”.

Estas classificações acontecem em razão das ações físico-químicas que estes materiais apresentam.

Os **materiais pozolânicos** são silicosos ou silico-aluminosos que, finamente divididos e quando expostos à umidade, em temperatura ambiente, manifestam reações químicas de combinação com o hidróxido de cálcio, formando produtos com propriedades cimentantes.

O **material cimentante** reage por si só com a água, formando produtos de hidratação. Entretanto, suas reações são muito lentas e a quantidade de produtos hidratados formada é muito baixa, inviabilizando seu uso como aglomerante principal para fins estruturais. Quando na presença de cimento Portland, suas reações são aceleradas pela presença de hidróxido de cálcio e gipsita.

Os **materiais pozolânicos e cimentantes** necessitam apresentar quantidades apreciáveis de sílica vítrea, pois, na forma cristalina, a sílica apresenta pouca ou nenhuma fixação do CaO.

O **fíler** é uma adição mineral dividida sem atividade química. Seu mecanismo é puramente um efeito físico de empacotamento granulométrico, que também age como pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento.

Para possibilitar o enquadramento nas classes anteriormente destacadas, é necessário mensurar as propriedades físico-químicas destes materiais. Os ensaios químicos referem-se às quantidades de óxidos, sulfitos, teor de umidade, perda ao fogo e álcalis disponíveis nas amostras analisadas. Já os físicos remetem ao material retido na peneira 45 μm , área específica e índice de atividade pozolânica do MCS. Desta forma, as reações pozolânicas (combinação dos MCS com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ gerado na reação de hidratação do cimento Portland, que forma o C-S-H e C-S-A-H) geradas em cada tipo de material são extremamente peculiares e dependentes da superfície específica das partículas e das composições químicas (DAL MOLIN, 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016).

Os efeitos físicos gerados pelos MCS são de alteração na microestrutura da zona de transição, refinamento da estrutura de poros e dos produtos de hidratação do cimento, e efeito microfíler. Estes efeitos físicos são responsáveis pelo aumento da densidade

da mistura, preenchimento dos vazios existentes, aumento dos pontos de nucleação heterogênea, e ajudam a reduzir a tendência natural das partículas de cimento a flocularem. Em outras palavras, o uso dos MCS aumenta a durabilidade das estruturas de concreto, contribui com a resistência mecânica pelo efeito de nucleação, diminui a migração de íons cloretos e modifica a reologia do concreto em estado fresco (DAL MOLIN, 2011; YAO *et al.*, 2015). Estes efeitos estão explicados no item 2.2.1.1 deste capítulo.

Entretanto, como os materiais pozolânicos, como sílica ativa e cinza volante, são subprodutos de setores da indústria, suas características têm grandes variações em função da região em que estão disponíveis para aplicação em concreto, conforme já mencionado. Como material cimentante, há disponível, em certas regiões, a escória de alto forno, subproduto da indústria de ferro gusa. Logo, o estudo de suas características é sempre regionalizado, e os autores destacam resultados do emprego de materiais locais. Como esta pesquisa busca investigar cinzas volantes provenientes do CTJL, o foco principal deste capítulo é este MCS.

2.2 CINZA VOLANTE

A cinza volante é o material proveniente da combustão de carvão pulverizado em usinas termelétricas para geração de energia. Durante a exposição do carvão à alta temperatura, a matéria volátil e o carbono são queimados, enquanto os demais compostos fundem-se, define a C 618 (ASTM, 2015). Conforme Mehta e Monteiro (2014, p. 335), “[...] as partículas mais finas que são deslocadas pelas correntes de exaustão dos gases, são denominadas de cinzas volantes (*fly ash*)”, enquanto as cinzas pesadas caem no fundo caldeira.

As cinzas volantes são materiais antropogênicos de alta complexidade e abundância. Seu descarte inadequado acarreta na poluição da água e do solo, podendo, ainda, interromper ciclos ecológicos, representando risco ambiental. Esforços mais intensos têm sido realizados para destinar este material, afinal, há uma vasta gama de aplicações para a CV (RAM; MASTO, 2014).

Cerca de 20% da cinza volante gerada no planeta é utilizada na produção de concreto. Outros usos incluem base para

pavimentos de estradas, correção das propriedades do solo para agricultura, síntese de zeólita, e uso como filer em polímeros (CHO; OH; KIM, 2005). Os mesmos autores destacam que o maior consumidor com uma finalidade industrial da cinza volante é a indústria do concreto.

Davis *et al.* (1937) comentam que há relatos de meados de 1930, do emprego de cinza volante para produção de concreto nos Estados Unidos. Estes autores foram os primeiros pesquisadores a publicarem resultados de pesquisas relativas ao uso de cinza volante em concreto (ACI 232.2R-03; Comitê ACI 232 2003). Menções posteriores são feitas ao uso de cinza volante em estruturas maciças, como a Barragem do *Tâmisa*, no Reino Unido. Em seguida, na represa de *Stillwater*, nos Estados Unidos, com cerca de 30-75% de substituição em massa de cimento hidráulico por cinza volante, com o intuito de reduzir calor de hidratação, por se tratar de concreto massa (ACI 232.2R-03; Committee 232 2003). Pesquisas subsequentes (DUNSTAN, 1976; 1980; 1984) apontaram inúmeros aspectos benéficos do uso de cinzas volantes em concretos, sendo comentados a redução da permeabilidade e aumento da sua durabilidade.

Para uso em concreto, as cinzas volantes são classificadas por normas em várias partes do mundo. De acordo com o padrão 232.2R-03 do *American Concrete Institute* (ACI), as cinzas volantes são classificadas em: classe N, F e C com base nas composições químicas (ACI Committee 232, 2003). Esta nomenclatura é seguida por várias normas pelo mundo, possibilitando a uniformidade de classificações e viabilizando o confronto dos resultados de pesquisas realizadas.

As partículas de cinza volante formadas no processo mencionado são, em sua maioria, maciças. Entretanto, cerca de 1% destas partículas são ocas, denominadas cenosferas (Figura 2). Estas partículas apresentam densidade menor que 1 g/cm^3 . Certa quantidade de cenosfera não mensurada mistura-se à cinza pesada, sendo destinada às bacias de decantação, gerando um passivo ao processo de movimentação da água destas bacias. Em razão de sua grande quantidade de sílica, promove desgaste por abrasão nos equipamentos de bombeamento da água das bacias de sedimentação. A Figura 3 apresenta uma microscopia eletrônica de varredura de partículas de cenosfera. A menção a esta fração de partícula da cinza volante é pertinente, pois ela é

gerada em quantidade apreciável no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda.

A cinza volante gerada nas termelétricas pode ser organizada em duas categorias, sendo estas relacionadas às propriedades mineralógicas do carvão utilizado. Logo, as cinzas volantes podem ser divididas conforme a porcentagem de CaO de sua constituição, sendo cinzas de baixos teores de cálcio as com teores menores que 15% e cinzas de alto teor de cálcio entre 15 e 40%. Ainda, a C 618 (ASTM, 2015) enquadra as cinzas de baixos teores de cálcio na classe F – cuja origem é de carvão-betuminoso, e a de alto teor de cálcio na classe C – provenientes de carvão sub-betuminoso e lignita. Pode-se ainda utilizar os termos cimentantes e pozolânica (Classe C), e pozolanas comuns (Classe F), para classificar tais cinzas.

De maneira geral, a reatividade está ligada diretamente com o teor de CaO formado, visto que as cinzas volantes com maior reatividade são ricas em componentes cristalinos, como C₃A, CS e C₄A₃S. Considerações mais intensas quanto às reações de hidratação da CV são feitas no item 2.2.1.1.

As distribuições típicas de tamanhos das partículas de cinza volante estão no intervalo de < 1 µm, até aproximadamente 100 µm de diâmetro.

A área específica de Blaine tem valores normalmente entre 250 m²/kg e 600 m²/kg. Esta alta área específica mostra que o material está prontamente apto para reações com o hidróxido de cálcio. As características referentes aos diâmetros das cinzas, efetividade superficial e morfologia estão inter-relacionadas com a demanda de água e a trabalhabilidade do concreto fresco, bem como com a velocidade de evolução das propriedades mecânicas desenvolvida pelo concreto no estado endurecido.

Por ser um subproduto da queima de carvão pulverizado para produção de energia elétrica, e não um produto produzido para um fim específico, a variabilidade nas propriedades químicas e físicas da CV é um fator intrínseco. Os produtores de energia elétrica por processos térmicos sabem qual o valor comercial de uma CV uniforme. Porém, em países onde a geração de energia não é baseada em termelétricas, as oscilações do uso destas centrais são mais influentes e causam variações periódicas nas CV geradas. Uma mesma central termelétrica pode gerar cinzas volantes com diferenças consideráveis, principalmente nas suas características físicas (IGNJATOVIĆ *et al.*, 2017).

2.2.1 Características físicas e químicas

As CV são compostas predominantemente por Silício (Si), Alumínio (Al), Cálcio (Ca) e Ferro (Fe). Apresentam minoritariamente, Cobre (Cu), Zinco (Zn), Chumbo (Pb), Mercúrio (Hg) e alguns elementos de terras raras. A proporção entre estes elementos é governada pelo tipo de carvão e pela tecnologia da planta energética, sendo praticamente impossível uma previsão das características das CV resultantes. Por este motivo, esperam-se variações das propriedades químicas e físicas, até mesmo de uma mesma remessa de CV da mesma unidade Termelétrica. Morfologicamente, a CV é composta de sistemas esférico, oco, poroso, angular, irregular ou de forma lisa. A tecnologia de queima do carvão influencia consideravelmente na morfologia das CV. Nas caldeiras a carvão em instalações de temperatura, as partículas de carvão podem oxidar, decompor, aglomerar ou desintegrar, dependendo do ponto de fusão dos elementos presentes.

A Tabela 1 apresenta a composição de uma CV obtida no CTLJ – sul do Brasil em 2017 utilizada na pesquisa de Azevedo *et al.* (2017).

Tabela 1 – Composição química de uma cinza volante brasileira

Componentes	(%)
CaO	2,07
SiO ₂	56,03
Al ₂ O ₃	29,41
Fe ₂ O ₃	6,16
ZrO ₂	0,11
K ₂ O	3,77
SO ₃	0,26
TiO ₂	1,81
Outros	0,77*

*ZnO, MnO, Cr₂O₃, SrO, CuO, Rb₂O, Y₂O₃, PbO, Ga₂O₃, GeO₂, NiO e NbO

Fonte: Azevedo *et al.* (2017, 145).

A Tabela 2 apresenta o intervalo de teores das composições, presentes na literatura atual, das cinzas volantes classe F e classe C geradas.

Tabela 2 – Intervalo dos componentes presentes nas classes F e C das cinzas volantes

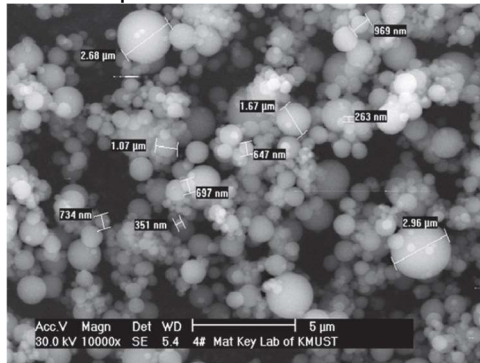
Componentes (%)	Classe F	Classe C
CaO	0,0 a 12,15	15,0 a 35,0
SiO ₂	42,01 a 70,7	36,0 a 63,4
Al ₂ O ₃	7,2 a 30,18	17,9 a 36,5
Fe ₂ O ₃	2,2 a 14,19	2,0 a 25,4
MgO	0,0 a 11,55	0,15 a 6,1
K ₂ O	0,13 a 4,5	0,09 a 4,2
Na ₂ O	0,14 a 5,69	0,01 a 3,8
SO ₃	0,02 a 0,9	0,03 a 4,9
P ₂ O ₅	0,08 a 1,61	0,12 a 1,2
TiO ₂	0,87 a 2,05	0,51 a 2,7
MnO	0,05 a 1,09	0,04 a 0,11
Perda ao fogo	0,79 a 5,16	0,25 a 34,8

Fonte: Modificado de Luxán e Soria (1975); Mehta e Gjörv (1982); Fraay, Bijen e Haan (1989); Massazza (1998); Lam, Wong e Poon (1998); Gava (1999); Moraes (2001); Ramlochan *et al.* (2003); Ramlochan, Thomas e Hooton (2004); Bentz *et al.* (2010); Pontes (2011); Huang *et al.* (2013); Rashad (2015); Kabay *et al.* (2015); Salum (2016); Sadique e Coakley (2016); Mydraboina, Setunge e Patnaikuni (2017); Jeknavorian *et al.* (2017); Hemalatha e Ramaswamy (2017).

Comparando a Tabela 1 e a Tabela 2 é possível observar que a CV brasileira se classifica como classe F, pois, o carvão utilizado nas termelétricas no sul do Brasil é carvão-betuminoso. Os valores médios apresentados na Tabela 2, para a CV Brasil, segue os intervalos apresentados pelas demais CV apresentadas no mundo.

A Figura 2 apresenta a microscopia eletrônica de varredura de cenosfera.

Figura 2 – Microscopia eletrônica de varredura de cenosfera

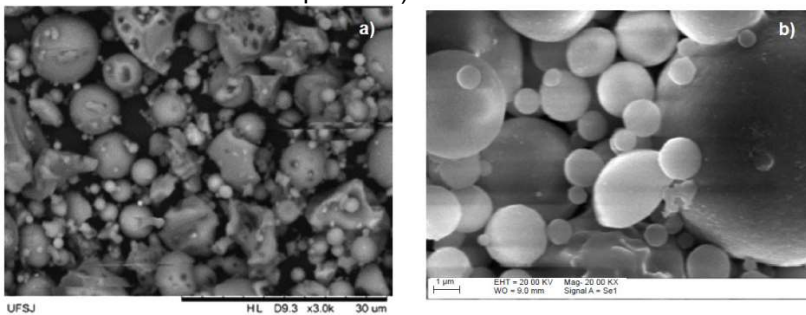


Fonte: Kwan e Chen (2013, p. 21).

Pode-se observar que as partículas tendem a se agrupar em formações que lembram cachos de uva, característica pertencente à cenosfera.

A Figura 3 apresenta uma microscopia eletrônica de varredura das partículas classificadas como cinza volante.

Figura 3 – Microscopia eletrônica de varredura de CV. a) Cinza volante constituindo uma pasta. B) Cinza volante não utilizada



Fonte: Azevedo *et al.* (2017, 146).

Estas formas esféricas são potencialmente benéficas para as propriedades no estado fresco do concreto, reduzindo consideravelmente a demanda de água, considerações mais pontuais serão feitas no item 2.5 deste capítulo.

O diâmetro médio das CV varia de 1 a 140 µm (MALHOTRA; MEHTA; 1996; NEVILLE, 1997; MEHTA; MONTEIRO, 2014; AZEVEDO *et al.*, 2017). A distribuição granulométrica influencia diretamente na sua reação da com o Ca(OH)_2 (CINCOTTO, 2011).

A área superficial da cinza volante é uma propriedade difícil de ser determinada, pois, no ensaio de Blaine (permeabilidade ao ar), as partículas esféricas acomodam-se de forma mais compacta do que as partículas de cimento, que apresentam as mais variadas formas irregulares, desta forma, sendo mais resistentes ao ar. No outro extremo, as partículas de carvão incombusto são porosas, facilitando a passagem do ar, resultando em um fluxo enganoso. Por este motivo, é recomendada, em alguns casos, a determinação da superfície específica pelo método *Brunauer Emmett Telle* (BET).

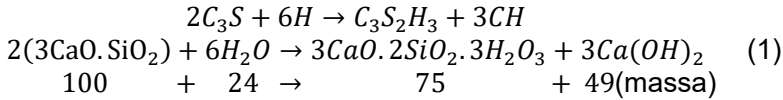
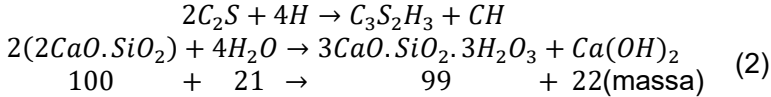
Além disso, a determinação da massa específica, que é uma variável considerada na determinação da quantidade de material a ser ensaiado para mensurar a área específica, é influenciada pela presença de cenosfera, que apresenta massa específica menor que 1 g/cm^3 . Por outro lado, algumas partículas muito pequenas, que possuem magnetita e/ou hematita, manifestam elevada massa específica. Dal Molin (2011) ressalta que as cinzas volantes possuem massa específica entre 1,9 e 2,4 g/cm^3 . Por possuir densidade menor, e muito distante da densidade do cimento ($3,15 \text{ g/cm}^3$), sua substituição a tal aglomerante deve ser feita sempre em volume absoluto.

2.2.1.1 Influência da cinza volante na hidratação do cimento Portland

O processo de hidratação do cimento Portland é um conjunto de reações que são desencadeadas da interação das partículas anidras de cimento com a água. Estes compostos são organizados em duas fases: silicatos e aluminatos (TAYLOR, 1992; CINCOTTO, 2011).

Compõem a fase dos silicatos o silicato tri-cálcico - *Alita* ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_3\text{S}$) e o silicato bi-cálcico - *Belita* ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_2\text{S}$). Já a fase de aluminatos é formada pelo aluminato tri-cálcico - *Celita* ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_3\text{A}$) e pelo ferro aluminato tetra-cálcico - *Ferrita* ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{C}_4\text{AF}$) (SCRIVENER, 1989; NEVILLE, 1997).

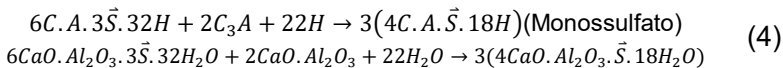
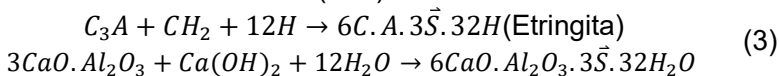
A velocidade de reação dos compostos do cimento Portland não é a mesma: os aluminatos têm maior reatividade, seguidos pelos silicatos. O processo de hidratação pode ser apresentado, também, na forma das equações 1 a 5:

Alita - silicato tri-cálcico (C₃S)**Belita** - silicato di-cálcico (C₂S)

Com base nas massas, a hidratação da alita forma mais que o dobro de portlandita, em relação à hidratação da belita. A hidratação destes dois compostos consome quantidades muito próximas de água (TAYLOR, 1992; NEVILLE, 1997). A alita reage desde as primeiras horas até por volta dos 28 dias de idade, sua atividade de hidratação é muito intensa. Ela é a principal responsável pelas propriedades mecânicas nos primeiros dias. A belita apresenta reações significativas apenas em idades mais avançadas, quando começa a contribuir com a evolução das propriedades mecânicas.

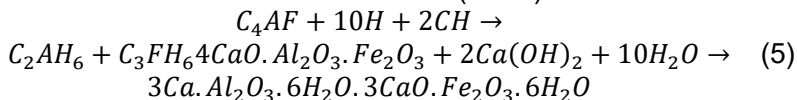
O C₃A manifesta suas reações instantaneamente com a água. Para controlar estas reações, há a necessidade da adição de gipsita (gesso), que promove certa estabilidade ao composto, impedindo a instantaneidade da formação dos aluminatos hidratados, formando etringita, como pode ser observado na equação 3.

Quando a concentração de sulfato de cálcio bihidratado disponível na solução saturada reduz consideravelmente, ocorre a renovação da hidratação do C₃A e do C₄AF, momento em que a etringita perde estabilidade, e é gradativamente convertida em monossulfato, conforme equação 4.

Celita - aluminato tri-cálcio (C₃A)

A cinética de hidratação da ferrita é de difícil caracterização. Sua influência na pasta endurecida é considerada de baixa relevância. Os produtos resultantes de sua hidratação são semelhantes aos formados na hidratação do C₃A. A equação 5 apresenta sua cinética de hidratação.

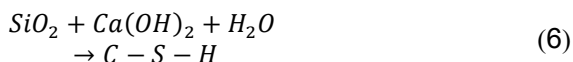
Ferrita - ferro aluminato tetra-cálcico (C₄AF)



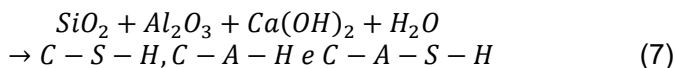
A hidratação da cinza volante depende, essencialmente, do seu conteúdo de Óxido de Silício (SiO₂), Óxido de Alumínio (Al₂O₃) e Óxido de Ferro (Fe₂O₃), uma vez que estes componentes reagem com a portlandita (CH) formada pela hidratação do cimento Portland.

A cinza volante, por possuir composição variável, manifesta reações da sílica, alumina e ferro em suas fases vítreas com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) em meio aquoso. Resultantes desta reação são formados hidratos dos mais variados (MASSAZZA, 1998; MINDESS; YOUNG, 1981; FU *et al.* 2002 *apud* HOPPE FILHO, 2008).

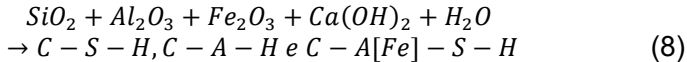
A reação do óxido de silício com hidróxido de cálcio em meio aquoso forma silicato de cálcio hidratado:



A interação química entre óxido de silício e óxido de alumínio com hidróxido de cálcio em meio aquoso forma silicato de cálcio, aluminato de cálcio e sílico-aluminato de cálcio hidratado:



Quando submetidos a um meio aquoso, os óxidos de silício, alumínio e ferro, na presença de hidróxido de cálcio, resultam na formação de silicato de cálcio, aluminato de cálcio e sílico-ferro-aluminato de cálcio hidratado:



A formação destes compostos está diretamente relacionada com a alcalinidade da solução, de acordo com Lothenbach, Scrivener e Hooton (2011). Para uma solubilidade considerável da CV, o pH deve estar acima de 13,3. Esta condição propicia dissolução das fases vítreas ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) da CV.

A cinética de hidratação de sistemas cimento Portland–cinza volante (CP–CV) é marcada pela redução da quantidade total de portlandita na mistura hidratada, um pouco menos pronunciada do que em um sistema cimento Portland – sílica ativa (CP–SA), visto que a reatividade da cinza volante é muito lenta, além de possuir CaO na sua composição química, sendo uma fonte adicional de cálcio livre (LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011). Entretanto, o CaO formado pela reação de hidratação do cimento é muito mais puro do que o CaO disponível na CV. Logo, a disponibilidade de CaO decorrente da hidratação do cimento apresenta maior reatividade durante a hidratação da CV (CINCOTTO, 2011). Por possuir quantidades entre 15 e 35% de óxido de alumínio, uma de suas modificações na hidratação do cimento Portland puro é a grande quantidade de fases ricas em Al. Essa maior quantidade de Al_2O_3 associada a quantidade de SO_3 resulta em uma redução na formação de Monossulfato (AFt) e um aumento na quantidade Etringita primária (AFm) formado. Hanehara *et al.* (2001), e Luke e Lachowski (2008) mostraram em suas pesquisas que sistemas CP–CV contendo quantidade moderadas, até 20%, de cinza volante fixaram parcialmente o CH disponível e a quantidade de hidratos formados foi maior, a relação Ca/Si do C-S-H foi reduzida possuindo ainda uma quantidade maior de Al, em comparação a um sistema cimento Portland puro. Porém, estas reações são significativas somente em idades maiores que uma semana, pois apenas após esta idade a quantidade de CH é reduzida, quando comparada a sistema contendo somente cimento puro. Em idades inferiores a uma semana, a quantidade de CH é mais elevada em sistema CP–CV, uma vez que a cinza volante possui CaO livre em sua composição (LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011). Outras

considerações quanto a influência da cinza volante na hidratação do cimento Portland são feitas no APÊNDICE C.

2.2.2 Considerações preliminares

No complexo Jorge Lacerda há uma grande quantidade e variedade de cinzas volantes. Logo, há a necessidade de investigação destas cinzas para produção de concreto convencional a ser utilizado em obras correntes.

Segundo a investigação bibliográfica, pode-se inferir que os estudos relacionados ao uso de cinza volante e demais MCS são regionalizados. Como eles são, em geral, subprodutos de outros segmentos industriais, não apresentam constância de suas propriedades. Assim, impossibilitam a generalização dos resultados obtidos, havendo, então, a necessidade de estudos pontuais.

Pode-se considerar que uma cinza volante apresentará desempenho desejável quando reduzir a demanda de água e apresentar capacidade considerável de fixação de Ca(OH)_2 .

Para garantir a redução na demanda de água, as partículas de CV devem prover lubrificação dos grãos de cimento Portland, além de promover a redução da tendência à floculação deste aglomerante. Esta redução promoverá melhor hidratação do sistema cimento-cinza volante. Isto depende da forma e tamanho dos grãos da referida cinza. Contudo, ainda não há distinção de qual destas características teria maior influência na demanda de água. Apenas existem menções que os grãos devem ser menores que $45 \mu\text{m}$ e com forma próxima de esférica. Assim, há necessidade de investigação de qual destas características teria maior influência, sendo esta a mais considerada em caso de necessidade de beneficiamento. Também é mencionado, na literatura estudada, que a quantidade de incombusto (determinada por perda ao fogo) tem influência na demanda de água.

A fixação do Ca(OH)_2 tem relação direta com a quantidade de sílica vítrea amorfa, fase responsável pela reação pozolânica. Estruturas cristalinas apresentam ordem de longo alcance e encontram-se em estado de equilíbrio, não sendo susceptíveis a reações químicas com outros materiais. Por outro lado, as estruturas amorfas apresentam certo desequilíbrio, o que facilita sua reação em meio alcalino. Isto também é influenciado pela

finura da CV, pois quanto maior área de contato dela com a solução de Ca(OH)_2 , maior será sua suscetibilidade a fixá-lo, desde que haja quantidade mínima de sílica amorfa.

Entretanto, as normas que especificam a classificação dos MCS, em geral, tendo uma classe de CV com duas subclasses, especificam apenas quantidade de sílica, alumínio e ferro. Nas reações de hidratação possíveis mencionadas anteriormente, a quantidade de sílica não é tão relevante quanto sua forma. Contudo, a forma da sílica, principal fator desta característica, não é mencionada.

Nos estudos aqui investigados, poucas relações são feitas entre a resistência do concreto e as diversas propriedades das cinzas volantes, como finura, resíduo de partículas maiores que certo tamanho (45 μm), índice de pozolanicidade, teor de carvão (perda ao fogo), teor de vidro (morfologia da sílica) e composição química (teor de sílica, alumínio e ferro).

A fim de padronizar as propriedades físicas das cinzas volantes, podem ser empregados processos de beneficiamento. Entretanto, tais processos podem aumentar o valor monetário final da CV. Contudo, uma padronização da distribuição dos tamanhos dos grãos, um teor baixo de carvão incombusto e uma predominância de partículas arredondadas contribuiria consideravelmente para o desempenho nos estados fresco e endurecido do concreto.

Com o intuito de garantir estas propriedades, a seleção de cinzas com baixo teor de carvão incombusto é feita por separador de partículas, regulado para retirar as partículas maiores que 45 μm . Por conseguinte, a cinza é exposta a um moinho de bolas configurado para um grau de moagem menor que 45 μm . Desta forma, produzir-se-ia uma CV com potencial apreciável para utilização em concreto, onde haveria pequena influência na demanda de água, contribuindo para a evolução das propriedades no estado endurecido e para a durabilidade.

Por ser um subproduto de um processo industrial, a cinza volante está constantemente disponível, e pode ser considerada, ininterruptamente, como material constituinte para produção de concreto. Na verdade, é um material gerado que necessita ser eliminado; logo, seu destino para uso em concreto garante o fim adequado para este material.

2.3 ATIVIDADE POZOLÂNICA

Atividade pozolânica é definida com a capacidade do MCS consumir o hidróxido de cálcio em meio aquoso, formando compostos hidratados semelhantes aos formados pela hidratação do cimento Portland. A principal diferença entre a cinética da hidratação do MCS e do cimento Portland é que os MCS pozolânicos consomem o hidróxido de cálcio, enquanto o cimento Portland tem este composto como subproduto de sua hidratação. Existem vários métodos para determinar a atividade pozolânica, variando de processo indiretos, que medem a resistência de argamassa a processo diretos que determinam a quantidade de CaO consumido por certa quantidade de MCS. Estes métodos são acompanhados de parâmetros para os resultados obtidos, para possibilitar a classificação dos MCS como pozolânicos ou não.

Procedimentos para determinação da capacidade de fixação do CaO pelos MCS vem sendo desenvolvidos e aperfeiçoados desde 1937, quando Vicat elaborou um método que partia do princípio da combinação da cal em meio aquoso com o MCS investigado. O método proposto por Vicat era moroso, podendo passar de 1 ano de ensaio. Isto levou outros pesquisadores, como Chapelle (1958), Fratini (1978) e Luxán, Madruga e Saavedra (1989) a continuarem o aprimoramento de pesquisas neste campo.

Cada um destes métodos possui suas particularidades, que possibilitam adequabilidade a cada MCS de diferentes origens, e quantidade empregada na substituição do cimento Portland.

Como mencionado no item 2.1, a NBR 12653 estabelece como pozolânicos os MCS que apresentem teores de sílica, alumínio e ferro acima de 70%. Este parâmetro é partilhado por normas de classificação de MCS por todo o mundo – C 618 (ASTM); EN 450-1 – específica para cinza volante (BSI, 2012).

A reatividade do MCS com $\text{Ca}(\text{OH})_2$ está relacionada ao grau de amorfismo das fases sílica, alumínio e ferro, e não sua quantidade disponível em qualquer estrutura, cristalina ou amorfa (ZENG; LI, 2014; WANG; YUAN; ZHANG, 2017).

Como o interesse é medir atividade pozolânica, e não a influência do MCS nos comportamentos nos estados fresco e endurecido do concreto, deveria ser estabelecida a capacidade do

MCS em fixar o CaO, como é estabelecido para o Metacaulim pela NBR 15894-1 (ABNT, 2010), por exemplo.

2.3.1 Métodos de determinação da atividade pozolânica

Os métodos de avaliação da atividade pozolânica podem partir de princípios químicos ou físicos, sendo, ainda, diretos ou indiretos. Existem inúmeros métodos para mensuração da pozolanicidade, que foram validados por pesquisadores consagrados e, em alguns casos, vieram a ser consolidados em normas.

Os efeitos gerados no concreto pelo uso de MCS são os mais variados, como será apresentado no item 2.5. Iniciam no estado fresco, pela alteração em suas propriedades, como na demanda de água para uma mesma trabalhabilidade, devido à floculação das partículas sólidas da pasta. Também ocorre no estado endurecido, pelo refinamento de poros da matriz cimentícia, através da fixação do hidróxido de cálcio residual da hidratação do cimento Portland.

Foi a complexidade de mensuração destes fenômenos físicos e químicos que levou à determinação de uma vasta gama de métodos para a avaliação dos efeitos dos MCS, quando incorporados à matriz cimentícia. Rêgo (2004) comenta que a heterogeneidade dos MCS, além das particularidades dos fenômenos que ocorrem durante sua hidratação, justificam a inexistência de um método capaz de medir, com grande confiabilidade, a atividade pozolânica de qualquer MCS, sendo possível somente apontar as tendências gerais de seu comportamento.

Gava (1999) comparou, em sua pesquisa, a eficiência de diferentes métodos para determinação da atividade pozolânica, frente a diferentes MCS. A autora relata inferências de que estes métodos apresentam disparidades com o real efeito deste MCS nas argamassas, uma vez que tais métodos desconsideram uma série de fatores que influenciam na reação pozolânica. A autora destaca, ainda, que o emprego destes métodos pode vir a classificar, de forma equivocada, os MCS, ocasionando, em muitas situações, sua reprovação para uso.

Com o intuito de discutir melhor estas particularidades, são apresentados os métodos que compõem o estado de arte da determinação da atividade pozolânica de MCS.

2.3.1.1 Chapelle

Este é um método direto de mensuração da variação do teor de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 . Sistematizado em 1958 por *Jules Chapelle*, em sua pesquisa de doutorado na Universidade de Paris, na França, foram investigadas as reações sulfocálcicas em escórias e pozolanas diversas. Seu diferencial está em acelerar os resultados. O método proposto por Chapelle era ainda moroso, em torno de 48 horas, porém mais rápido que o anteriormente elucidado por Vicat, que durava até um ano. Posteriormente, Largent (1978) adicionou agitação mecânica durante a fervura, em busca de aumentar as reações e contato entre as fases. Podendo, desta forma, ser reduzido o tempo de ensaio que passou para 18 horas (RÊGO, 2004; CORDEIRO, 2009; PONTES, 2011).

O conceito proposto por Chapelle é que a pozolanicidade de um material está relacionada à quantidade de Ca(OH)_2 fixada pela pozolana. Isto é feito pela comparação de duas misturas: uma contendo pozolana, óxido de cálcio (CaO) e água; e a outra apenas com CaO e água. Para isto, empregam-se as quantidades de 200 ml de água deionizada e descarbonatada, 1 g de CaO e 1 g de pozolana, com as características que interessam determinar o grau de pozolanicidade. As misturas devem ser mantidas em ebulição durante 18 horas, em banho termorregulador e sob agitação. Concluído este período, as misturas devem resfriar em temperatura ambiente, e acrescentar 200 ml de sacarose em solução, garantindo sua homogeneidade por meio de agitação intensa, com a solução de pozolana, óxido de cálcio e água. A adição de sacarose é feita com o intuito de cessar a reação da pozolana com o Ca(OH)_2 . Por conseguinte, a esta solução filtrada deve ser adicionada fenolftaleína com indicador do potencial hidrogeniônico, fazendo a titulação com ácido clorídrico (HCl) 0,1 M (NITA, 2006). O resultado é expresso em miligrama de CaO por grama de pozolana. Quanto maior o consumo de CaO, mais pozolânico será classificado o material.

Com este método é possível determinar a taxa de reatividade de certa pozolana com o Ca(OH)_2 , em tempo relativamente curto, em relação aos outros métodos que serão apresentados na sequência, levando, como já mencionado, cerca de 18 horas para obtenção do resultado.

Rêgo (2001) destaca que o hidrato formado em situações aceleradas apresenta estrutura cristalina e, conseqüentemente, solubilidade divergentes àquele formado em temperatura ambiente.

Divergindo do primor deste método, em geral, há dispersão considerável entre os resultados obtidos. Isto se deve à sensibilidade às condições de operação dos procedimentos que formam este método, como modo de aquecimento, eficiência de agitação, e material e formato do recipiente. Por este motivo, aprimoramentos foram propostos para o método de Chapelle, sem perder a essência do proposto inicialmente.

2.3.1.1.1 *Chapelle modificado*

Chapelle modificado é definido como o método resultante das modificações sugeridas por Raverdy *et al.* (1980) ao método de Chapelle, que buscaram maior uniformidade aos resultados obtidos. Sua *modificação* obteve sucesso em amenizar a dispersão dos resultados. A primeira sugestão de alteração ateu-se ao frasco, que deveria, agora, ser confeccionado em aço, para que eliminasse qualquer ataque da solução a ele. Deveria, ainda, ser hermeticamente fechado e utilizar esferas metálicas, que têm a função primordial de intensificar a agitação da solução.

Agora, deve-se fazer uso de um banho tipo *Dubnoff* em agitação a $\frac{3}{4}$ do potencial de agitação do equipamento, à temperatura de 90 °C para evitar a evaporação da solução. Em função da eficiência de agitação, o tempo de reação pode ser reduzido para 16 horas. Em seguida, os recipientes providos de solução de pozolana e Ca(OH)_2 devem ser resfriados em água corrente até a temperatura ambiente, momento em que a solução de sacarose deve ser acrescida ao recipiente. Deve-se, então, colocar o recipiente em um agitador orbital do tipo *wagner* por 15 minutos, para homogeneizar a sacarose com a solução, cessando, assim, a reação pozolânica. Quanto ao procedimento de titulação, não foram sugeridas modificações. Pelo método de Chapelle

modificado, para ser classificado como pozolânico, o material deve apresentar capacidade de fixar mais de 330 miligramas de CaO por grama de pozolana (mgCaO/g). Utilizando a relação molecular de $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{CaO}$ de 1,32, este valor passa a ser 435,6 (mgCa(OH)₂/g).

Este método é estabelecido pelas normas NF 18 – 513 (AFNOR, 2010) e pela NBR 15895 (ABNT, 2010).

2.3.1.1.2 *Chapelle (versão LCPC)*

Com base nos conceitos apresentados por Chapelle (1958), o *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Paris* (LCPC) desenvolveu outro método para determinação da atividade pozolânica de MCS. Pontes, Silva e Faria (2012) comentam que este método é estabelecido pelo relatório de *Roy-Brot*, intitulado *Chapelle-LCPC*. Neste método, uma solução de CaO, pozolana e água é posta em reação por quatro dias em ambiente a 40 °C. Ao fim deste período, deve-se filtrar o material. O resíduo e a solução são caracterizados por meio de análise termogravimétrica (TGA) e difratometria de raio X (DRX), a fim de identificar os compostos formados e a quantidade de alumínio sílica e cálcio dissolvidos. Por este método, o índice de atividade pozolânica é relativo ao percentual de material solubilizado: quanto mais alta for esta porcentagem, maior a reatividade do MCS (PONTES, 2011). Logo, esta modificação do método é relativa ao interesse em determinar as fases que reagiram com o CaO, e não somente comprovar que o MCS é reativo.

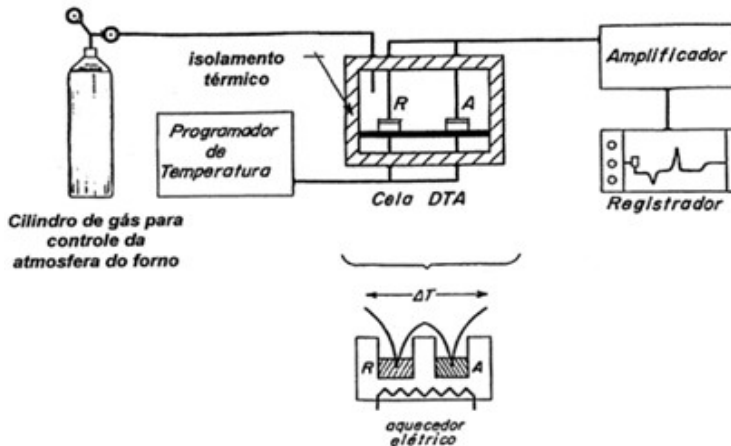
2.3.1.2 *Análise termogravimétrica*

Uma técnica consagrada, com precisão e exatidão comprovadas, empregada para investigação do comportamento de materiais, é a Análise Termogravimétrica (TGA). Esta técnica tem seu uso difundido para estudos das reações de decomposição térmica dos compostos que formam o material (BORK, 2011). Seu uso proporciona inúmeras informações como, por exemplo, a taxa dos compostos que foram formados nas reações pozolânicas de uma cinza volante, quando empregada em substituição parcial ao cimento Portland (ROSZCZYNIANSKI, 2002; HOPPE FILHO,

2008; CINCOTTO, 2011; HOPPE FILHO *et al.*, 2017). Também é de reconhecida aptidão para caracterização dos compostos hidratados formados na hidratação do cimento Portland (RAMACHANDRAN *et al.*, 2002; TAYLOR, 1992; CINCOTTO, 2011).

Tal técnica determina a massa do material, enquanto este é submetido a um ciclo programado de elevação da temperatura. A balança termogravimétrica mensura a massa do material, enquanto este se degrada em razão da elevação da temperatura. O equipamento consiste em uma balança analítica eletrônica com duas células de carga, acoplada em um forno, e um controlador eletrônico de temperatura, ligados a um computador. Há, ainda, um cilindro de gás, geralmente nitrogênio, utilizado para controlar a atmosfera de ensaio. Este sistema permite que a pesagem da amostra seja ininterrupta, viabilizando o monitoramento da sua perda de massa em função da elevação da temperatura. Na amostra referência, geralmente se utiliza alumina, pois sua decomposição térmica é bem característica, permitindo a detecção de qualquer variação do sistema que possa influenciar no ensaio. A Figura 4 ilustra o referido sistema.

Figura 4 – Esquema de um equipamento genérico para análise térmica diferencial (DTA)

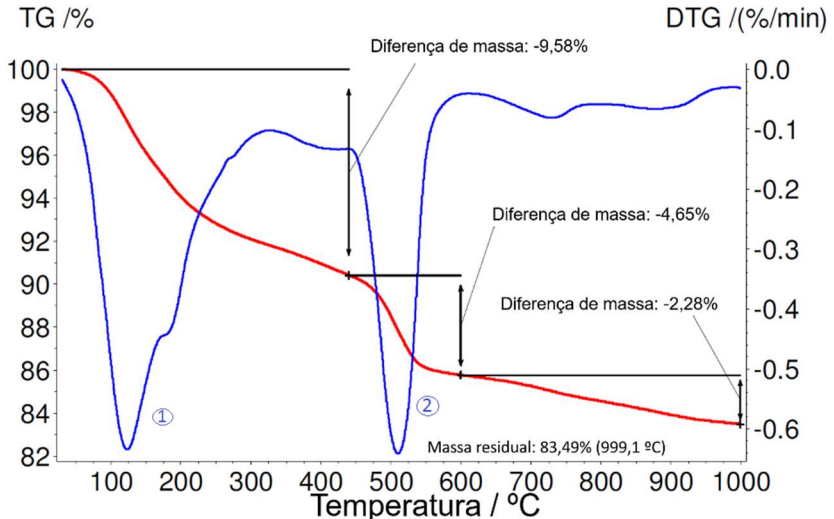


Fonte: Modificado de Bernal *et al.* (2002).

Grande parte dos fornos disponíveis no mercado apresentam capacidade de até 1500 °C, com atmosferas inertes

ou reativas. Existe, ainda, a necessidade desse sistema controlar a natureza e pressão da atmosfera em torno da amostra. O registro dos resultados ocorre em uma curva termogravimétrica, conforme a Figura 5.

Figura 5 – Curva de análise termogravimétrica (TGA) e análise termogravimétrica diferencial (DTG) – Pasta com 45% de Ca(OH)_2 e 55% de cinza volante, na relação água-sólidos de 0,60



Fonte: Hoppe Filho (2008, p. 251).

A curva TGA é utilizada mais qualitativa do que quantitativamente. Já a curva DTG apresenta informações de extrema importância para determinação dos compostos degradados em cada pico de perda de massa. Até 150 °C, a água livre e combinada a certos compostos é liberada. Entre 425 e 550 °C, o Ca(OH)_2 pode determinar a atividade pozolânica de um MCS, pois, quando comparado com uma pasta sem MCS, será possível perceber quanto de CaO foi fixado (TAYLOR, 1992; RAMACHANDRAN *et al.*, 2002; ROSZCZYNIANSKI, 2002; HOPPE FILHO, 2008; CINCOTO, 2011). Entretanto, para constatar a reação pozolânica, há a necessidade de se medir a quantidade de hidratos formados, pois, a redução da quantidade de cimento pela sua substituição por MCS acarreta na redução de CH formado. Com isso, esta redução de CH pode ser atribuída, equivocadamente, à potencial fixação do CH pelo MCS, mas, na verdade pode ter ocorrido em razão da menor quantidade de

cimento que, conseqüentemente, gera menos CH. Para a realização de ensaios com amostras cimentícias há a necessidade de parar a reação de hidratação. Isto pode ser feito com nitrogênio líquido ou por liofilização, processo que retira toda a água livre do sistema.

2.3.1.3 Luxán

Este é um método direto de determinação da pozolanicidade, que consiste na medição da variação da condutividade elétrica de 200 ml saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e 5 gramas de MCS, mantida em agitação à temperatura de 40 °C. A condutividade tende a reduzir em razão da diminuição dos íons Ca^{2+} e OH^- disponíveis na solução.

A pozolanicidade é definida como a relação entre a condutividade apresentada antes e 120 segundos depois da adição da pozolana à solução.

O método proposto por Luxán, Madruga e Saavedra (1989) permite a classificação dos MCS, quanto à atividade pozolânica em três níveis, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Classificação da atividade pozolânica pelo método de Luxán

Atividade pozolânica	Condutividade elétrica ($\Delta\text{ms/cm}$)
Sem	< 0,4
Moderada	0,4 a 1,2
Alta	>1,2

Fonte: Adaptado de Luxán, Madruga, Saavedra (1988, p. 67).

O presente método destaca-se por sua praticidade e agilidade na obtenção dos resultados. Entretanto, um alto valor de superfície específica do MCS resulta em uma atração do íon cálcio (Ca^{2+}), desencadeando, assim, um efeito físico de nucleação, e não uma fixação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Isto resulta na redução da condutividade elétrica. Logo, esta pode ser considerada a maior vulnerabilidade do método, pois este efeito pode resultar em uma classificação equivocada do MCS como pozolânico.

2.3.1.4 Índice de atividade pozolânica com a cal

Este é um método físico-mecânico considerado indireto, de determinação da atividade pozolânica com Ca(OH)_2 . No Brasil, é estabelecido pela NBR 5751 (ABNT, 2015).

Ele consiste no amassamento de uma argamassa contendo uma parte de hidróxido de cálcio P.A. e o dobro, em volume, do MCS a ser avaliado. O traço empregado é de 1:3 (cal + MCS: 4 partes iguais das frações de areia normal NBR 7214). A quantidade de água a ser utilizada deve garantir um Índice de Consistência (IC) de 225 ± 5 mm. Devem ser moldados três corpos de prova com dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Estes espécimes devem ser curados, durante as primeiras 24 horas, à temperatura de 23 ± 2 °C: em seguida, durante as 144 horas subsequentes, devem ser curados em estufa a 55 ± 2 °C. Após a cura térmica, devem ser ensaiados à compressão axial. O resultado da atividade pozolânica é a média aritmética entre os três espécimes, com um desvio relativo inferior a 6%.

Um fator considerável que influencia nos resultados é a variabilidade das cales disponíveis no mercado. Outro fator de grande influência é a possível interação entre as distribuições granulométricas das frações de areia e da pozolana, podendo mascarar ligeiramente as medições, e contribuir para a obtenção de resultados diferenciados (CORDEIRO, 2009).

Hoppe Filho *et al.* (2015) comentam que o padrão estabelecido para o índice de consistência leva à variação no teor de água das argamassas, em razão da influência das características físico-químicas dos MCS.

2.3.1.5 Índice de atividade pozolânica com o cimento

O método para determinação do índice de atividade pozolânica com o cimento é estabelecido, no Brasil, pela NBR 5752. Este método sofreu modificações drásticas da versão de 1992 desta norma para a versão atual, de 2014.

O método consiste na produção de duas argamassas. A argamassa A contendo apenas cimento Portland em um traço 1:3:0,48. A argamassa B deve conter o MCS substituindo o cimento. Na versão de 1992, era estabelecido que esta quantidade

deveria ser de 35% em volume; já a versão 2014 estabelece que deve ser 25% em massa. A versão de 1992 estabelece que a quantidade de água da argamassa A deveria ser referente à obtenção do IC de 225 ± 5 mm. A argamassa B deveria apresentar o mesmo IC.

A NBR 5752 (ABNT, 1992) estabelecia que a manutenção do IC da argamassa B deveria ser feito com água, enquanto que a NBR 5752 (ABNT, 2014) determina que, caso a diferença do IC entre as argamassas A e B seja maior que ± 10 mm, o ajuste deve ser feito com aditivo superplastificante.

Quanto à cura, a versão de 1992 estabelecia que os espécimes deviam ser curados à temperatura ambiente pelas primeiras 24 horas, e levados à temperatura de 38 ± 2 °C pelos 27 dias subsequentes. A NBR 12653 (ABNT, 1992) estabelece que a argamassa B deve apresentar 75% da resistência média da argamassa A para o MCS ser classificado como pozolânico. A versão de 2014 determina que, durante as primeiras 24 horas, os corpos de prova devem ser curados em câmara úmida à temperatura de 23 ± 2 °C. Posteriormente, até o 28º dia, devem ser curados na mesma temperatura, porém, em água saturada com cal, trocada quinzenalmente. A NBR 12653 (ABNT, 2015) estabelece que para o MCS ser classificado como pozolânico a argamassa B deve apresentar 90% em relação a resistência média da argamassa A.

O método estabelecido pela NBR 5752 (ABNT, 1992) é facilmente influenciado pela relação água/aglomerante, que varia da argamassa A para a B em função do MCS adicionado, uma vez que é estabelecido índice de consistência fixo para ambas as argamassas produzidas. Já na versão de 2014 também é estabelecido um intervalo fixo para o índice de consistência. Entretanto, a manutenção da consistência da argamassa B deve ser feita com o uso de aditivo superplastificante, não sendo alterada a relação a/ag. Contudo, o emprego de aditivo superplastificante promove melhor dispersão dos grãos de cimento e de MCS, vindo a apresentar resultados questionáveis.

2.3.1.6 Fratini

Este método foi desenvolvido por Nicola Fratini (MASSAZZA, 2003) com o intuito de investigar a pozolanidade

de cimentos pozolânicos. Desta forma, este método é empregado para determinação da atividade pozolânica de cimentos combinados com MCS em grandes quantidades já na fábrica (CAPUTO; LIGUORI; COLELLA, 2008; LAVAT; TREZZA; POGGI, 2009; BAHURUDEEN; SANTHANAM, 2015).

Fratini é um método químico onde, por meio de titulação, se estabelece a concentração de CaO disponível em uma solução de cimento e pozolana.

Para a realização do ensaio, deve-se misturar 20 g do cimento pozolânico, ou de cimento e MCS, com 100 mL de água destilada. Esta mistura deve ser mantida em estufa a aproximadamente 40 °C. Após 8 dias, deve-se realizar a filtração da amostra, e deixar o filtrado esfriar até a temperatura ambiente. Em seguida, deve-se realizar a titulação com HCl (0,1 M) e indicador de alaranjado de metileno, a fim de determinar a concentração de íon OH^- . Para encontrar a quantidade de íon Ca^{2+} , deve-se ajustar o pH a 12,5, utilizado indicador do tipo *calcon* ou *Patoon Reeders*. Caso com 8 dias o resultado seja negativo, devem ser aguardados até 15 dias, nas condições de estufa a 40 °C, e repetir os procedimentos.

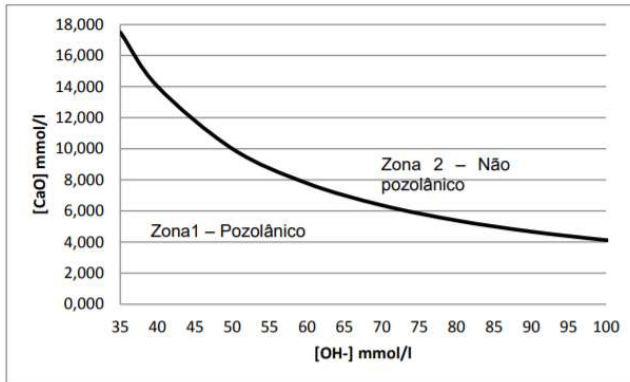
Os resultados devem ilustrar um gráfico conforme a Figura 6. O método de Fratini apresenta uma curva como parâmetro de classificação da reatividade do MCS. Caso a concentração de ($[OH^-]$) fique nas abcissas e ($[CaO]$) nas ordenadas acima da linha, o MCS é não pozolânico: coincidentes ou abaixo da linha, o MCS é considerado pozolânico.

O teor de CaO deve ser determinado segundo a Equação 9.

$$[CaO] = \frac{350}{[OH^-] - 15} \left(\frac{mmol}{l} \right) \quad (9)$$

A curva padrão proposta por Fratini admite valores para OH^- entre 35 100 milimoles, e CaO entre 0 e 18 milimoles, como pode ser observado na Figura 6. Isto restringe a utilização do método.

Figura 6 – Curva de saturação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ em função da alcalinidade



Fonte: Modificado da NBR 5753 (ABNT, 2016).

Segundo Pontes (2011), a grande limitação deste ensaio deve-se à avaliação de misturas altamente reativas, em que os resultados podem sair dos parâmetros de leitura permitidos pela curva de calibração do método. Caputo, Liguori e Colella (2008) utilizaram o método de Fratini para avaliar a atividade pozolânica de zeólitas de diferentes minerais. Lavat, Trezza e Poggi (2009) utilizaram o método de Fratini para avaliar a pozolanicidade de resíduos cerâmicos. Resultados promissores foram obtidos por Bahurudeen e Santhanam (2015) na investigação da atividade pozolânica de cinza de casca de arroz utilizando o método de Fratini. Este método encontra-se normalizado pela EN 196-5 (BSI, 2011) e pela NBR 5753 (ABNT, 2016).

2.3.1.7 Difração de raio X

Para compreender o comportamento dos materiais em suas diversas aplicações, o conhecimento de sua microestrutura é de extrema necessidade, assim como sua estrutura cristalina. Microestrutura é o termo utilizado quando há referência aos constituintes estruturais de um material, como a composição presente (proporção entre os constituintes), fases e suas quantidades, contornos de grãos e mesclas, além de falhas, como trincas. Uma técnica muito útil para caracterização de materiais é a difração de raio X (DRX). Esta técnica limita-se à caracterização de sólidos cristalinos e semi-cristalinos. Sólidos totalmente

amorfo não são possíveis de caracterizar por DRX (TEIXEIRA, 2014).

Entre as vantagens da técnica destacam-se a rapidez e a simplicidade do método, a confiabilidade de seus resultados, pois considera-se o difratograma dos sólidos cristalinos sua impressão digital (DAL MOLIN; KIRCHHEIM, 2017).

O princípio da técnica baseia-se na emissão de raios X produzidos pela excitação de partículas do material de alvo, causando a movimentação de seus elétrons, deixando suas posições vacantes. Por exemplo, se o elétron da camada K for retirado, os elétrons de outras camadas como L, M ou N preencherão sua posição, causando, com este movimento, a geração de raios X característicos. Estes devem ser filtrados, geralmente em um filtro de níquel, que possibilita passar apenas raios X de comprimento de onda $\lambda = 1,5413 \text{ \AA}$. Este é um comprimento de onda possível de caracterizar muitos sólidos cristalinos (BLEICHER; SASAKI, 2000).

Incidindo este raio X de comprimento de onda adequado, causará interação com os átomos do material a ser caracterizado, gerando o fenômeno da difração. A difração é explicada pela lei de Bragg, onde:

$$n\lambda = 2d * \sin \theta \quad (10)$$

Sendo:

n – número inteiro – ex.: 1,2,3;

λ – comprimento de onda dos raios X incidentes;

d – distância interplanar;

θ – ângulo de difração.

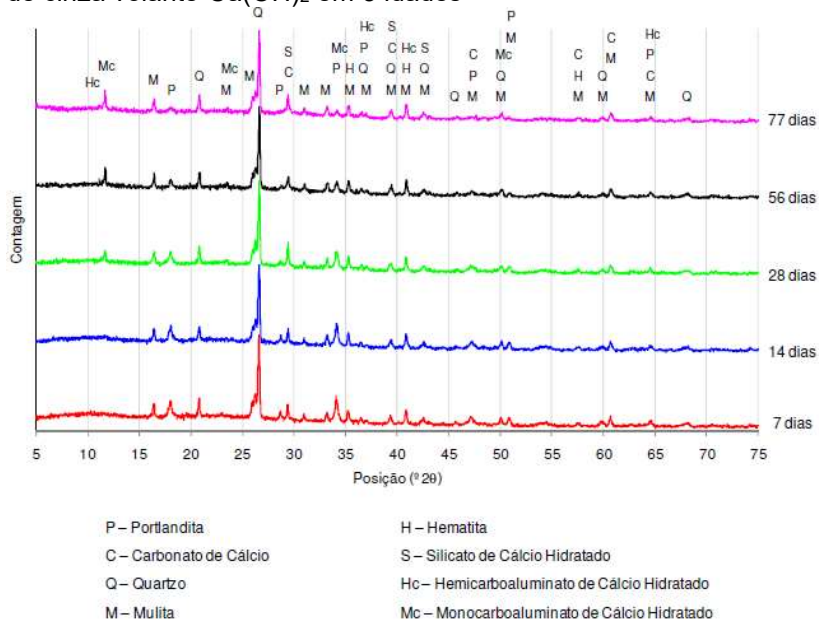
A distância interplanar depende exclusivamente da dimensão da célula unitária cristalina. Já a intensidade dos raios difratados é dependente da posição dos átomos na célula unitária.

Desta forma, esta técnica pode ser empregada para caracterização do estágio da evolução da reação pozolânica em qualquer idade de interesse. Porém, da mesma forma que para avaliação da atividade pozolânica por análise termogravimétrica, há a necessidade de parar a reação na idade de interesse. Isto pode ser feito por congelamento com nitrogênio líquido ou por liofilização.

Hoppe Filho (2008) investigou a atividade pozolânica das cinzas volantes e sistemas cinza volante- Ca(OH)_2 e sua evolução

com o passar do tempo. A Figura 7 mostra um difratograma de pastas de cinza volante- $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Figura 7 – Difratograma da evolução da reação pozolânica de pasta de cinza volante- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ em 5 idades



Fonte: Hoppe Filho (2008, p. 97).

Pode-se observar o pico da portlandita (P) que, com o passar do tempo, apresenta redução considerável. Além do aumento do pico de silicato de cálcio hidratado (S), indica o potencial da cinza volante em fixar a portlandita. Esta é uma técnica muito útil para caracterização da atividade pozolânica de Materiais Cimentícios Suplementares (MCS).

2.3.2 Considerações preliminares

Os métodos que existem para avaliação dos efeitos dos MCS em concretos direcionam seus esforços apenas para os efeitos no estado endurecido, especificamente para mensurar a capacidade de fixação da portlandita. Estes ensaios são realizados combinando apenas o MCS e o cimento, ou o MCS com o CaO – Chapelle, Chapelle modificado, Chapelle (versão LCPC),

Luxán e Fratini. Eles determinam o comportamento do MCS com o cimento e/ou com o CaO com grande precisão. Porém, quando utilizados em concretos e argamassas, os MCS começam a demonstrar influência desde o momento inicial de mistura dos materiais componentes. Esta situação não é considerada pelos métodos acima destacados.

No método de índice de atividade pozolânica, são realizados ensaios com argamassa constituída de cimento ou cal e areia padrão. Nele são avaliadas sua consistência a 30 golpes na mesa de *flow*, para um espalhamento de 225 ± 5 mm, e a resistência à compressão axial aos 28 dias. Avalia-se apenas um teor de substituição – 25%. Este espalhamento dinâmico é medido com grande energia de adensamento, o que não permite avaliar a influência do MCS com sensibilidade considerável na trabalhabilidade, que poderia ser relacionada com a demanda de água no concreto. A resistência à compressão é avaliada apenas com 23 °C; porém, em um elemento estrutural de volume considerável, há variação na sua temperatura interna, contribuindo para a evolução da resistência. Esta resistência ainda é avaliada em argamassa com areia padrão, com composição granulometria carente de finos. Esta composição granulométrica não possui grãos menores que 0,15 mm, o que leva os MCS com partículas próximas a 75 µm ou maiores a funcionarem como uma areia fina. Isto aumenta a resistência à compressão, não por um efeito na matriz, mas por um refinamento dos macroporos gerados pela composição granulométrica da areia padrão.

Em relação ao teor de substituição, este é realizado apenas em 25%. Certos MCS podem apresentar desempenho mais apreciáveis, com outros teores, podendo, em certas situações de aplicação, serem utilizados teores muito mais elevados de substituição.

Caso haja interesse em mensurar a influência do MCS nas propriedades do concreto, este deveria ser testado de forma que fosse possível estabelecer sua influência na demanda de água por metro cúbico de concreto, na perda de trabalhabilidade, teor de aditivo necessário para obtenção e/ou manutenção da trabalhabilidade. No caso de MCS reativos, todas estas características deveriam ser consideradas, e não somente o estudo dos compostos formados pela sua influência na hidratação do cimento ou pela sua própria hidratação.

2.4 CENÁRIO ATUAL

Milhões de toneladas de cinzas volantes são geradas anualmente. Porém, sua utilização global não ultrapassa $\frac{1}{4}$ desta quantidade, sendo uma fração considerável depositada em aterros sanitários (HAIDER, 2016). A Tabela 4 apresenta as porcentagens de consumo das diferentes fontes de energia elétrica.

Tabela 4 – Proporção dos consumos das diferentes fontes para geração de energia elétrica

Fonte	2002	2030
Carvão	39%	38%
Gás	19%	30%
Nuclear	17%	9%
Hidro	16%	13%
Óleo	7%	4%
Renováveis	2%	6%

Fonte: modificado de The coal resource (2014).

Observa-se, na Tabela 4, que há estimativa de que o carvão se manterá como fonte de energia mais consumida no mundo até o ano de 2030.

Feuerborn (2011) comenta que, atualmente, mais de 40 bilhões de toneladas de carvão são minerados por ano no mundo, pressupondo atingir valores de 7 bilhões até 2030. Estimativas mostram que existem 869 bilhões de toneladas de reservas de carvão no mundo, das quais metade consiste em carvão marrom (*linhito*). Com base nas taxas de consumo, estima-se que estas reservas durariam aproximadamente 124 anos. Os estudos de consumo das fontes de energia realizados, em todo o mundo, apontam que, para as próximas duas décadas, o carvão continuará como a principal fonte de energia, como tem sido nos últimos cem anos (WORLD ENERGY RESOURCES: COAL WORLD ENERGY COUNCIL, 2013).

No Brasil, segundo Plano Nacional de Energia Elétrica, estima-se que a contribuição do carvão para a geração de energia elétrica evoluirá de 1,6% a 2,7% até o ano de 2030 (PLANO NACIONAL de ENERGIA - PNE, 2007). As reservas de carvão mineral brasileiras localizam-se no Sul do país, mais precisamente nos estados de Santa Catarina, com 10,41% das reservas; e Rio

Grande do Sul, com 89,25%. A principal jazida situa-se em Candiota, no Rio grande do Sul, onde estão disponíveis 38% da reserva nacional. O carvão disponível nesta região possui potencial energético de baixo desempenho, possuindo aproximadamente 60% de cinza em sua composição (ROHDE *et al.*, 2006).

A mineração nacional de carvão gira por volta de 4 milhões de toneladas por ano, representando 1% do montante mundial, ficando a produção de cinza volante em aproximadamente 2,4 milhões de toneladas por ano.

Logo, este subproduto necessita de atenção considerável para potencializar sua utilização em concreto, uma vez que o uso de cinza volante, desde que atenda características mínimas aqui mencionadas, promove incrementos apreciáveis nas propriedades do concreto, tanto no estado fresco quanto endurecido.

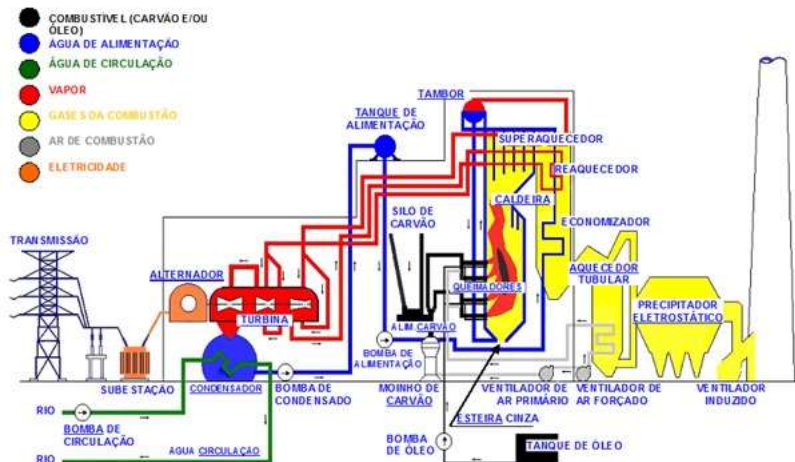
2.4.1 Complexo termelétrico Jorge Lacerda

Usinas termelétricas são instalações industriais destinadas à geração de energia elétrica através de fontes térmicas que aquecem a água para, por meio de vapor, movimentarem os geradores. O calor necessário pode ser obtido através da queima de produtos combustíveis, como bagaços de cana, casca de arroz, madeira, óleo combustível, óleo diesel, gás natural, *carvão mineral* e urânio enriquecido. Esta queima é feita em uma caldeira formada por uma extensa rede de tubos, que conduzem a água e a expõem ao calor gerado por meio da queima das fontes mencionadas, produzindo vapor, que é conduzido em alta pressão às pás da turbina. Estas turbinas têm eixo de rotação conectado diretamente ao eixo de um gerador de energia elétrica. A passagem do vapor pelas pás gera uma potência mecânica, promovendo seu giro e, conseqüentemente, colocando o gerador em movimento, transformando, desta forma, a potência mecânica em potência elétrica (COELHO, 2013).

Após a passagem pela turbina, o vapor gerado pela caldeira é resfriado em um condensador e convertido outra vez em água, voltando aos tanques de alimentação da caldeira, fechando o ciclo. A energia elétrica gerada é, por sua vez, transportada por linhas de alta tensão aos sistemas de distribuição e redes de transmissão, onde a eletricidade passa por diversas subestações,

que aumentam ou diminuem sua tensão para, assim, poder chegar a comércios e residências. A Figura 8 apresenta o funcionamento de uma usina termelétrica.

Figura 8 – Esquema de funcionamento de uma usina termelétrica



Fonte: Modificado de Alves e Gorges (2007).

No cenário atual de geração de energia elétrica no Brasil, as usinas termelétricas são responsáveis pela geração de aproximadamente um quarto da capacidade total do país. Em todo território nacional são contabilizadas quase 2 mil usinas térmicas. No município de Capivari de Baixo, Santa Catarina, encontra-se o maior complexo termelétrico movido a carvão da América Latina: o Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, constituído por três usinas térmicas movidas a carvão, com capacidade instalada total de 857 megawatts (FONSECA, 2005), conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Capacidade instalada do Complexo Jorge Lacerda

USINA	UNIDADE	POTÊNCIA (MW)
UTLA	1 e 2 (50 MW por unidade)	232
	3 e 4 (66 MW por unidade)	
UTLB	5 e 6 (131 MW por unidade)	262
UTLC	7 (363 MW)	363
TOTAL		857

Fonte: Modificado de Engie (2016).

Todas as informações apresentadas daqui até o fim deste item foram obtidas de uma única fonte, pois trata-se de um complexo termelétrico específico, onde há apenas esta documentação descrevendo sua infraestrutura de produção de energia. Este material foi desenvolvido por Alves e Gorges no ano de 2007, sob solicitação da direção da Tractebel Energia que, à época, era a responsável pelo complexo. Atualmente, o complexo está sob direção da Engie.

Cada usina foi construída em diferentes anos, sendo a UTL A a mais antiga, seguida pela UTL B e, posteriormente, a UTL C, que é a mais recente.

O Complexo Termelétrico Jorge Lacerda (CTJL) é considerado um verdadeiro laboratório de tecnologias térmicas para produção de energia, dadas as características de suas 7 unidades. No CTJL existem, instaladas e em funcionamento, tecnologias de diferentes décadas e de diversos países, como Itália, Alemanha, República Tcheca, dentre outros. É considerável a diferença tecnológica de uma unidade para outra.

As unidades 1 e 2 são as únicas que não possuem ciclo de vapor com reaquecimento. A queima do carvão é realizada em queimadores pulverizadores verticais, enquanto nas demais, os queimadores são frontais. As unidades 5 e 6 são as únicas que possuem aquecedor de ar tubular; as demais utilizam aquecedor regenerativo (tipo *Ljungström*). A unidade 7 é a única que utiliza caldeira de uma calha com princípio de *Benson*. As demais utilizam caldeiras com circulação natural, com tambor separador água-vapor.

A unidade 7 também é a única que utiliza sistema de água de resfriamento de ciclo fechado, mediante a utilização de torres de resfriamento. As demais unidades utilizam circuito aberto, onde a água, após realizar o resfriamento no condensador, retorna ao rio.

Todas as unidades do CTJL possuem tiragem balanceada, ou seja, apresentam sistema de ventiladores forçados na entrada dos gases (aspiração), e ventiladores induzidos na saída dos gases (exaustão). O ventilador induzido, normalmente, é de maior capacidade do que o forçado, devido ao volume de gases de exaustão ser maior do que o volume de ar (o ventilador induzido provoca depressão na fomalha).

As unidades geradoras do CTJL estão equipadas com precipitadores eletrostáticos, os quais reduzem o lançamento de

poluentes sólidos por suas chaminés. Há um programa de controle ambiental, com a instalação de equipamentos de monitoramento próximo à região de implantação das unidades geradoras.

O sistema de queima de combustível compreende todos os sistemas utilizados, tanto de combustível primário quanto secundário. O combustível primário é utilizado como fonte básica, e principal de geração de calor, neste caso, é o carvão. Já o combustível secundário é utilizado como fonte de apoio; em outras palavras, durante a ignição e como chama de sustentação nas operações de baixa carga. Nas unidades térmicas a carvão, os combustíveis secundários normalmente utilizados são o óleo diesel e o óleo pesado.

Há dois sistemas de combustíveis, o sólido e o líquido. O carvão, combustível sólido, é transportado para um silo através de esteiras e, na saída do silo, está o alimentador. Este alimentador é responsável por dosar a quantidade de carvão que será fornecida aos moinhos. Esta quantidade é influenciada por fatores, como a potência que se deseja obter no gerador e a umidade do carvão. O moinho pulveriza o carvão em um pó muito fino. O carvão entra pelo duto central, sendo triturado pelos elementos de moagem (esferas ou rolos) através de movimentos rotativos. O carvão triturado é transportado pneumaticamente até a parte superior do moinho (classificador), onde as partículas grossas retornam, por gravidade, para a seção inferior (de moagem), enquanto as partículas com granulometria adequada são transportadas pelo ar primário para os queimadores.

A função do sistema de carvão pulverizado é reduzir o carvão a partículas finas, enviando-o para os queimadores, promovendo uma combustão completa na fornalha, com um mínimo de excesso de ar possível.

Os equipamentos básicos do sistema de carvão pulverizado são:

- Alimentadores de carvão;
- Moinhos de carvão;
- Queimadores de carvão.

Para que o sistema opere adequadamente, a umidade superficial no carvão pulverizado não deve exceder 3%, e a granulometria não deve ser menor do que 90% através da peneira de 50 *mesh*.

Os alimentadores de carvão são equipamentos que têm a finalidade de extrair o carvão bruto dos silos de estocagem das

usinas e enviá-lo aos moinhos, de forma contínua e controlada, ou seja, com capacidade de alimentação variável. Isto é necessário porque a carga da caldeira é proporcional à quantidade de calor fornecida a ela que, por sua vez, varia diretamente em função da quantidade de combustível queimado.

Os moinhos de carvão são os equipamentos que recebem o carvão bruto dos alimentadores e o pulverizam até uma fina granulometria, promovendo, simultaneamente, sua secagem. O carvão, então, é enviado diretamente aos queimadores (sistema de queima direta) ou aos silos de carvão pulverizado (sistema de queima indireta), através dos dutos de carvão pulverizado.

Atualmente, no CTJL estão presentes moinhos de média rotação (20 a 100 rpm), dos tipos moinhos de esferas e pista e moinhos de rolos e pista.

Para que o carvão apresente boas condições de queima na fornalha, a granulometria do carvão pulverizado, que sai do classificador em direção aos queimadores, deve ser de, no mínimo, 70% passando pela peneira de 200 *mesh*. O nível de recirculação do carvão pode ser controlado durante a operação do moinho, através das pás reguláveis do classificador, que introduzem uma perda de carga ao fluxo da mistura, de tal forma que, quanto mais fechadas estiverem, maior será a recirculação, e vice-versa.

No início, todo o carvão utilizado nos moinhos das usinas do CTJL era concebido diretamente pelo Lavador de Capivari de Baixo, instalado no final da década de 40, no período pós-guerra, devido à dificuldade de importação de carvão metalúrgico. O carvão bruto, recebido diretamente das minas pelo lavador, seguia por um sistema de flotagem, que produzia o carvão metalúrgico com poder calorífico de 7.500 kcal/kg. Os rejeitos gerados neste sistema eram constituídos de um carvão com menor poder calorífico, sendo, então, depositados nas proximidades do lavador. Nos dias atuais, este carvão vem sendo consumido em misturas com o carvão de menor poder calorífico, ainda fornecido pelas minas.

Conforme histórico apontado por Trierweiler *et al.* (2008), corroborado por Rohde e Machado (2016), a usina termelétrica situada em Capivari de Baixo teve o início de sua construção na década de 60, com a constatação de que os rejeitos de carvão produzidos pelo lavador possuíam valor calorífico aceitável. Então, tendo como objetivo o aproveitamento destes rejeitos, ocorreu a

implantação da usina termelétrica na região, a Sociedade Termelétrica de Capivari (SOTELCA). Posteriormente, na mesma década, iniciou a operação do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, com a implantação das unidades 1 (1963) e 2 (1965), que compõem a UTL A. Nos anos 70, houve nova ampliação do Complexo Jorge Lacerda, com a instalação das unidades 3 (1974) e 4 (1974), ainda componentes da UTL A. No início da década de 80 foram implantadas as unidades 5 (1980) e 6 (1980). No final do ano de 1996, entrou em operação a unidade 7, compondo a última usina termelétrica do CTJL, a UTL C. Deste então, o complexo mantém esta configuração até os dias de hoje.

Em 1990, quando o Brasil era presidido por Fernando Collor de Mello, o mercado para importação de carvão metalúrgico foi aberto, ficando a produção, através do carvão catarinense, inviável economicamente. Consequentemente, houve o fechamento do Lavador de Capivari e da Indústria Carboquímica Catarinense. Assim, o carvão extraído na região carbonífera do sul do estado passou a ser destinado apenas para a produção de energia elétrica no Complexo Jorge Lacerda (TRIERWEILLER *et al.*, 2008).

2.5 CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND COM CINZA VOLANTE

Com a crescente preocupação ambiental que reflete na busca por otimização dos processos dos diversos setores da indústria, o uso de cimentos Portland compostos tem ocupado expressiva fatia do mercado dos materiais empregados na construção civil. Os materiais utilizados junto ao clínquer Portland são os MCS que, como já comentado, são de origem natural ou de outros setores da indústria onde eram considerados resíduos. Porém, com a potencial utilização junto ao cimento passaram a ser classificados como subprodutos.

Estes materiais apresentam influência no estado tanto fresco quanto endurecido dos concretos, havendo a necessidade do entendimento destes comportamentos. Como a cinza volante é um subproduto há grande variação em suas características mesmo que seja proveniente da mesma unidade termelétrica.

2.5.1 Influência da cinza volante nas propriedades de concretos de cimento Portland no estado fresco

Para que o concreto de cimento Portland venha a atender as propriedades requeridas em projeto para o estado endurecido, são necessários cuidados de extrema importância no estado fresco. Diversos são os fatores que influenciam nas propriedades requeridas pelo concreto no estado fresco, e cada situação deve ser tratada com cautela e a devida particularidade. Além dos fatores externos, como temperatura ambiente de concretagem, processos de lançamento e adensamento, intervalo de tempo de concretagem, fatores intrínsecos, como as características dos materiais, devem ser considerados com a devida relevância. As cinzas volantes, por serem subprodutos, apresentam variações de suas propriedades físicas e químicas. Para o estado fresco, as propriedades físicas apresentam maior influência, podendo a granulometria, a forma de seus grãos e/ou o teor de carvão incombusto influenciar a demanda de água e modificar a perda de trabalhabilidade (PONIKIEWSKI; GOLASZEWSKI, 2014).

As cinzas volantes consideradas de boa qualidade têm como principal influência, nas propriedades do concreto no estado fresco, a redução na demanda de água para uma mesma trabalhabilidade. Esta redução, segundo Malhotra e Mehta (1996), Neville (1997) e Aitcin (2000), varia entre 5% e 15%, quando comparada a um concreto com os mesmos constituintes, mas sem MCS. Esta situação benéfica se mantém, gradativamente, até 35% em massa sob o peso do cimento. A CV promove coesão ao concreto, e previne a sua exsudação. Lee, Lee e Lee (2003) explicam que esta plastificação se deve ao maior volume absoluto de pasta, devido à densidade inferior da CV em relação ao cimento Portland. Outro ponto destacado pelos autores é a redução do efeito de floculação das partículas de cimento propiciada pelas partículas de CV. Além da formação mais lenta dos produtos de hidratação, seu uso mantém a plasticidade por um tempo mais elevado, como o relatado nas pesquisas de Kabay *et al.* (2015).

Ademais, estes efeitos podem ser relacionados à forma esférica das partículas, sendo muitas delas maciças e com baixa capacidade de absorção de água, o que facilita o movimento das partículas vizinhas, particularmente em quantidades maiores que 25% de substituição (KASHANI *et al.* 2014).

Estudos de Bentz *et al.* (2012) e Kashani *et al.* (2014) mencionam o aumento da fluidez de concretos produzidos com CV, em comparação ao concreto somente com cimento Portland. Os autores comentam, ainda, que o uso de CV permite a redução da quantidade de aditivos redutores de água empregados para promover fluidez ao concreto.

Segundo Ponikiewski e Golaszewski (2014), CV de alto teor de cálcio compromete a trabalhabilidade que, por sua vez, afeta as propriedades mecânicas e a durabilidade do concreto. O desempenho do concreto no estado fresco é muito sensível a diversos fatores que podem comprometê-lo significativamente, como a relação água / aglomerante (a/ag), tipo e proporção de MCS. Outro fator considerado preponderante ao desempenho no estado fresco é a densidade de empacotamento das partículas de cimento Portland e de MCS. Investigações publicadas por Kwan e Wong (2007) relatam que um esqueleto granular bem estruturado da pasta, contendo CV, propicia certa redução do volume de água por unidade de concreto. O formato das partículas de MCS tem papel ímpar nesta relação, uma vez que uma forma próxima de esférica lubrificará as partículas de cimento Portland, necessitando, desta forma, de quantidade menor de água para garantir o rolamento das partículas sólidas da pasta. Para promover este efeito de lubrificação da pasta, o MCS não precisa, necessariamente, ser reativo com o cimento. Logo, materiais cimentícios ou inertes podem ser utilizados para aumentar a densidade de empacotamento (KWAN; CHEN, 2013).

Com vista a este comportamento, materiais como nano sílica e sílica líquida têm sido utilizados para promover aumento no empacotamento das partículas da pasta. Sua pequena dimensão permite preencher os vazios entre as partículas de cimento, por menores que sejam. Por outro lado, o uso destes materiais aumenta, além da densidade de empacotamento, a área específica. Fung e Kwan (2010) relatam que este efeito duplo do uso destes materiais com partículas de grande finura aumenta a demanda de água, quando a finura destas partículas excede certos valores. Entretanto, em sua pesquisa, os autores não indicam um tamanho ideal, uma vez que outros fatores são preponderantes para que a demanda de água não seja afetada, como, por exemplo, a forma das partículas. Nochaiya, Wongkeo e Chaipanich (2010) destacam, em sua pesquisa, que um equilíbrio entre o aumento da densidade de empacotamento e a relação

entre o aumento da demanda de água e a área específica pode ser obtido por uma pasta mais rica em sólidos que uma pasta de cimento Portland puro, porém, mais pobre que emulsão de sílica ativa.

Kwan e Chen (2013) utilizaram cinzas volantes como agente promotor de densidade de empacotamento da pasta sem aumentar excessivamente a área superficial. A cinza volante possui partículas esféricas, grande parte em escala micrométrica. A cinza por eles investigada possuía grãos menores que os de cimento Portland; porém, maiores que os da sílica de alta reatividade.

A cinza volante promove, ainda, um retardo de aproximadamente uma hora na pega do concreto, ocasionado pelo SO_3^{2-} (ion sulfito), que é liberado da superfície de suas partículas. Este retardo pode ser benéfico em concretagem de grande volume, onde o início da pega é retardado intencionalmente, mas o intervalo entre o início e fim de pega não é alterado.

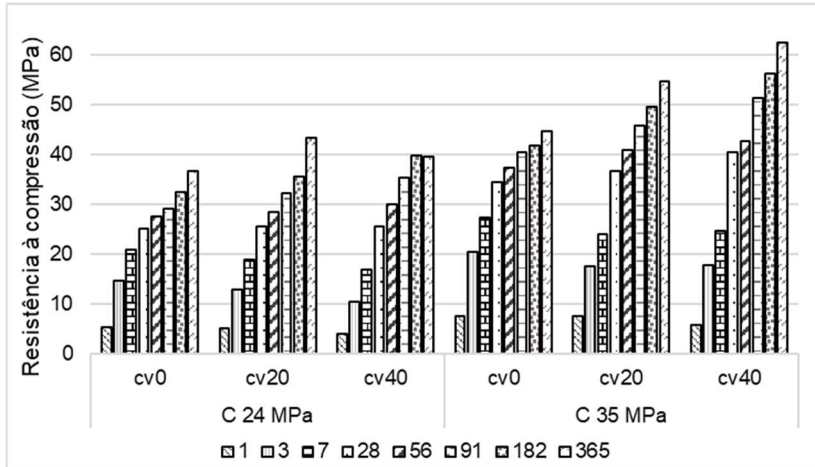
2.5.2 Influência da cinza volante nas propriedades de concretos de cimento Portland no estado endurecido

Devido a diversos fatores, como o tipo de carvão submetido à queima ou a tecnologia da usina termelétrica, as cinzas volantes apresentam elevada variação em suas propriedades, tanto físicas quanto químicas. Estas propriedades estão diretamente relacionadas às influências da CV nas propriedades do concreto, tanto no estado fresco, destacadas no item 2.5.1, quanto no estado endurecido, que estão apresentadas no presente item. Odler (1991 *apud* NEVILLE, 1997) mostra, em sua pesquisa, que a resistência à compressão relativa em função do teor de CV apresenta crescimento até o teor de 30%, em diferentes idades a partir de 28 dias em diante.

Huang *et al.* (2013) apresenta, como parte dos resultados de sua pesquisa, um crescimento da resistência à compressão, na medida em que a quantidade de CV é aumentada nos concretos de duas famílias de resistência, em idades após 28 dias. A Figura 9 apresenta os valores médios encontrados pelos autores. Estes investigaram ainda, na classe C 35 MPa o uso de uma CV de alta perda ao fogo (teor de incombusto – 7,8%). Os resultados

mostram que a evolução da resistência à compressão é expressivamente influenciada, havendo reduções entre 10 e 15% para o teor de 40% nas idades de 90, 182 e 365 dias.

Figura 9 – Comparativo do comportamento da resistência à compressão de concretos de duas classes de resistência com diferentes teores de CV em diferentes idades



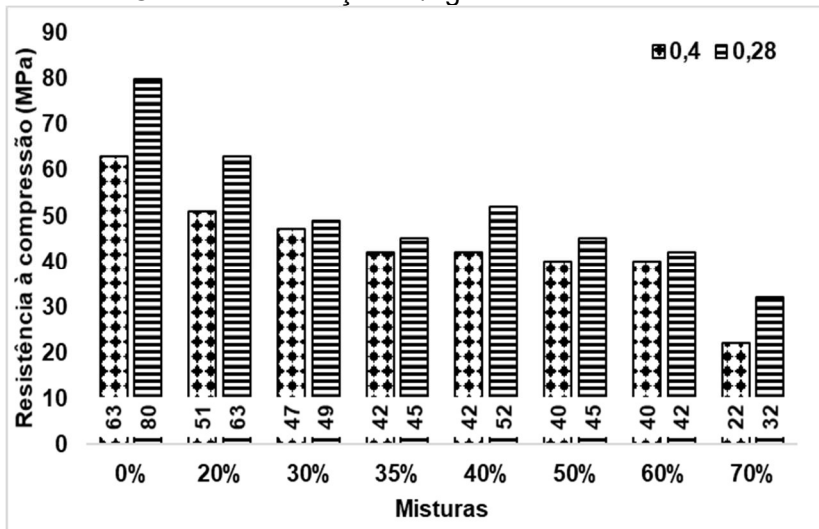
Fonte: Adaptado de Huang *et al.* (2013, p. 74).

Nas duas pesquisas destacadas, a resistência do concreto aumentou, mesmo com teores acima de 30% de CV. Isto mostra que mesmo com teores elevados ainda há portlandita (CH) para ser fixada pela CV.

Dados apresentados por Crouch, Hewitt e Byard (2007), comparando CV classe C e F, mostram que as CV classe F apresentam um decréscimo na resistência à compressão, aos 28 dias, nos teores de CV 20, e 50% em duas relações água/aglomerante. A redução da resistência à compressão relatada foi, em média, de 36% da CV F para a CV C. Este comportamento é atribuído ao teor de cálcio que, para CV C, é maior que para a CV F, permitindo, desta forma, que os grãos de CV iniciem a reação pozolânica, mesmo sem a CH do cimento Portland estar disponível. Já a CV F necessita que o CH seja liberado para iniciar a reação pozolânica. Isto mostra que a classificação química da CV tem influência direta na resistência à compressão do concreto, independentemente da quantidade de CV substituinte do cimento Portland.

A influência da CV na resistência à compressão do concreto sofre interferência direta da relação água/aglomerante. A redução da resistência desencadeada pelos altos teores de CV pode ser compensada pela redução da relação a/ag. Na publicação de Lam, Wong e Poon (1998) foram estudados concretos com a/ag 0,5 e 45% de CV, e a redução da resistência à compressão, aos 28 dias, foi de 30%. Enquanto em concreto com a/ag 0,3 e 45% de CV, a redução foi de apenas 17%. Poon, Lam e Wong (2000) destacam que, com relação a/ag de 0,24 e 45% CV é possível atingir níveis de resistência à compressão de 80 MPa aos 28 dias. Esta melhoria da resistência à compressão também é relatada por Bentz *et al.* (2010), onde os autores investigaram teores de CV (0, 20, 30, 35, 40, 50, 60 e 70%) em duas relações a/ag 0,28 e 0,4. A Figura 10 apresenta os níveis de resistência obtidas aos 7 dias.

Figura 10 – Resistência à compressão de misturas com diferentes teores de CV em duas relações a/ag



Fonte: Adaptado de Bentz *et al.* (2010 p. 4).

Os autores relatam que há aumento na resistência à compressão, na faixa de 3 a 37%, nos níveis de substituição de 20 a 70%, comparando o mesmo teor com as duas relações a/ag consideradas como critério. Isso mostra que os efeitos da CV são mais pronunciados em a/ag mais baixos.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados no desenvolvimento desta pesquisa e suas características. Destaca-se, ainda, o programa experimental utilizado e as variáveis investigadas.

3.1 MATERIAIS

O presente item apresenta os materiais utilizados no desenvolvimento das etapas do programa experimental desta pesquisa. Destacam-se as propriedades daqueles que não são objetos de estudo e a procedência de todos. Aqueles que não têm suas propriedades apresentadas aqui, terão seus dados apresentados e discutidos no capítulo 0.

3.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland utilizado foi o do tipo CP V produzido pela Itambé Cimentos S.A.. Este material foi coletado em duas etapas: a primeira foi utilizada para o estudo em argamassa; e a segunda, para o estudo em concreto. A Tabela 6 é composta pelas propriedades físicas dos dois lotes de cimento Portland empregados nesta pesquisa. Os requisitos da NBR 16697 (ABNT, 2018) foram atendidos pelos dois lotes.

Tabela 6 – Propriedades físicas do cimento Portland

Propriedade		Lote 1	Lote 2	Parâmetro ABNT
Expansibilidade	Quente mm	0	0	< 5,0
Massa específica	g/m ³	3,12	3,11	-
Tempos de pega	Início h:min	03:20	03:40	≥ 1:00
	Fim h:min	04:00	04:15	< 10:00
Finura	#200 %	0,03	0,05	< 6,0
	#325 %	0,3	0,4	-
	Blaine cm ² /g	4.470	4.450	-
	1 dia MPa	22,7	23,8	≥14
Resistência à compressão	3 dias MPa	38,3	36,3	≥24
	7 dias MPa	44	42,9	≥34
	28 dias MPa	52	49,2	-

Fonte: Modificado de Itambé Cimentos (2017).

A Tabela 7 apresenta as propriedades químicas dos dois lotes de cimento utilizados nesta pesquisa. Os requisitos da NBR 5733 (ABNT, 1991) foram atendidos.

Tabela 7 – Propriedades químicas do cimento Portland

Propriedade (%)	Sigla	Lote 1	Lote 2	Parâmetro ABNT
Alumina	Al ₂ O ₃	4,22%	4,28%	-
Sílica	SiO ₂	18,60%	18,80%	-
Óxido de ferro	Fe ₂ O ₃	2,97%	3,02%	-
Óxido de cálcio	CaO	60,28%	60,44%	-
Óxido de magnésio	MgO	3,87%	3,53%	≤ 6,5
Trióxido de enxofre	SO ₃	3,17%	3,13%	≤ 4,5
Perda ao fogo	PF	3,48%	3,42%	≤ 6,5
Dióxido de carbono	CO ₂	1,45%	1,85%	-
Óxido de cálcio livre	CaO L.	0,79%	0,67%	-
Resíduos insolúveis	RI	0,71%	0,90%	≤ 3,5
Equivalente alcalino	Eq. Alc.	0,74%	0,69%	-

Fonte: Modificado de Itambé Cimentos (2017).

A Tabela 8 apresenta a composição mineralógica potencial dos dois lotes de cimento utilizados nesta pesquisa. A determinação da composição foi realizada segundo o estabelecido pela C 150 (ASTM, 2017).

Tabela 8 – Composição mineralógica potencial do cimento Portland (Método de Bogue)

Mineralogia (%)	Sigla	Lote 1	Lote 2
Alita	C ₃ S	60,08	56,84
Belita	C ₂ S	8,00	11,02
Celita	C ₃ A	6,16	6,23
Ferrita	C ₄ AF	9,04	9,19

Fonte: Autor (2018).

3.1.2 Água de amassamento

A água utilizada foi procedente da rede de abastecimento da cidade de Tubarão – SC, que é administrada pela concessionária Tubarão Saneamento S.A.. Ela é utilizada em todo o centro Tecnológico da UNISUL.

3.1.3 Agregados

Os agregados utilizados nesta pesquisa foram provenientes da região sul de Santa Catarina. Desta forma, os agregados de britagem tinham origem granítica, e o outro, origem de quartzo. O agregado graúdo foi brita 19 mm; e os agregados miúdos, areia de grossa de britagem e uma areia fina de cava. Os agregados de britagem foram provenientes da pedreira Lasca Mineração de Imbituba – SC, e o agregado natural da Tramontim Extração de Areia de Içara – SC. Como a brita 19 apresenta distribuição granulométrica fina, não se considerou necessário realizar composição com brita 0, mesmo se tratando de concreto bombeável.

Em parte dos ensaios em argamassa foi utilizada areia padrão produzida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT).

A Tabela 9 apresenta a caracterização dos índices físicos dos agregados utilizados nesta pesquisa.

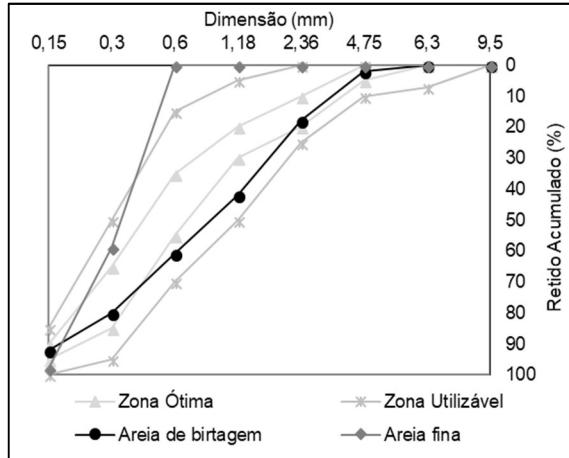
Tabela 9 – Caracterização dos índices físicos dos agregados

Propriedades		Areia de Britagem	Areia Fina	Brita 19
Módulo de finura		2,93	1,54	6,85
Dimensão máxima característica	mm	4,8	0,6	19,1
Massa unitária em estado solto	kg/m ³	1465	1480	1410
Teor de material pulverulento	%	8,4	0,8	1,0
Impurezas orgânicas e húmicas	ppm	< 300	< 300	< 300
Teor de argila em torrões e materiais friáveis	%	-	0,5	-
Massa específica aparente	g/cm ³	2,575	2,608	2,644
Absorção	%	1,03	0,06	1,02

Fonte: Autor (2018).

A Figura 11 ilustra a distribuição granulométrica das areias utilizadas nesta pesquisa, tanto para o estudo em argamassa quanto para o estudo em concreto. A areia fina apresenta distribuição granulométrica entre a zona utilizável inferior e a zona ótima inferior, podendo, então, ser enquadrada como areia fina. A areia de britagem se mantém próxima à zona ótima superior, podendo ser enquadrada como uma areia grossa. Os padrões de zona granulométrica são estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

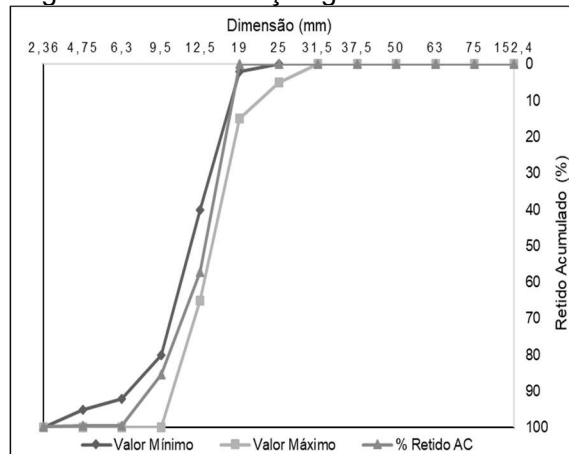
Figura 11 – Distribuição granulométrica areia de britagem e areia de cava



Fonte: Autor (2018).

A Figura 12 apresenta a distribuição granulométrica da brita utilizada no estudo em concreto desta pesquisa. Esta brita se encaixa nos limites para brita 9,5/25 d/D, conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009).

Figura 12 – Distribuição granulométrica brita



Fonte: Autor (2018).

3.1.4 Cinza volante

As amostras foram coletadas no CTJL, especificamente na unidade da Votorantim Cimentos S.A. instalada dentro do complexo.

Foram coletadas amostras das três Unidades Termelétricas, UTL A, UTL B e UTL C. Apenas uma coleta foi realizada. Foram realizados diferentes processos de beneficiamento e certa combinação da CV de duas UTL, com o intuito de investigar potenciais melhoras no desempenho, quando utilizadas em substituição ao cimento Portland. Uma CV moída foi beneficiada pela empresa Pozofly, de Capivari de Baixo - SC. A Figura 14 apresenta os rótulos utilizados no decorrer desta dissertação para as diferentes cinzas volantes. Por ser um objeto de pesquisa, as propriedades das cinzas volantes estão apresentadas no capítulo 0.

3.1.5 Aditivos

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foi utilizado o aditivo polifuncional de alta eficiência, à base de policarboxilato – *mira flow 973*, produzido e disponibilizado pela empresa *Grace Construction Products*. A Tabela 10 apresenta suas características. Este aditivo é recomendado pelo fabricante como um redutor de água de alta eficiência e apreciável tempo de manutenção da trabalhabilidade. Em dosagens até 0,8% do peso do aglomerante, é recomendado para concretos convencionais.

Tabela 10 – Características do aditivo *mira flow 973*

Propriedade	Especificação	Unidade
Aparência	Líquido alaranjado	Visual
pH	4,5 - 6,5	-
Densidade	1,030 - 1,070	g/cm ³
Teor de sólidos	32,2	%

Fonte: Modificado de *Grace Construction Products* (2016).

3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

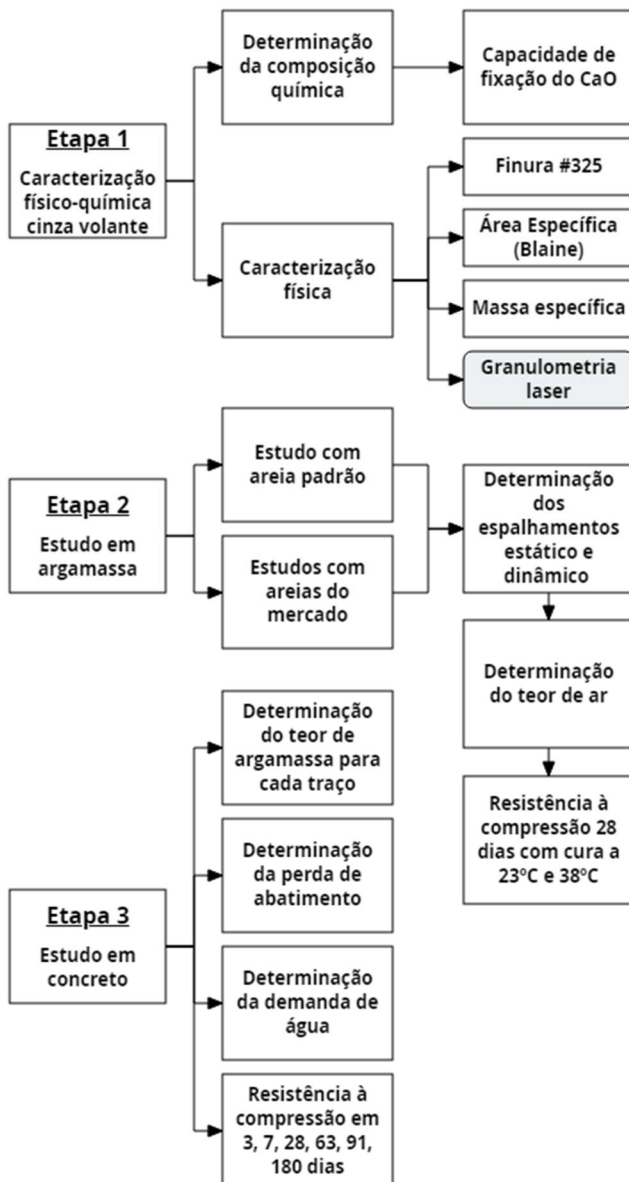
Para o desenvolvimento desta pesquisa foi proposto um programa experimental específico organizado em 3 etapas principais: caracterização físico-química das cinzas volantes; um estudo em argamassa e, por fim, um estudo em concreto, conforme Figura 13. O estudo em argamassa foi realizado com o intuito de selecionar quais CV seriam investigadas no estudo em concreto. O estudo em concreto, por sua vez, foi realizado com o objetivo de confirmar os resultados obtidos no estudo em argamassa, além de possibilitar a construção de curvas de dosagem de concreto de cimento Portland, contendo diferentes teores de cinza volante.

Os procedimentos aqui apresentados foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil (LEC-TB) e no Laboratório de Análises Químicas (LAQ) da Universidade do Sul de Santa Catarina instalados no Centro Tecnológico (CENTEC - UNISUL).

Destaca-se, ainda, que foram realizadas investigações preliminares, primordiais para construção do programa experimental aqui proposto com intuito de alcançar os objetivos específicos apresentados no item 1.3.2. Para as duas CV utilizadas no estudo em concreto foi determinada a distribuição do tamanho de suas partículas por granulometria *laser* utilizando o granulômetro *Laser Microtrac s3500, sem meio dispersante*, do Laboratório de Nanotecnologia (NANOTEC), UFSC. Estes resultados estão no APÊNDICE B - Figura B 1.

No presente capítulo são apresentadas, inicialmente, as variáveis investigadas, como a unidade termelétrica originária das CV, suas características particulares como composição química e propriedades físicas. Em seguida é apresentada a sequência experimental dos ensaios adotada.

Figura 13 – Organograma principal da pesquisa



Obs.: O ensaio de granulometria laser foi realizado apenas nas amostras UTL B e C N e UTL B e C Mc, por terem sido as estudadas em concreto.

Fonte: Autor (2018).

3.2.1 Variáveis investigadas

Como objetivo geral, esta pesquisa buscou identificar uma ou mais cinzas volantes com potencial de uso em concretos de cimento Portland produzidos em centrais dosadoras. Para isto, optou-se por investigar as cinzas volantes provenientes do CTJL, instalado em Capivari de Baixo, Santa Catarina. Espera-se identificar uma cinza volante natural, ou propor um processo de beneficiamento que possibilite a obtenção de concreto com menor demanda de água, que permita a obtenção de uma melhor relação custo benefício no alcance das resistências à compressão em 28 dias.

Desta forma, foram definidas as seguintes variáveis de estudo:

Unidade Termelétrica (UTL): Como apresentado no item 2.4.1, o CTJL é composto de três Usinas Termelétricas. UTL A – a primeira a ser construída, em meados dos anos 1960; logo, com tecnologia de queima não muito favorável à obtenção de uma CV de elevado desempenho em concreto, como consta nos estudos preliminares, prejudicial à demanda de água. A UTL B – construída em meados de 1970, com tecnologia de queima um pouco melhor, onde se obtém uma CV com potencial considerável para uso em concreto, conforme constatado nos estudos preliminares. Por fim, a UTL C – construída na década de 1990, é composta com a tecnologia de queima mais avançada instalada no CTJL. Porém, não é muito diferente da instalada na UTL B, como apresentado no capítulo 0. As cinzas provenientes das usinas UTL B e UTL C são comercializadas pela empresa Pozofly (cinza Lima). As CV destas UTL são misturadas para comercialização. Este produto é disponibilizado na forma natural (Bruta) e com certo grau de moagem. Por este motivo, foi investigada, também, a CV obtida pela mistura das CV destas usinas.

Fração retida na peneira 45 μm : Como foi apresentado no capítulo 0, os MCS apresentam maior potencial de reatividade com o cimento quando são menores que 45 μm . Logo, optou-se por reter as CV das três usinas na peneira 45 μm . Posteriormente, uma parte desta fração retida foi encaminhada para os estudos em argamassa, na forma obtida no peneiramento. Outra parte foi destinada à moagem em moinho de bolas (Figura 16), até a obtenção de uma área específica de Blaine próxima da cinza

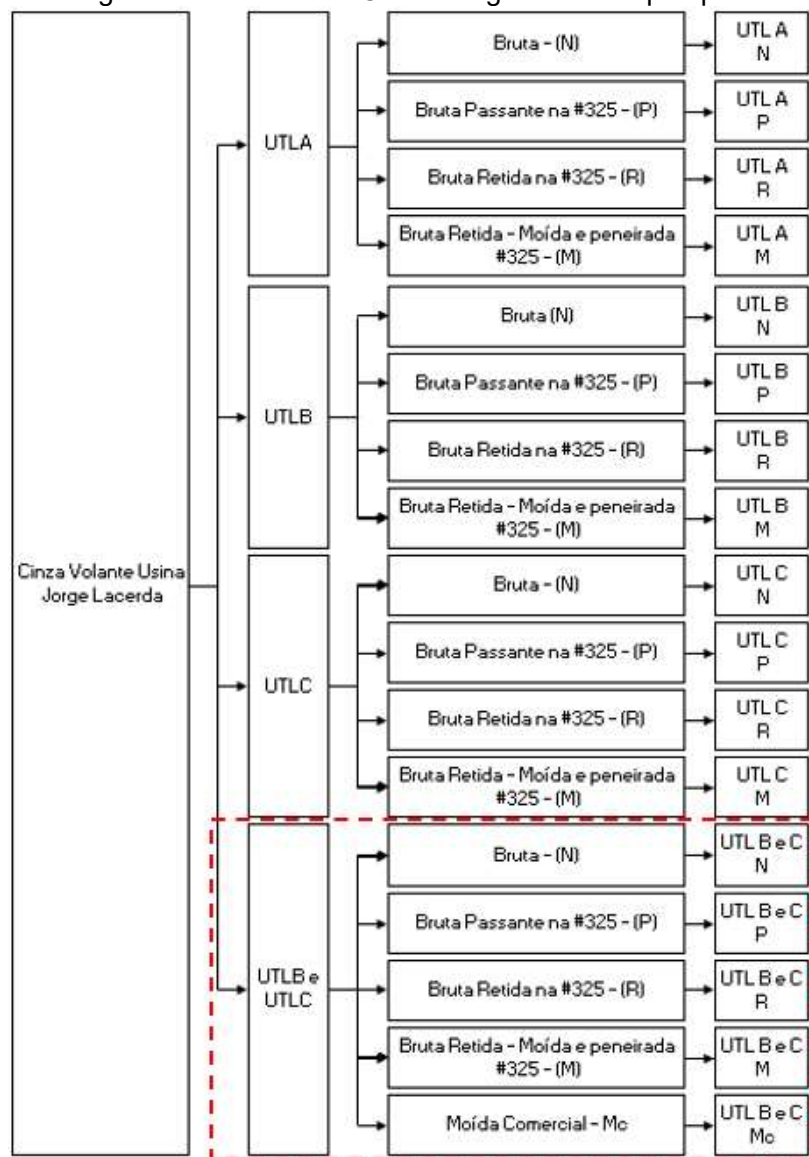
moída disponível no mercado. Todas foram caracterizadas físico-quimicamente.

Fração passante na peneira 45 µm: Com já mencionado, esta seria a fração de maior reatividade para um MCS. Para uma CV, caso os grãos possuam este tamanho máximo, sua forma será muito próxima de esférica, conforme apresentado no item 2.2.1, Figura 3. Logo, esta fração obtida por peneiramento foi investigada nos estudos em argamassa, para as CV das três usinas e para a origem de mistura das UTL B e UTL C.

Teor de substituição: O teor de substituição recomendado pelas normas, tanto no Brasil quanto nos Estados Unidos e na Europa, para ensaios de Índice de Atividade Pozolânica (IAP), é de 25%. Logo, conforme observado em pesquisas comentadas no capítulo 2, os teores de substituição ideais para MCS do tipo CV podem variar de 10 a 35%. Quanto ao interesse, são teores moderados de substituição. Diversos estudos têm sido realizados para teores mais elevados, que vêm apresentando resultados promissores. Porém, estes não são de interesse nesta pesquisa. Desta forma, foram investigados teores de substituição de 10%, 20%, 30% e 35% para as diferentes CV estudadas. As substituições foram feitas em volume absoluto, pois as massas específicas das CV investigadas nesta pesquisa são muito menores que a massa específica apresenta pelo cimento Portland utilizado. Uma amostra referência contendo somente cimento Portland também foi investigada nos estudos em argamassa e, posteriormente, em concreto, com o intuito de determinar a influência das diferentes CV nos teores destacados. Todo estudo em concreto e/ou argamassa necessita de uma amostra de referência, uma vez que vários são os fatores que influenciam nas características no seu estado, tanto fresco quanto endurecido.

A Figura 14 apresenta as diferentes CV investigadas nesta pesquisa, considerando as variáveis acima apresentadas. Nos itens a seguir são detalhadas cada sub etapa deste programa experimental.

Figura 14 – Diferentes CV investigadas nesta pesquisa



Obs.: O tracejado em vermelho é referente ao estudo em argamassa da etapa 2 e ao estudo em concreto (Figura 13).

Fonte: Autor (2018).

3.2.2 Etapa 1 - Caracterização das cinzas volantes

A caracterização das cinzas volantes foi realizada com o intuito de determinar suas propriedades químicas e físicas. Conforme apresentado no capítulo 2, estas propriedades são de suma importância para o entendimento do comportamento posteriormente apresentado pelo concreto contendo CV.

3.2.2.1 Caracterização química

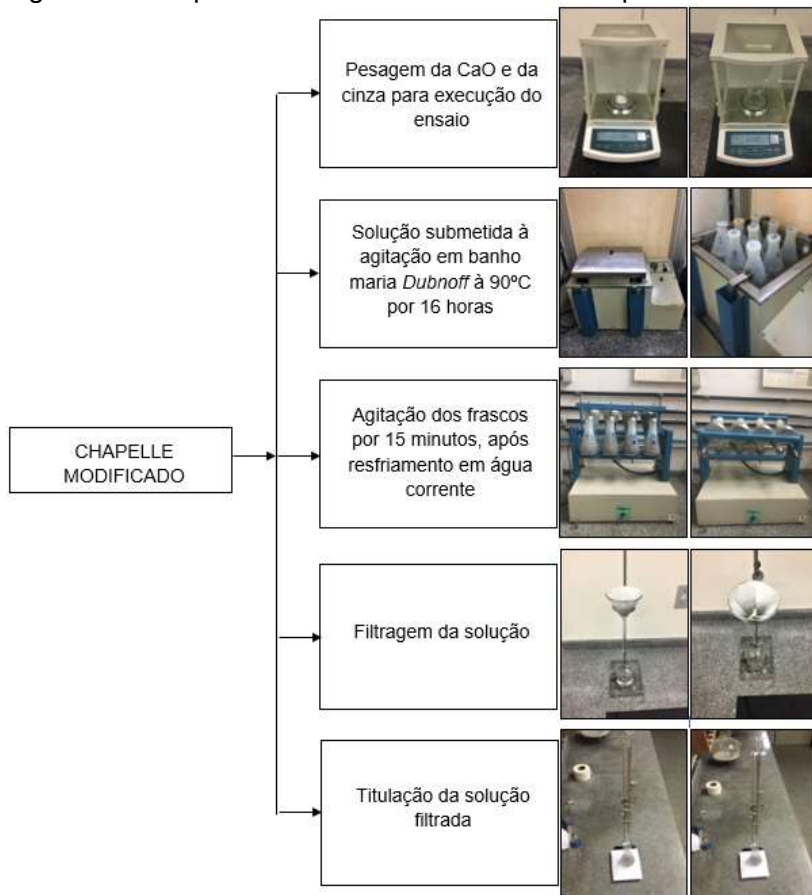
A caracterização química das cinzas volantes foi realizada através de espectroscopia por fluorescência de raio X. Através dela foi possível identificar óxidos de Silício IV (SiO_2), Alumínio (Al_2O_3), Ferro III (Fe_2O_3), Cálcio (CaO), Potássio (K_2O), Sódio (Na_2O), e Titânio (TiO_2), além da perda ao fogo. O equipamento utilizado foi o FRX *PANlytical axios max*.

3.2.2.2 Capacidade de fixar o Ca(OH)_2

Para determinação da capacidade do MCS em fixar o Ca(OH)_2 há, disponíveis e validados, diferentes métodos, cada um com suas particularidades. Desta forma, por se ter estudado as vantagens e desvantagens de cada método empregado, optou-se por utilizar o método de *Chapelle modificado*, a versão estabelecida pela NBR 15895 (ABNT, 2010). Esta técnica está apresentada no item 2.3.1.1.1.

A Figura 15 ilustra a realização dos ensaios pelo método de Chapelle modificado.

Figura 15 – Sequência ilustrativa do ensaio de chapelle modificado



Fonte: Autor (2018).

3.2.2.3 Caracterização física

Para caracterização física das cinzas volantes foram realizados os ensaios de finura na peneira 45 μm (NBR 15894-3 (ABNT, 2010), que é destinada para metacaulim. Por ser destinada a um MCS e não haver uma NBR específica para cinza volante, optou-se por utilizar este método.

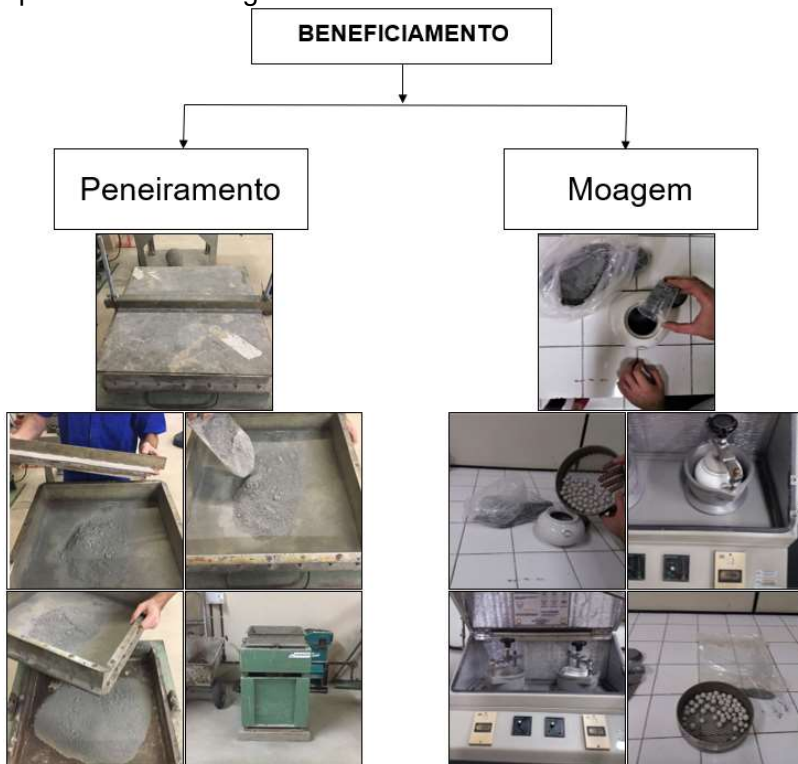
A superfície específica foi determinada pelo método da permeabilidade ao ar de Blaine – NBR 16372 (ABNT, 2015). A massa específica dos grãos de cinza volante foi determinada pelo método do frasco de le Chatelier – NBR 16605 (ABNT, 2017).

3.2.2.4 Beneficiamento das cinzas volantes

Com o intuito de obter melhores desempenhos para as cinzas volantes investigadas nesta pesquisa, considerou-se pertinente realizar a separação por peneiramento da fração retida na peneira 45 μm das cinzas brutas, conforme a Figura 16. Posteriormente, estas frações foram moídas em moinho de bolas, de acordo com esta mesma Figura 16. As moagens foram realizadas até a obtenção do valor de Blaine da cinza moída comercial, com tolerância de mais ou menos 20 cm^2/g . Optou-se por este valor por ser uma condição disponível no mercado. O objetivo desta pesquisa é de encontrar uma cinza proveniente no CTJL e, se houver a necessidade de beneficiamento, destiná-la para uma central de beneficiamento com condições de realizar este processo.

Esta separação por peneiramento pode ser realizada por meio de um separador de partículas acoplado aos moinhos utilizados no processo de beneficiamento de cinzas volantes em escala industrial.

Figura 16 – Organograma do processo de beneficiamento das cinzas volantes para obtenção das amostras R, P e M – apresentadas na Figura 14



Fonte: Autor (2018).

3.2.3 Etapa 2 - Estudo em argamassa

Após a coleta de todos os materiais necessários para o estudo em argamassa, eles foram acondicionados em ambiente com condições climáticas de laboratório. Após pesagem, os agregados, as CV e o cimento foram armazenados em sacos plásticos individuais vedados. As diferentes frações de areia, depois da pesagem individual, foram acondicionadas juntas, para cada traço. A água foi armazenada em garrafas plásticas anteriormente utilizadas para comercialização de água mineral. Optou-se pelo uso deste tipo e origem de garrafas para evitar

contaminação. O aditivo foi pesado momentos antes da mistura de cada traço, para evitar a separação dos sólidos da fase líquida. Foram pesados em frasco estéril comumente utilizado para análises clínicas.

O estudo em argamassa foi realizado em duas etapas. Na primeira foram realizados ensaios com areia padrão do IPT; na segunda etapa com uma composição de areias obtida pelo método de desempenho em argamassa proposto por Weidmann (2008). A mesma composição foi utilizada para a produção de concretos. O traço para estas duas etapas foi de 1:2,5:x (aglomerante:agregado:água), com teor de superplastificante de 0,3% em relação à massa de aglomerante. O valor de x foi determinado, no traço referência, para um *flow* 10 quedas, em torno de 200 a 230 milímetros.

O valor de 2,5 para o agregado refere-se à fração unitária média de agregado miúdo usual para concretos bombeáveis, com resistências de 25 a 40 MPa. Totalizaram 69 traços nesta primeira etapa.

A Tabela 11 apresenta os traços utilizados para as diferentes CV com os diferentes teores de substituição.

Tabela 11 – Traços unitários em volume absoluto das argamassas, tanto com areia padrão (4 frações) quanto com as combinações de areia de uma grossa de britagem e fina de cava

Teor de substituição	Cimento	Cinza Volante	Areia				a/ag	Aditivo
			Grossa	Média Grossa	Média Fina	Fina		
Referência	1,00	0,00	0,625	0,625	0,625	0,625	0,40	0,30%
10%	0,93	0,07	0,625	0,625	0,625	0,625	0,40	0,30%
20%	0,85	0,15	0,625	0,625	0,625	0,625	0,40	0,30%
30%	0,77	0,23	0,625	0,625	0,625	0,625	0,40	0,30%
35%	0,73	0,27	0,625	0,625	0,625	0,625	0,40	0,30%

Fonte: Autor (2018).

Na segunda etapa foram realizados os mesmos ensaios que na primeira etapa; porém, utilizando o mesmo agregado empregado para a produção do concreto. Foram utilizadas uma areia fina de cava 50% e uma areia grossa de britagem 50%. Esta proporção foi obtida conforme o proposto por Weidmann (2008) para uma combinação de areias que obtenha maior espalhamento

na mesa de *flow* em 10 quedas, assim como a resistência mais elevada. As CV avaliadas com este agregado foram apenas as UTL B e UTL C combinadas (UTL B e C), apresentadas na Figura 14. Esta segunda etapa foi realizada, pois, na primeira, foram constatados teores de ar muito elevados nas argamassas, o que despertou o interesse em identificar se este teor de ar foi promovido pelas CV ou pelo fato de se usar areia padrão. A areia padrão apresenta 4 faixas de grãos que não possui finos, que são os menores que 0,15 mm. Para as CV de granulometria mais grossas, como as *brutas*, pode ainda ter sido a causa do aumento na resistência, o que está discutido no capítulo 4. Por se tratar apenas da necessidade de sanar uma hipótese levantada durante o desenvolvimento da pesquisa, optou-se por não investigar todas as CV. Assim, outros 21 traços foram analisados, seguindo as proporções apresentadas na Tabela 11. Os resultados obtidos na segunda etapa foram os correlacionados com os resultados obtidos no estudo em concreto.

As areias que compuseram a etapa 2 foram empregadas contendo a umidade natural, da mesma forma que as centrais dosadoras de concreto procedem no seu dia a dia. Isto é favorável para o desempenho no estado fresco, pois os macroporos dos agregados já possuem certa quantidade de água, em geral, a necessária para seu total preenchimento. Assim, o agregado não reterá parte da água calculada durante o amassamento do concreto. Esta umidade presente no agregado foi corrigida do teor de água calculado para cada traço, bem como foi corrigida a quantidade de agregado.

No estado endurecido, os corpos de prova (50 x 100 mm) moldados foram submetidos a dois procedimentos de cura. O primeiro a 23 °C e o segundo a 38 °C, estabelecidos pela NBR 5752 versões 2014 e 1992, respectivamente. Isto foi realizado com o intuito de investigar possíveis correlações com as resistências obtidas no estudo em concreto. Considerou-se pertinente avaliar a cura em temperatura elevada, pois, segundo os estudos realizados por Salum (2016), nesta condição a cinza volante utilizada como MCS em concretos massa para grandes blocos de fundação desenvolve melhoras apreciáveis nas propriedades no estado endurecido. Como as CV são largamente utilizadas como prevenção de DEF nos blocos de grandes fundações em Balneário Camboriú, investigar o comportamento nesta condição foi considerado necessário.

Foram moldadas as combinações apresentadas na Figura 14. A etapa com areia padrão contempla toda a Figura 14; já a etapa com a combinação de areia de cava e de britagem contempla apenas a parte destacada com a linha tracejada naquela figura.

3.2.3.1 Sequência de mistura e dos ensaios em argamassa

Depois da adequação das condições de temperatura e pesagem dos materiais, foram realizadas as misturas para obtenção das argamassas. Em seguida, os ensaios no estado fresco e a moldagem dos corpos de prova foram realizados.

A mistura foi realizada em misturador planetário, também conhecido como argamassadeira. Suas características mecânicas são estabelecidas pela NBR 7215 (ABNT, 1997). A mistura dos materiais obedeceu a seguinte ordem e os referidos tempos de mistura:

- a) Misturou-se o aglomerante e a água, em velocidade baixa, durante 30 segundos;
- b) Em seguida acrescentou-se o agregado, misturando-o à pasta por mais 30 segundos, também em velocidade baixa;
- c) Por conseguinte, em velocidade alta, misturou-se a argamassa em um intervalo de 30 segundos;
- d) Durante 1 minuto e 30 segundos, a mistura foi mantida em repouso, e foi efetuada uma raspagem do fundo e das paredes da cuba da argamassadeira durante os primeiros 30 segundos;
- e) A argamassadeira foi acionada novamente, por mais 1 minuto, em velocidade alta.

Após misturadas, as argamassas eram transferidas para recipientes metálicos, semelhantes à cuba da argamassadeira, onde permaneciam durante a realização dos ensaios no estado fresco até a posterior moldagem dos corpos de prova.

Cada argamassa foi avaliada quanto às seguintes propriedades:

- Fluidez estática e dinâmica pela mesa de *flow*;

- Teor de ar e massa específica real;

A fluidez foi avaliada com base no proposto por Weidmann (2008). Foi sugerido um ajuste no número de golpes proposto pela NBR 13276 (ABNT, 2016), de 30 para 0 e 10 golpes. O autor propôs este método para avaliação de agregado miúdo para concreto.

Para esta pesquisa, algumas considerações foram feitas a fim de empregar este procedimento, na avaliação da influência das CV na trabalhabilidade das argamassas. Estas considerações foram possíveis devido à realização dos estudos preliminares. Estes estudos foram necessários, pois um dos objetivos desta pesquisa é estabelecer um método para avaliar a influência dos MCS nas propriedades no estado fresco e endurecido do concreto por meio de ensaios em argamassa.

O *flow 0* remete ao espalhamento estático da argamassa: no caso de um teor de ar elevado, esta fluirá com maior facilidade pela mesa. Já quando aplicados os 10 golpes ininterruptamente, as bolhas de ar internas da argamassa irão absorver os golpes, mascarando a lubrificação promovida pelo MCS. Logo, para uma avaliação da deformabilidade da argamassa sob certo esforço, condição dinâmica, o teor de ar interfere na avaliação da influência do MCS na fluidez. Por este motivo foi adicionada a determinação do *flow 5*, para retirar parte do ar contido na argamassa. Esta condição apresenta interferência apenas em teores maiores que 5% de ar. Avaliado com o *flow 5*, os resultados apresentaram melhor relação com o *flow 0* e com os ensaios em concreto.

Desta forma, a seguinte sequência foi efetuada:

O molde tronco cônico foi preenchido em 3 camadas, sendo a primeira adensada com 15 golpes aplicados com o soquete padrão para argamassa; a segunda camada, com 10 golpes; e a terceira com 5 golpes, conforme preconiza a NBR 13276 (ABNT, 2016). Na sequência, o molde foi içado verticalmente, com cuidado para não exercer esforço sobre a argamassa. Retirado o molde, registrou-se o espalhamento em dois pontos ortogonais (*flow 0*). Posteriormente, aplicaram-se os 5 golpes (*flow 5*), registrando o espalhamento promovido pela argamassa e, por fim, aplicaram-se mais 5 golpes que, somadas aos 5 anteriores, completaram os 10 golpes (*flow 10*), registrando, então, seu espalhamento. Estas alterações promoveram sensibilidade ao ensaio para avaliação da influência das CV, vista

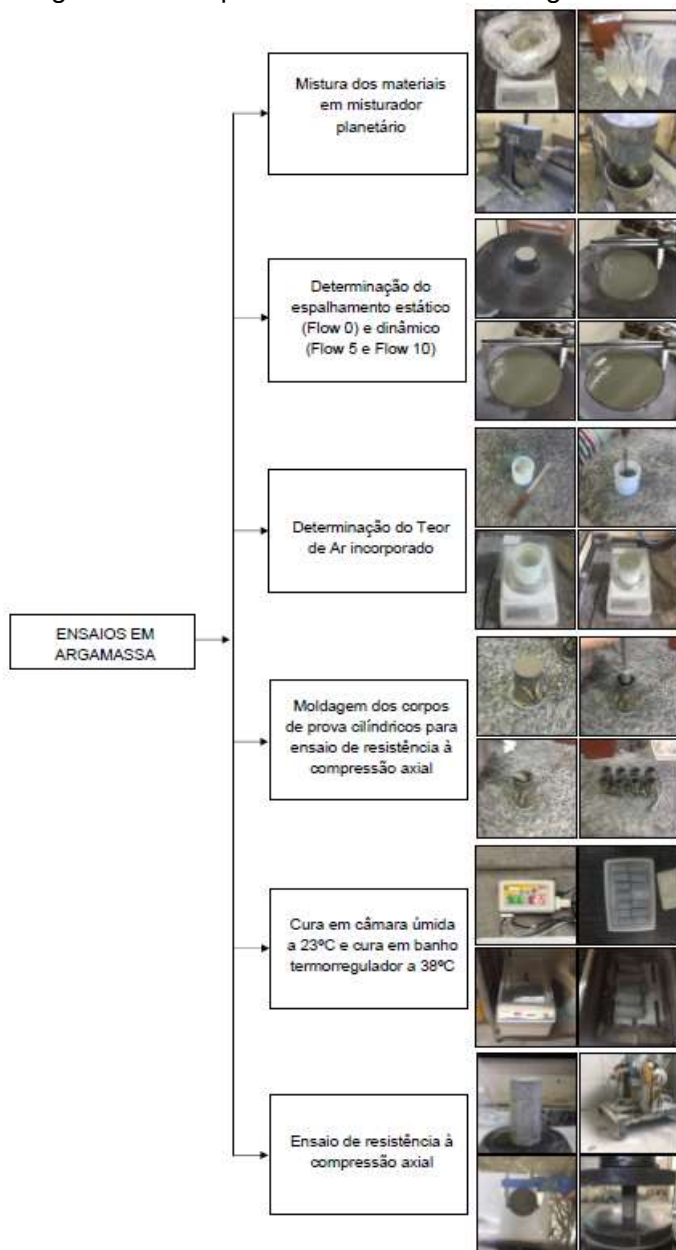
a grande fluidez das argamassas e, no caso das argamassas com areia padrão, seu elevado teor de ar.

Parte da argamassa restante do ensaio de fluidez foi submetida à determinação do teor de ar e massa específica real da argamassa. Este ensaio foi realizado segundo o estabelecido pela NBR 13278 (ABNT, 2005), usando um recipiente com volume de aproximadamente 400 cm³, constituído de material indeformável. Este molde era preenchido em três camadas de mesmo volume, adensadas com espátula metálica com 20 golpes cada.

Também foram avaliadas no estado fresco, qualitativamente – de forma visual, a coesão, a possível manifestação de exsudação e segregação das argamassas. A Figura 17 apresenta a síntese organizacional da realização dos ensaios em argamassa.

Os corpos de prova para os ensaios de compressão axial para as duas curas foram moldados de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1997) – em 4 camadas de igual altura aplicando, com o soquete padrão, com 30 golpes em cada uma das camadas.

Figura 17 – Sequência dos ensaios em argamassa



Fonte: Autor (2018).

3.2.4 Etapa 3 - Estudo em concreto

Com base nos resultados obtidos em argamassa, foi possível determinar as CV a serem investigadas em concreto. Logo, foram selecionadas aquelas com maior potencial para aplicação, sem influenciar negativamente nas propriedades de interesse do concreto.

Foram selecionadas as CV *brutas* provenientes das UTL B e UTL C misturadas; e a mesma CV, na condição de moagem, proveniente da central de beneficiamento anteriormente mencionada. Estas CV foram empregadas nos mesmos teores utilizados no estudo em argamassa – 10%, 20%, 30% e 35%, com substituição em volume absoluto ao cimento.

Cada família de concreto foi composta de 4 traços contendo relações água aglomerante distintas, relações unitárias de materiais secos (m) e teores de consumo de aglomerante, possibilitando, desta forma, a obtenção de curvas de dosagem com 4 pontos.

O estudo em concreto iniciou pela determinação do teor de argamassa ideal para cada traço, pois o teor de CV substituinte ao cimento Portland alteraria a forma de parte das partículas de aglomerante. Assim, poderia resultar na redução do teor de argamassa. Portanto, foram avaliados o teor de argamassa ideal para os 36 traços de concreto estudados nesta pesquisa.

3.2.4.1 Determinação do teor de argamassa ideal

A determinação do teor de argamassa ideal foi realizada com base no estabelecido por Helene e Terzian (1992), com algumas modificações. A principal foi proposta por Weidmann (2008), onde o autor adicionou o ensaio para avaliação da bombeabilidade do concreto. Este foi realizado com um cone de Abrams invertido, provido de uma tampa na sua menor abertura, a que fica para baixo. O autor propõe que o concreto deve ser adensado conforme realizado para avaliação do abatimento pelo tronco de cone original – proposto por Abrams. Entretanto, nos estudos realizados, não se obteve escoamento com concreto com este adensamento. Assim, foi realizada uma modificação no adensamento onde, também em 3 camadas, aplicaram-se 10

golpes com haste de adensamento na lateral de cone para cada camada. Isto possibilitou uma avaliação do teor de argamassa, que proporcionasse maior escoamento do concreto com menor quantidade de argamassa.

Logo após a mistura do concreto, apresentada no item 3.2.4.2, antes de realizar o ensaio de bombeabilidade, foi realizada uma avaliação qualitativa das condições do concreto, semelhantes às propostas por Helene e Terzian (1992).

Com o auxílio da colher de pedreiro, avalia-se a quantidade de vazios superficiais no concreto ainda dentro da betoneira, após a passagem das costas da colher em sua superfície. A manifestação de vazios indica a falta argamassa.

Na sequência, realiza-se a identificação qualitativa do concreto por meio do levantamento de uma parte do concreto com o auxílio da colher. Esta fração de concreto pode ser avaliada quanto à compacidade e sua homogeneidade. Posteriormente, o concreto deve ser deixado cair, pelo seu próprio peso, dentro da betoneira. O desprendimento de agregado graúdo indica falta de argamassa.

Em seguida, identifica-se o teor de argamassa aprovado nas avaliações anteriores, é moldado o cone de slump conforme estabelecido pela NBR NM 67 (ABNT, 1998). Retirado o cone, realiza-se a passagem das costas da colher, de cima para baixo, em torno do cone de concreto moldado, possibilitando a identificação de teor excessivo de argamassa, que a avaliação anterior não possui sensibilidade para identificar. Com o intuito de identificar a coesão do concreto, devem ser aplicados golpes com a ponta da haste de adensamento na placa de base do ensaio de slump. Helene e Terzian (1992) estabelecem que se deve golpear a lateral do cone de concreto. Entretanto, considerou-se mais promissor avaliar com os golpes na placa base. Caso o teor de argamassa esteja abaixo do necessário, o agregado graúdo se desprenderá. Caso este teor esteja adequado, o cone de concreto se deformará, podendo até espalhar-se parcialmente na chapa de ensaio, sem desagregar. Assim, este teor de argamassa é considerado, nesta pesquisa, adequado para confirmação no ensaio de bombeabilidade.

Determinados os teores de argamassa, novas bateladas de concreto foram feitas, em todos os traços, agora com o teor necessário de argamassa. Foi realizada a determinação da perda de abatimento por transporte, simulando 15 minutos na betoneira,

referentes a 1 hora e 30 minutos no caminhão betoneira. Esta relação foi obtida em estudo realizado preliminarmente nesta pesquisa.

3.2.4.2 Sequência de mistura e dos ensaios em concreto

Realizada a pesagem dos constituintes, era feita sua mistura em uma betoneira de eixo inclinado, com 120 litros de capacidade. O amassamento do concreto foi realizado da seguinte forma:

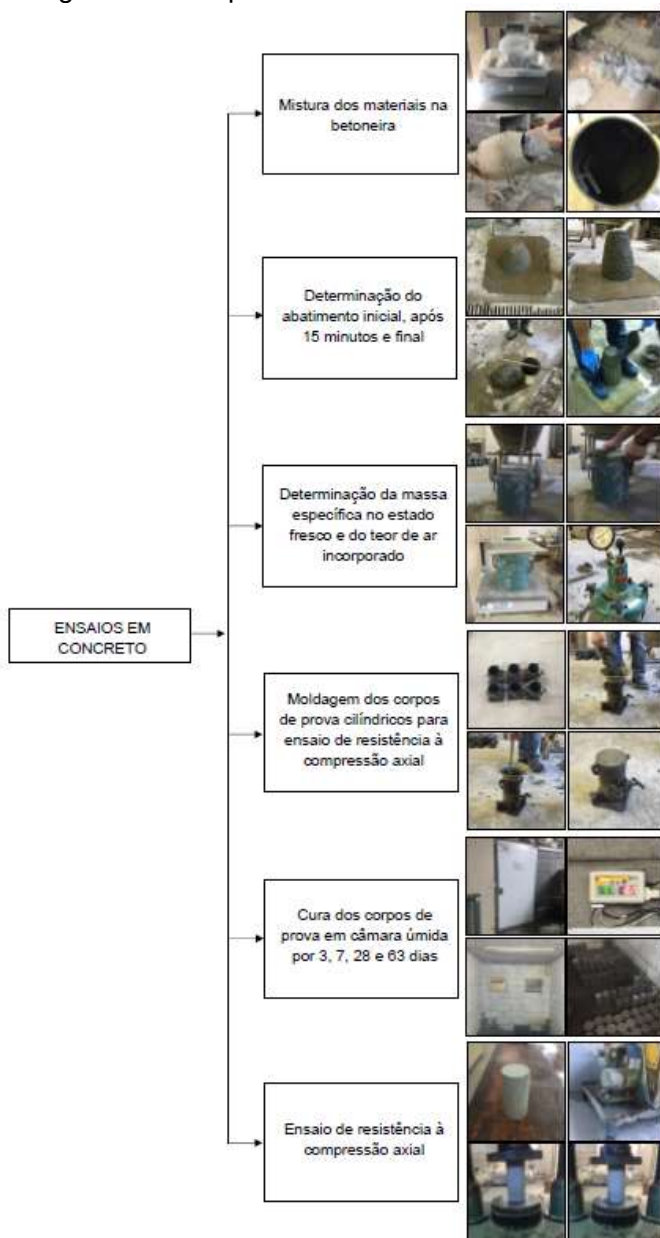
- a) A betoneira era umedecida por dentro, de forma que toda sua parede adsorvesse água, com o intuito de que a água do concreto não fosse retirada pelas paredes secas. A betoneira ficava ligada por 20 segundos, com a boca para baixo, para que o excesso de água escorresse;
- b) Feito o umedecimento, colocavam-se todos os materiais secos, somente com a umidade natural, dentro da betoneira, e realizava-se sua mistura por 1 minuto;
- c) Na sequência, com a betoneira em movimento, colocava-se parte da água, em torno de 50%, misturando por mais 1,5 minutos;
- d) Posteriormente, acrescentava-se o aditivo com mais uma parte de água, misturando por mais 1,5 minutos;
- e) Adicionava-se água para o abatimento inicial desejado, e misturava-se o concreto por mais 3 minutos, totalizando 7 minutos;
- f) Em seguida, aferia-se o abatimento pelo tronco de concreto, denominado slump inicial, que correspondia a um abatimento de 80 ± 20 mm – sendo um concreto da classe S50 da NBR 8953 (ABNT, 2015). Caso o abatimento desejado não fosse obtido, realizava-se sua correção com adição de água. A quantidade era determinada pela equação 11:

$$\text{água}_{(cm^3)} = \frac{\text{Slump desejado}_{(cm)} - \text{Slump obtido}_{(cm)}}{\text{volume de concreto}_{(dm^3)}} * 2 \quad (11)$$

- g) Ajustado o slump inicial, realizava-se a simulação do transporte do concreto. Assim, o concreto era mantido em movimento na betoneira, que permanecia com uma inclinação quanto à horizontal, maior que a de mistura. Isto porque, quando o caminhão betoneira está em movimento até o local de aplicação do concreto, ele é mantido em rotação baixa. Este procedimento era realizado por 15 minutos;
- h) Após este período, era determinado o abatimento do concreto, registrando a perda de abatimento. Em seguida, realizava-se a correção para um abatimento de 140 ± 20 mm – sendo um concreto da classe S100 da NBR 8953 (ABNT, 2015);
- i) Na sequência era determinado o teor de ar aprisionado e massa específica real do concreto pelo método pressométrico, estabelecido pela NBR NM 47 (ABNT, 2002);
- j) Com o concreto restante, foram moldados 18 corpos de prova, segundo o estabelecido pela NBR 5738 (ABNT, 2015). Eles foram rompidos à compressão axial três para cada idade de interesse, aos 3, 7, 28, 63, 91, 180 dias, totalizando 648 corpos de prova para os estudos em concreto. Até as datas de ensaio, os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida nas condições de 23 ± 2 °C de temperatura, e com umidade relativa maior que 95%, segundo o que estabelece a NBR 5738 (ABNT, 2015). Os ensaios de compressão axial foram realizados segundo a NBR 5739 (ABNT, 2007). Para preparação do topo destes corpos de prova, fez-se uso de uma retífica para concreto de marca Sthulert, modelo manual. A máquina de ensaio utilizada foi uma prensa EMIC PCE 150.

A Figura 18 ilustra a sequência acima apresentada.

Figura 18 – Sequência dos ensaios em concreto



Fonte: Autor (2018).

Quanto à relação água/aglomerante (a/ag), Helene e Terzian (1992) propõem que ela deve ser mantida constante para aquele traço, mesmo com o ajuste no teor de argamassa. Porém, neste trabalho, as relações a/ag foram variáveis em função das adições de água necessárias para obtenção do abatimento estabelecido – 140 ± 20 mm, além da simulação do transporte realizado. Esta diferença no teor de água vai ao encontro dos objetivos específicos desta pesquisa, que remetem à determinação da influência da CV na demanda de água do concreto. Os traços utilizados estão apresentados no Apêndice A por meio da Tabela A 1.

3.2.4.3 Diagrama de dosagem

O método mais difundido para dosagem de concreto convencional² é o método IPT EPUSP, proposto por Helene e Terzian (1992), e tem sido aperfeiçoado de acordo com o avanço da tecnologia de concreto, conforme publicações em diversas pesquisas no Brasil. Neste método, os resultados são apresentados na forma de um diagrama de dosagem construído em 3 quadrantes³, composto pelas leis fundamentais da tecnologia de concreto:

Lei de Abrams: Em 1918, analisando diversos resultados de diferentes traços de concreto, *Duff Abrams* observou que o comportamento da resistência à compressão do concreto apresentava uma relação inversamente proporcional à razão entre as quantidades de água e de cimento utilizadas. Esta relação é representada pela equação 12, sendo uma curva exponencial.

$$f_{cm} = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} \quad (12)$$

² Nesta dissertação, entende-se como concreto convencional aqueles classificados como normais, classe I, pela NBR 8953 (ABNT, 2015).

³ A definição da posição dos quadrantes utilizada nesta dissertação não segue a convenção matemática, desta forma, o primeiro quadrante está no eixo positivo do plano cartesiano, e segue para os demais no sentido horário. Está é a convenção utilizada na tecnologia de concreto.

Em 1966, o pesquisador *Treval Powers* identificou que a Lei de Abrams era explicada pela aproximação das partículas de cimento, com a redução da relação água/cimento. Isto possibilita que os cristais de C-S-H de grãos diferentes cresçam mais próximos, apresentando, assim, um volume menor de vazios na matriz de cimento. Powers utilizou o modelo matemático de Mohr-Columb, conhecido e de uso difundido na engenharia para descrever o comportamento sob tensões de materiais frágeis.

Lei de Lyse: Em 1932, o pesquisador Norueguês *Inge Lyse* determinou que, para um mesmo conjunto de materiais de mesma distribuição granulométrica e textura superficial, a trabalhabilidade seria governada pelo volume de água por volume de concreto. Logo, independentemente da proporção entre o cimento e os agregados, não havendo variação do volume de água não ocorreriam modificações na trabalhabilidade do concreto. O comportamento estudado por Lyse foi por ele explicado como uma reta, conforme observado na equação 13.

$$m = k_3 + k_4 * a/c \quad (13)$$

Lei de Priszkulnik e Kirilos (Molinari): Em 1974, em trabalhos desenvolvidos no Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), foi percebido que o consumo de cimento e a quantidade unitária de materiais secos possuem uma correlação. Os pesquisadores Priszkulnik e Kirilos determinaram que este comportamento era explicado pela equação 14.

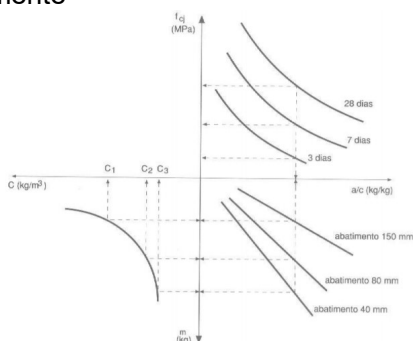
$$C = \frac{1000}{k_5 + k_6 * m} \quad (14)$$

Helene e Terzian (1992) chamaram esta relação de *lei de Molinari*, em homenagem ao pesquisador tecnologista de concreto

Gilberto Molinari⁴. Entretanto, nos livros posteriormente editados pelo IBRACON, esta relação traz o nome dos dois pesquisadores, na época, do IPT. Desta forma, foi considerado adequado mencionar as duas formas conhecidas.

Assim, com a junção das três leis fundamentais da tecnologia de concreto que explicam seu comportamento, é possível construir o diagrama de dosagem proposto por Helene e Terzian (1992). Este diagrama é apresentado na Figura 19.

Figura 19 – Diagrama de dosagem – modelo de comportamento proposto inicialmente



Fonte: Helene e Terzian (1992, p. 233).

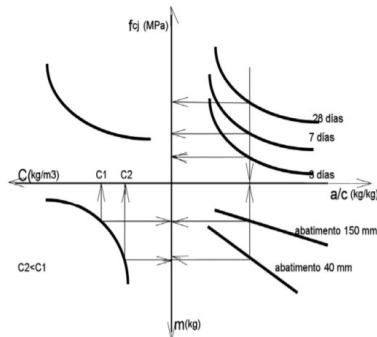
Uma proposta de melhoria na resposta final dos resultados obtidos com a aplicação do método IPT EPUSP foi considerar uma correlação no quarto quadrante, anteriormente deixado em branco no diagrama. Neste quadrante deve-se correlacionar o consumo de cimento com a resistência média obtida. De acordo com Tutikian e Helene (2011), este conceito começou a ser introduzido por meio de uma disciplina da Pós-graduação em Construção Civil e Urbana da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, ministrada pelos professores Paulo Helene e Carlos Tango, na década de 70. Esta consideração foi feita, posteriormente, em certas pesquisas, como nos estudos de Baggio (2000) e Assunção (2002), sendo posteriormente cristalizado na forma de livro, no

⁴ Gilberto Molinari foi um dos fundadores do Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON) e respeitado tecnologista de concreto.

capítulo de *Dosagem de concreto de cimento Portland* do *Concreto: Ciência e Tecnologia – 2011*, de autoria de Tutikian e Helene.

A Figura 20 ilustra o diagrama de dosagem apresentado para o método IBRACON.

Figura 20 – Diagrama de dosagem dos concretos de cimento Portland

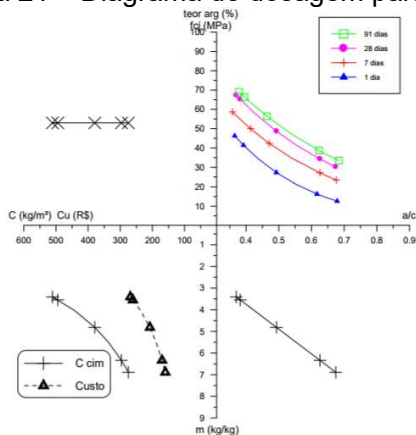


Fonte: Tutikian e Helene (2011, p. 436).

O comportamento matemático apresentado para o quarto quadrante é explicado por uma função exponencial, facilmente determinada pelo método dos mínimos quadrados ou com a resolução de um sistema de equações. Nesta ocasião, o método IPT EPUSP passou a ser chamado de Método IBRACON. Outras considerações também foram feitas, porém, não é pertinente listá-las.

Tutikian (2007) propôs a construção do diagrama de dosagem de concreto, com a configuração apresentada na Figura 21.

Figura 21 – Diagrama de dosagem para CCV



Fonte: Tutikian (2007, p. 112).

Como se pode observar, Tutikian (2007) propôs o uso do quarto quadrante, deixado em *branco* por Helene e Terzian (1992), para apresentar o teor de argamassa seca (α). Este teor para o concreto convencional (CCV), apresentado na pesquisa mencionada, é um valor constante, independente das demais variáveis exploradas no método proposto inicialmente em 1992. A fixação do teor de argamassa é uma das propostas do método IPT EPUSP apresentado por Helene e Terzian (1992). Tutikian (2007) introduziu, ainda, no terceiro quadrante, além da lei de Molinari, o comportamento do custo do concreto correlacionado com o m. Esta informação é primordial para melhor avaliação da relação custo benefício.

Com base nos aperfeiçoamentos apresentados, e em considerações próprias, decidiu-se explorar ao máximo os quadrantes para a construção de um diagrama de dosagem, com o máximo de informações possível. O propósito é viabilizar a melhor avaliação das possibilidades de concretos a serem obtidos para certo conjunto de materiais.

Desta forma, nesta pesquisa foi utilizada a seguinte configuração para o diagrama de dosagem:

Primeiro quadrante: lei de Abrams, com idades de 3, 7, 28, 63, 91 e 180 dias. Como foram explorados concretos com

diferentes cinzas volantes em variados teores, considerou-se pertinente avaliar sua curva de resistência para idades avançadas. Também é pertinente mencionar que parte da justificativa desta pesquisa se alicerça na crescente demanda por concretos para blocos de fundação de elevado volume. Até que toda a carga de projeto do edifício esteja totalmente aplicada, a resistência deste concreto continua crescendo. Como comentado no segundo capítulo, item 2.5.2, a contribuição da cinza volante para evolução da resistência do concreto ocorre em idades superiores aos 28 dias. Para construção das curvas de Abrams foram utilizadas as relações água/aglomerante em massa, explicadas por um comportamento exponencial.

No segundo quadrante, é apresentada a curva da lei de Lyse. Porém, em 1932, quando Lyse estudou a tecnologia de concreto, não eram utilizados aditivos químicos. Com a evolução dos componentes do concreto, os aditivos passaram a apresentar extrema eficiência em reduzir a demanda de água. Como observado nos estudos experimentais realizados, com o uso de aditivos à base de policarboxilatos, a lei de Lyse passa a apresentar uma leve inclinação, deixando de ser explicada por uma reta. Desta forma, nesta pesquisa, as curvas de Lyse têm comportamento representado por uma função logarítmica. Considerou-se necessário indicar no diagrama o teor de argamassa, devido a sua redução à medida que a relação agregados/aglomerantes diminui. Na proposta inicial para o diagrama de dosagem, em 1992, o teor de argamassa era fixo para toda a família de concreto. Porém, nos estudos realizados, determinou-se o teor de argamassa para todos os 4 traços de cada família de concreto. Podendo ser observado que o teor de argamassa ideal é variável, seguindo a tendência já indicada. O teor de argamassa foi acrescido em um eixo horizontal secundário neste quadrante, ficando o eixo principal ocupado pela relação água/aglomerante. Para sua apresentação no diagrama a relação agregados/aglomerantes (m) está como variável dependente e o teor de argamassa (α) como variável independente. Houve a

necessidade desta configuração apenas para que fosse possível colocá-lo no diagrama no segundo quadrante. Na determinação da regressão o m deve ser a variável independente e o α como variável dependente. As equações apresentadas utilizaram esta configuração. Tutikian (2007) havia proposto o teor de argamassa como variável dependente do consumo de cimento. Contudo, considerou-se mais adequado que o teor de argamassa estivesse junto da relação agregados/aglomerante, sendo, desta forma, mais adequado para o uso do diagrama. Uma vez que seu uso inicia com a entrada da resistência, determinado a relação água/aglomerante, seguindo para a determinação do traço unitário, onde já é interessante conhecer o teor de argamassa para o seu desdobramento, entre os agregados graúdo (s) e miúdo (s), seguindo então, para os dois quadrantes restantes.

O terceiro quadrante é utilizado pela lei de Molinari. Na proposta inicial, a quantidade de cimento utilizada para construção desta curva era referente a seu consumo real de cimento. Como foram produzidos concretos com aglomerantes compostos, foi utilizado o Consumo de cimento Equivalente (C_e). Além da lei tradicional, considerou-se de suma importância apresentar a curva de custo de cada família de concreto, seguindo a proposta de Tutikian (2007).

Por fim, o quarto quadrante é composto pela relação do rendimento de resistência pelo consumo de aglomerante. O consumo de cimento utilizado foi o equivalente (C_e), como já mencionado. Estes concretos foram produzidos com a substituição parcial e gradativa do cimento Portland por cinza volante, em volume absoluto. Como a cinza volante possui massa específica menor que o cimento CP V, o peso de aglomerante é reduzido na medida em que o teor de substituição aumenta.

A Tabela 12 apresenta as equações utilizadas para construção de cada quadrante e sua linearização. Os diagramas de dosagem construídos são apresentados no capítulo 4 item 4.3.1.

Tabela 12 – Equações de comportamento do concreto utilizadas para construção dos diagramas de dosagem

Quadrante	Propriedade	Equação de comportamento	Equação linearizada	
I	Lei de Abrams	3 dias	$f_{cm} = \frac{k_1}{k_2^{a/ag}}$	$\log_{10} f_{cm} = \log_{10} k_1 - \log_{10} k_2 * a/ag$
		7 dias		
		28 dias		
		63 dias		
		91 dias		
		180 dias		
II	Lei de Lyse	$m = k_3 + k_4 * \ln a/c$	$m = k_3 + k_4 * a/c'$	
II	Teor de argamassa (α)	$\alpha = k_{11} + k_{12} * Ce$	Esta equação é linear	
III	Lei de Priskulnik e Kirilos (Molinari)	$Ce = \frac{1000}{k_5 + k_6 * m}$	$\frac{1}{Ce} = \frac{k_5}{1000} + \frac{k_6}{1000} * m$	
III	Custo	$f_{cm} = \frac{k_7}{k_8^{Ce}}$	$\log_{10} f_{cm} = \log_{10} k_7 - \log_{10} k_8 * Ce$	
IV	Rendimento de resistência por kg de cimento (MPa x kg Ce)	3 dias	$f_{cm} = -k_9 + k_{10} * \ln Ce$	$f_{cm} = -k_9 + k_{10} * Ce'$
		7 dias		
		28 dias		
		63 dias		
		91 dias		
		180 dias		

Fonte: Autor (2018).

3.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O tratamento estatístico foi realizado com base nos resultados obtidos no programa experimental desenvolvido em laboratório, que envolve desde a caracterização dos materiais constituintes até os estudos desenvolvidos em argamassas e concreto. Esta avaliação estatística buscou determinar a significância da influência de cada variável investigada, apresentadas no item 3.2.1. Para isto, os seguintes testes estatísticos foram utilizados, todos com 95% de confiança:

- Regressão linear com teste t de *Student* para verificar a significância da correlação, além da determinação dos intervalos de confiança médios e individuais;
- Projetos de experimento fatorial para análise de variância (ANOVA), o que possibilita a verificação da influência de cada uma das variáveis investigadas nas propriedades de interesse. Foram investigadas influências com efeitos de primeira ordem, para as propriedades onde não houveram repetições; e de primeira, segunda e terceira ordem para as propriedades com repetições.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos por meio do programa experimental. Estes estão organizados em propriedades das CV, estudos em argamassa e estudo em concreto.

4.1 PROPRIEDADES DAS CINZAS VOLANTES

Foram avaliadas propriedades químicas e físicas das CV com o intuito de determinar sua influência na capacidade de fixação do CaO, além da sua influência na demanda de água nos estudos em argamassa e em concreto.

4.1.1 Caracterização química

As propriedades químicas determinadas foram Silício IV (SiO_2), Alumínio (Al_2O_3), Ferro III (Fe_2O_3), Trióxido de Enxofre (SO_3), Sódio (Na_2O), Potássio (K_2O), Cálcio (CaO), Titânio (TiO_2), Dióxido de Zircônio (ZrO_2), além da Perda ao Fogo (PF).

Os compostos considerados relevantes para as reações pozolânicas são SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , sendo os responsáveis pela fixação do CaO, como mostrado no item 2.2.1. Porém, outros fatores de relevância considerável para a fixação do CaO são a finura apresentada pelos grãos e seu grau de amorfismo, conforme discutido em 4.1.4.

A Tabela 13 ilustra os resultados obtidos para os diferentes compostos comentados para as CV investigadas nesta pesquisa. Também são mostrados os padrões para certos compostos estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 2015).

Tabela 13 – Caracterização química das CV

UTL	Condição	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	SO ₃	PF	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	TiO ₂	ZrO ₂	Outros*
A	N	52,23	30,00	6,32	88,55	0,49	7,30	0,08	1,75	1,01	0,65	0,12	0,045
	P	54,82	30,37	5,98	91,17	0,24	4,45	0,13	1,55	1,13	0,89	0,09	0,350
	R	52,86	29,24	5,48	87,58	0,48	7,97	0,13	2,11	1,31	0,34	0,05	0,028
	M	52,96	30,00	5,67	88,63	0,36	5,24	0,93	3,16	1,42	0,21	0,04	0,007
B	N	54,96	30,59	6,02	91,57	0,66	2,88	0,95	2,38	1,21	0,26	0,03	0,060
	P	56,19	29,70	7,64	93,53	0,31	2,21	0,08	2,01	1,49	0,32	0,04	0,010
	R	54,96	29,29	6,72	90,97	0,29	3,25	0,14	3,56	1,40	0,15	0,10	0,138
	M	56,37	33,49	6,09	95,95	0,42	1,71	0,07	0,88	0,78	0,10	0,09	0,002
C	N	60,59	28,22	6,65	95,46	0,52	0,96	0,07	1,33	1,19	0,33	0,05	0,089
	P	66,26	29,69	0,03	95,98	0,64	0,83	0,01	0,88	1,32	0,29	0,04	0,015
	R	56,72	30,02	8,39	95,13	0,29	1,65	0,13	1,50	1,17	0,02	0,08	0,013
	M	56,96	32,99	5,27	95,22	0,36	1,43	0,08	1,55	1,06	0,21	0,08	0,003
B e C	N	58,20	30,01	6,71	94,92	0,39	1,31	0,07	1,87	1,23	0,12	0,04	0,049
	P	58,60	29,60	7,00	95,20	0,24	1,12	0,07	1,99	1,02	0,24	0,09	0,031
	R	55,58	32,61	6,55	94,74	0,26	2,25	0,08	1,20	1,15	0,16	0,11	0,053
	M	57,75	31,10	7,01	95,86	0,35	1,38	0,08	1,54	0,59	0,12	0,07	0,007
	Mc	55,58	32,20	6,96	94,74	0,29	2,25	0,09	1,58	0,87	0,03	0,13	0,019
NBR 12653		-	-	-	≥ 70	≤ 5	≤ 6	≤ 1,5	-	-	-	-	-

*ZnO, MnO, Cr₂O₃, SrO, CuO, Rb₂O, Y₂O₃, PbO, Ga₂O₃, GeO₂, NiO e NbO

Fonte: Autor (2018).

Pode-se perceber que os resultados da caracterização química têm influência considerável da origem da cinza volante. Considerando as propriedades de maior interesse para a atividade pozolânica, nota-se que as CV provenientes da UTL A resultaram em teores abaixo de 89% de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 somados. Esta UTL apresentou menor teor de SiO_2 , ficando entre 48,23 e 52,82%. Isto pode comprometer consideravelmente sua atividade pozolânica, uma vez que a fixação do Al_2O_3 e do Fe_2O_3 necessita de certas quantidades de SiO_2 , como mostrado nas equações 7 e 8, respectivamente, no item 2.2.1.1. Sua perda ao fogo também se apresentou elevada, chegando a valores maiores que 6% para a amostra natural e retida na peneira de 45 μm . Este valor é estabelecido como máximo tolerado pela NBR 12653 (ABNT, 2015). Huang *et al.* (2013) mostram em seus resultados que CV com teores elevados de perda ao fogo aumentam a demanda de água, além de interferir negativamente na evolução da resistência do concreto. As outras amostras mostraram teores de SiO_2 acima 55%, chegando a 66%. Os teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 das demais amostras, com exceção da amostra UTL B natural (88,57%), ficaram acima de 90%. Todas as amostras investigadas apresentaram valores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 acima do mínimo estabelecido pela NBR 12653 (ABNT, 2015) para materiais pozolânicos, mesmo as originárias da UTL A. Todos as CV apresentaram características dentro dos intervalos apresentados na Tabela 2, mostrando que as cinzas obtidas no CTJL apresentam características químicas semelhantes às demais CV disponíveis no mundo. Isto comprova que este complexo é um parque experimental, devido às suas diferentes tecnologias de queima, conforme exposto anteriormente. Os resultados obtidos na caracterização química comprovam que a tecnologia de queima apresenta influência relevante na composição química da CV obtida.

4.1.2 Capacidade de fixar o Ca(OH)_2

Como indicado no item 2.3 do capítulo 2 desta dissertação, a capacidade de fixação do CaO é a forma mais direta de medir, além de ser o principal indicador da atividade pozolânica de um MCS. O método de Chapelle modificado, estabelecido no Brasil pela NBR 15895 (ABNT, 2010), apresenta resultados confiáveis para avaliação de cinza volante.

A Tabela 14 apresenta os resultados obtidos para as diferentes cinzas volantes investigadas nesta pesquisa.

Tabela 14 – Capacidade de fixação do Ca(OH)_2 das CV determinada pelo método de Chapelle modificado

UTL	Condição	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média	Cv%
A	N	246,32	250,72	256,52	251,19	2,04%
	P	389,75	364,96	390,72	381,81	3,82%
	R	74,80	82,03	77,76	78,20	4,65%
	M	332,06	354,43	327,76	338,08	4,24%
B	N	432,42	447,12	454,28	444,61	2,51%
	P	483,01	457,89	461,17	467,36	2,92%
	R	375,67	385,76	370,80	377,41	2,02%
	M	549,94	584,85	576,87	570,55	3,21%
C	N	449,46	455,65	452,22	452,44	0,69%
	P	557,43	563,80	545,13	555,45	1,71%
	R	332,83	334,19	325,47	330,83	1,42%
	M	536,14	537,51	549,98	541,21	1,41%
B e C	N	450,68	451,58	454,55	452,27	0,45%
	P	560,69	535,57	576,13	557,46	3,67%
	R	340,18	349,86	345,27	345,10	1,40%
	M	615,36	625,27	621,79	620,81	0,81%
	Mc	603,29	625,02	620,43	616,25	1,86%

Fonte: Autor (2018).

Analisando as cinzas volantes nomeadas nesta pesquisa como naturais, é possível inferir que aquela proveniente da UTL C apresentou maior capacidade de fixação de Ca(OH)_2 que as demais. Isto pode ser relacionado à tecnologia de queima da UTL C. A razão é que esta é a usina instalada por último no CTJL,

sendo a mais moderna. E o carvão utilizado na obtenção destas CV foi de mesma origem e lote, não sendo uma variável. Ainda quanto às amostras naturais, a CV originária da UTL B apresentou valores muito próximos do apresentado pela UTL C. Como comentado no item 2.4.1, as tecnologias destas duas usinas são muito semelhantes. Então, com exceção da CV natural proveniente da UTL A, as CV naturais apresentaram capacidade de fixação do Ca(OH)_2 acima do valor estabelecido por Raverdy *et al.* (1980) de 435,6 $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ de pozolana, que é utilizado como parâmetro para determinar, por meio do ensaio de Chapelle modificado, a pozolanicidade dos MCS.

As amostras com todos os grãos menores que 45 μm (325 *mesh*) e as com todos os grãos maiores que 45 μm , porém, moídas até a mesma área específica das passantes, apresentaram os resultados mais elevados. Logo, pode-se destacar que a finura dos grãos do MCS e sua composição química têm influência considerável na atividade pozolânica.

Todavia, as CV com maior capacidade de fixação do Ca(OH)_2 foram as passante (P), moída (M) e moída comercial (Mc) obtidas pela combinação das cinzas provenientes da UTL B e C.

Com o intuito de validar estatisticamente as inferências sobre a capacidade de fixação do Ca(OH)_2 , a Tabela 15 mostra a influência da condição (característica das partículas), e a usina termelétrica (UTL).

Tabela 15 – ANOVA – influência da condição e da Usina Termelétrica (UTL) de origem na capacidade de fixação do Ca(OH)_2 determinado pelo método de Chapelle modificado

Parâmetro	Fonte	SQ	GL	MQ	F	Probabilidade
Chapelle	Condição	404105,18	3	134701,73	1188,74	100,00%
	UTL	417802,97	3	139267,66	1229,03	100,00%
	Condição vs UTL	43933,12	9	4881,46	43,08	100,00%
	Erro					

SQ: soma dos quadrados; GL: graus de liberdade; MQ: médias quadradas; F: distribuição de Fisher.

Fonte: Autor (2018).

A análise de variância foi realizada com o intuito de investigar se há efeitos individuais e interativos das variáveis sobre a capacidade de fixação do Ca(OH)_2 . Como a probabilidade

apresenta valores acima de 95%, tanto a condição das partículas quanto a UTL de origem das CV e a interação entre elas apresentam influência significativa na capacidade de fixação do Ca(OH)_2 , com confiabilidade de 95%.

No item 4.1.4 serão compilados os resultados obtidos nos ensaios de Chapelle Modificado relacionados às propriedades químicas e físicas investigadas.

4.1.3 Caracterização física

Consideradas de relevância para esta pesquisa, foram determinadas a massa específica das amostras de CV, a área específica e a porcentagem retida na peneira 45 μm . A primeira característica é necessária para determinação dos traços, tanto no estudo de argamassa, quanto de concreto. As outras duas têm grande influência na capacidade de fixação do Ca(OH)_2 e na demanda de água de concreto, conforme mostrado no capítulo 0. Desta forma, a Tabela 16 apresenta os resultados obtidos para as CV.

Tabela 16 – Caracterização física e tempos de moagem das CV

UTL	Condição	Massa Específica (g/cm ²)	Área específica (Blaine) (cm ² /g)	Retido #325 (%)	Tempo de moagem (min)
A	N	1,82	1666	39,3	0
	P	2,07	2360	0,0	0
	R	1,75	608	100,0	0
	M	1,89	2377	4,5	3,10
B	N	2,10	2441	30,1	0
	P	2,12	3155	0,0	0
	R	2,08	2221	100,0	0
	M	2,16	3171	2,3	4,99
C	N	2,46	2455	27,2	0
	P	2,49	2924	0,0	0
	R	2,20	1890	100,0	0
	M	2,22	2961	2,1	9,30
B e C	N	2,36	2555	28,6	0
	P	2,44	3435	0,0	0
	R	2,12	2180	100,0	0
	M	2,22	3451	3,9	4,15
	Mc	2,11	4306	1,7	0
NBR 12653		-	-	≤ 34	-

Fonte: Autor (2018).

Analisando os resultados apresentados por meio da Tabela 16, pode-se inferir que a amostra proveniente da UTL A, na condição natural, apresenta fração retida na peneira 45 µm acima de 34%, valor máximo estabelecido pela NBR 12653 (ABNT, 2015). As demais amostras se mantiveram abaixo deste valor. Como discutido no capítulo 0, a fração retida na malha 45 µm tem influência na capacidade de fixação do CaO. Isto, associado à composição química de baixo teor de sílica e elevada perda ao fogo, comprometem a capacidade de fixação do CaO por esta CV.

Como a moagem das cinzas retidas foi realizada até a obtenção da área específica de Blaine apresentada pela CV da mesma origem, uma pequena quantidade ainda ficou retida na peneira 45 µm.

Quanto à área específica de Blaine, as cinzas naturais provenientes das usinas UTL B e UTL C apresentaram valores próximas, sendo outro indicativo da semelhança do processo de queima. As CV da UTL A apresentaram valores inferiores aos apresentados pelas demais origens.

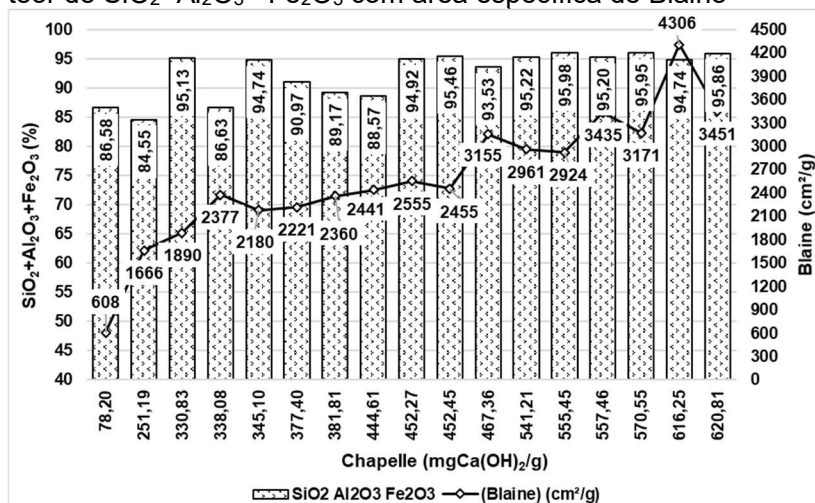
Em relação à massa específica, pode-se destacar que esta apresenta relação com a perda ao fogo e com o teor de SiO_2 apresentados na Tabela 13.

4.1.4 Compilação das propriedades das cinzas volantes

Neste item serão apresentadas as compilações dos resultados obtidos na caracterização das cinzas volantes provenientes do CTJL. Assim como a possibilidade de correlações entre certas propriedades, e a proporção de influência das propriedades químicas, teor de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, e físicas, área específica de Blaine, na capacidade de fixação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

A Figura 22 apresenta no eixo das abcissas os valores de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ obtidos, em ordem crescente e nas ordenadas, à esquerda, tem-se o teor de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, e por fim, nas ordenadas à direita, tem-se a área específica de Blaine. As barras representam o teor de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ e a linha representa a área específica de Blaine.

Figura 22 – Relação da capacidade de fixação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ com teor de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ com área específica de Blaine



Fonte: Autor (2018).

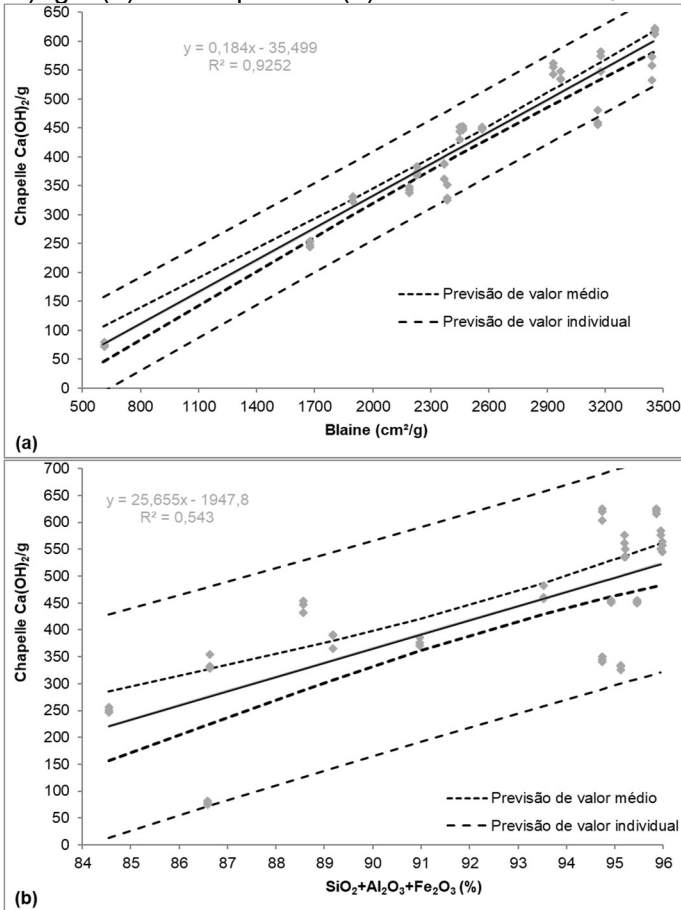
Pode-se perceber que quanto maior a área específica, maior a capacidade de fixação de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, mesmo com certa variação do teor de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ até certo ponto. Uma vez que no ponto em que o teor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ atingiu 616,25 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$ a área específica apresentava valor de 4306 cm^2/g , e o teor de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 94,74%. No ponto posterior, 620,81 Mg $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$, área específica de apenas 3451 cm^2/g , já o teor de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 95,86%. Logo, pode-se destacar que o teor de $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$ tem influência além da área específica, do teor de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$.

Com o intuito de verificar qual dos fatores possui maior influência na capacidade de fixação do $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$ considerou-se necessário realizar uma análise estatística.

A Figura 23 mostra a influência da área específica de Blaine na capacidade de fixação do $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$ da cinza volante. Pode-se perceber que quanto mais elevada a área específica maior a capacidade de fixação do $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$. Isso ocorre por que quanto maior a área específica, maior é o contato da superfície das partículas com a solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$, como discutido no item 2.3.2. O valor mais alto de fixação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ apresenta uma área específica menor, porém, seu teor de sílica é mais elevado. A Figura 23 mostra a influência do teor de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ na

capacidade de fixação do $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ pela cinza volante. Este fator, por mais que apresente um intervalo de confiança mais amplo, o que representa maior dispersão dos valores correlacionados, ainda mostra uma tendência relevante na influência desta propriedade.

Figura 23 – Correlação entre a capacidade de fixação do $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ e (a) área específica (b) teor de $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$



Fonte: Autor (2018).

A Tabela 17 mostra os coeficientes de determinação e de correlação para as variáveis dependentes e independentes apresentadas na Figura 23.

Tabela 17 – Coeficientes que investigam a correlação entre uma variável dependente e outra independente – Figura 23 (a) e (b)

Fatores correlacionados	<i>Person</i> R ²	<i>Student</i>	
		t (b/Sb)	t $\alpha/(2(n-2))$
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%) vs Ca(OH) ₂ /g	0,5430	7,3923	2,01
Blaine vs Ca(OH) ₂ /g	0,9252	23,858	

Fonte: Autor (2018).

Mesmo com um coeficiente de determinação de *Person* modesto, há correlação significativa entre o teor de SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ e a capacidade de fixação do Ca(OH)₂, pois a razão entre a constante angular da reta e desvio padrão de inclinação – *t*, é maior que o valor da distribuição *t-Student* – *t* α . Logo, existe uma correlação significativa entre as propriedades, com 95% de confiança. Avaliando a correlação entre a área específica de Blaine e a capacidade fixação do Ca(OH)₂ o coeficiente de determinação de *Person* se mostrou consideravelmente elevado, acima de 90%. A avaliação por *Student* se mostrou tão significativa quanto a correlação anterior, também com 95% de confiança. Com isso, infere-se que o coeficiente de determinação de *Person* não apresenta sensibilidade representativa para determinar a significância de uma correlação. O R² mensura apenas a aproximação de certos pontos com a reta obtida pela regressão do conjunto destes certos pontos. Logo, não deve ser utilizado para analisar a força das correlações, e sim o teste *t*.

Os resultados encontrados vão ao encontro com o comentado no capítulo 0 desta dissertação. Por fim, pode-se inferir que a área específica apresenta maior influência que o teor de SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ na fixação do Ca(OH)₂, desde que haja um teor mínimo de SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃.

4.2 ESTUDO EM ARGAMASSA

O presente item apresenta os resultados obtidos no estudo realizado em argamassa executados com areia padrão e com a combinação de areia de cava e areia de britagem.

4.2.1 Ensaios com areia padrão

Neste item são apresentados os resultados obtidos no estudo em argamassa contendo areia padrão como agregado. Estes resultados estão organizados separadamente no estado fresco e no estado endurecido.

4.2.1.1 Estado fresco

Para avaliar o comportamento no estado fresco das argamassas produzidas com areia padrão, foram realizados ensaios de espalhamento estático (*flow 0*) e dinâmico (*flow 5* e *flow 10*), também a determinação do teor de ar para cada traço de argamassa. Estes ensaios foram realizados com as diferentes CV avaliadas nesta pesquisa – Figura 14. Estes resultados são apresentados na Figura 24 onde as barras representam os valores de espalhamento e a linha representa o teor de ar. Foram confeccionados 69 traços de argamassas compostas com areia padrão. As cinzas de todas as UTL de origem foram avaliadas nas condições – natural (N), fração retida na peneira 45 μm (R), fração passante na peneira 45 μm (P) e a fração retida na peneira 45 μm moída até o Blaine da fração passante (M). A UTL B e C foi avaliada em mais uma condição, sendo a disponível no mercado como moída (Mc). Estes rótulos foram designados na Figura 13.

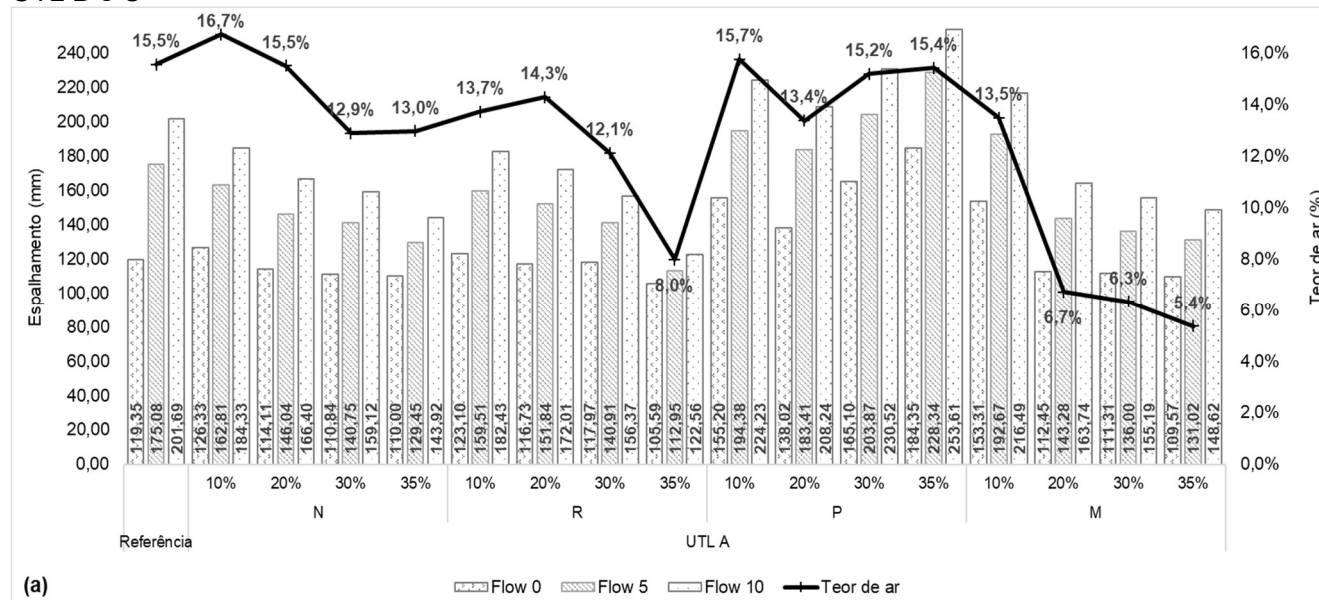
Estes ensaios foram realizados com areia padrão, pois é o agregado padronizado pelas NBR 5752 (ABNT, 2014) e C 618 (ASTM, 2015). Estas normas estabelecem que o espalhamento das argamassas deve ser fixado em 225 ± 5 mm, e a substituição do cimento pelo MCS de interesse em 25% em massa. Entretanto, como comentado no item 2.2.1, a densidade da cinza volante é muito menor que a densidade do cimento Portland. Um cimento CP II – F, estabelecido por estas normas⁵ para este ensaio, apresenta massa específica média de $3,08 \text{ g/cm}^3$. Um cimento CP V, utilizado nesta pesquisa, apresenta massa específica média de $3,15 \text{ g/cm}^3$, enquanto a densidade média de uma cinza volante é

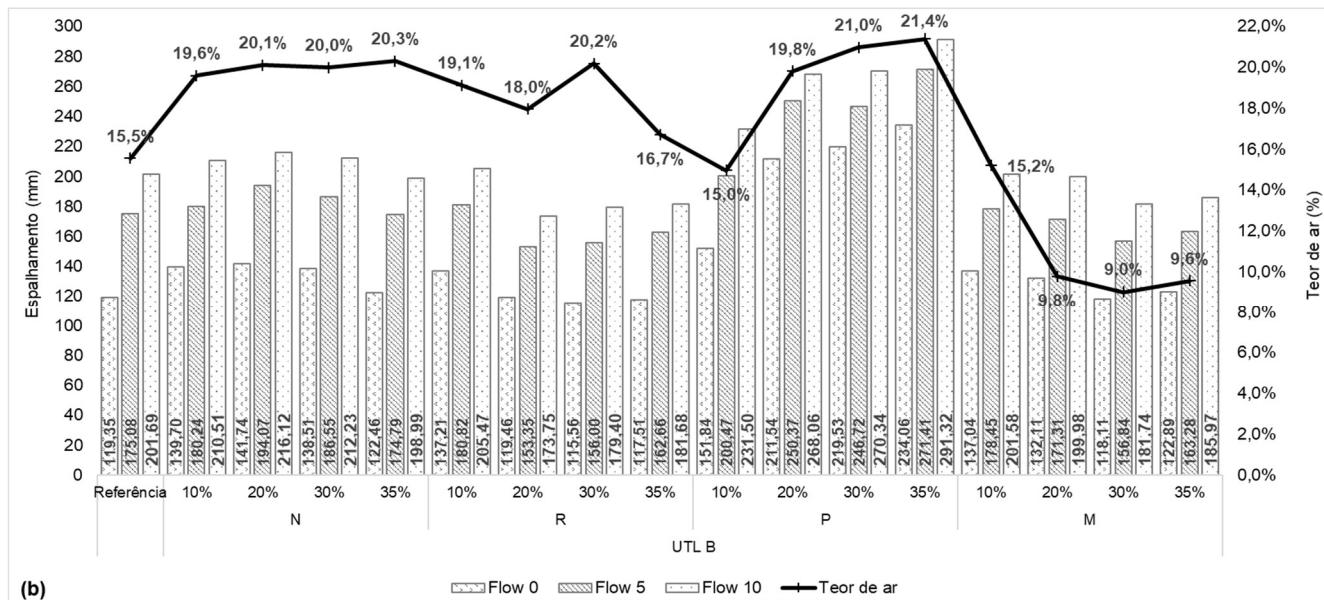
⁵ A C 618 (ASTM, 2015) estabelece que o cimento Portland a ser usado deve ser o mesmo que será empregado junto do MCS na produção do concreto ou da argamassa.

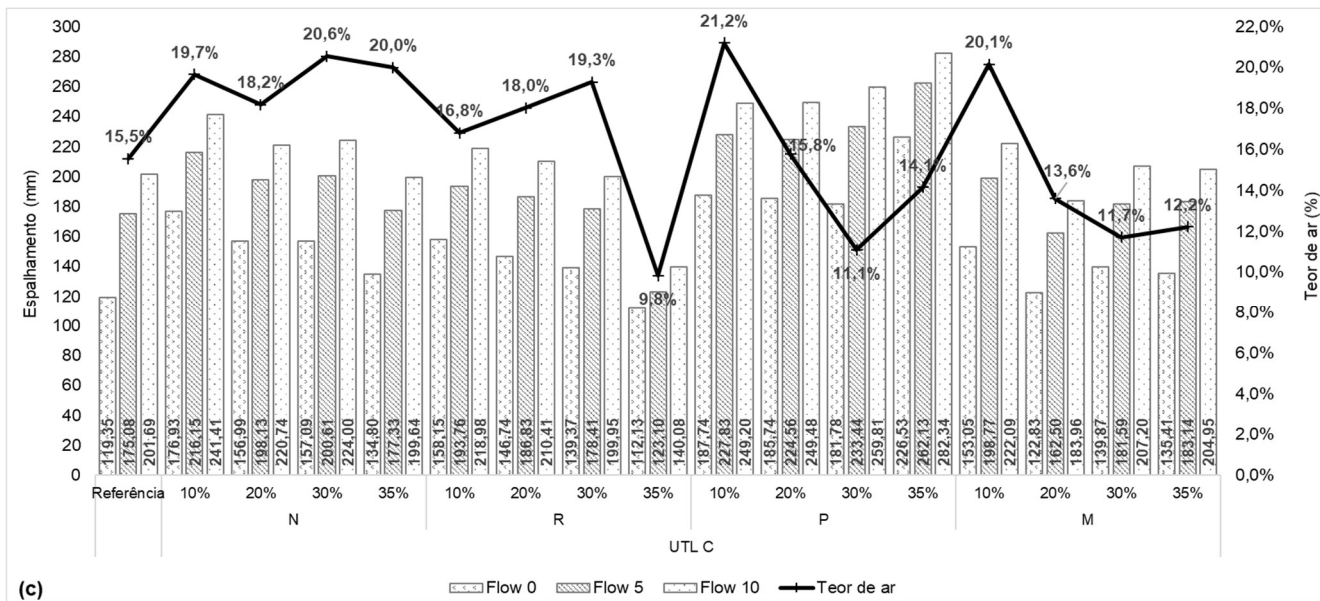
2,15 g/cm³. As cinzas volantes utilizadas nesta pesquisa apresentam valores de massa específica entre 1,75 a 2,49 g/cm³.

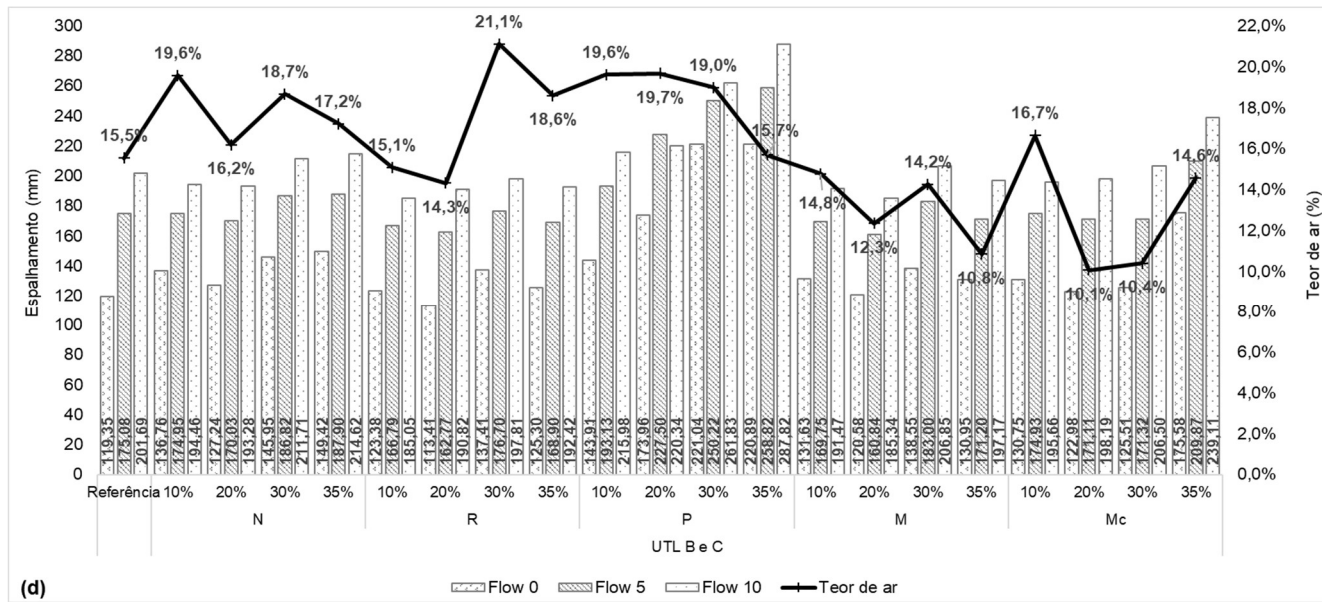
Desta forma, para que volume de argamassa seja o mesmo para todos os traços, há a necessidade desta substituição ser feita em volume absoluto, e não em massa como estas normas estabelecem. Foi mencionado, no item 2.3.1.5, que a correção da consistência deve ser feita com aditivo superplastificante. Porém, o uso de aditivos reduz a tendência à flocculação das partículas de cimento. Por este motivo, optou-se por padronizar todas as argamassas da seguinte forma; o valor do espalhamento foi alterado, e todas as argamassas contêm a mesma quantidade de aditivo e de água. Assim, foi possível determinar a influência das CV na demanda de água e no teor de ar e, posteriormente, na resistência à compressão.

Figura 24 – Relação entre o espalhamento estático e dinâmico com o teor de ar das argamassas com areia padrão (a) cinzas volantes UTL A (b) cinzas volantes UTL B (c) cinzas volantes UTL C (d) cinzas volantes UTL B e C









Fonte: Autor (2018).

Analisando os resultados que compõem a Figura 24 é possível observar que o espalhamento estático é influenciado pela condição das cinzas volantes, além de suas origens. Comparando o *flow 0* obtido com as argamassas contendo as cinzas volantes na condição natural com a argamassa contendo apenas cimento (referência), pode-se perceber que a CV originária da UTL A resulta em melhora de 6% com o teor de 10% de substituição. Este aumento pode estar associado ao preenchimento da faixa granulométrica da areia padrão, uma vez que o teor de ar não foi reduzido. Weidmann (2008) apresenta resultados de aumento do espalhamento estático com teores maiores de areia fina, até certas porcentagens. Este comportamento pôde ser observado para a CV UTL A N, e se manifesta mais acentuado para a CV UTL A R, uma vez que esta é uma CV com distribuição de seus grãos um pouco mais grossa. Esta análise das partículas é constatada pela finura de Blaine, apresentada na Tabela 13. Entretanto, para os demais teores de substituição, o comportamento é adverso, ocorrendo uma redução de espalhamento estático de 4, 7 e 8% para os teores de 20, 30 e 35%, respectivamente. Com isto, pode-se destacar que a substituição do cimento por CV UTL A N em 10% apresentou aumento pelo efeito macro físico mencionado – complemento na distribuição da faixa fina da areia. Já a redução nos demais teores é atribuída à falta de finos reativos, pois o cimento de Blaine 4470 cm²/g é substituído por CV de Blaine entre 608 e 2377 cm²/g. Assim, o teor de pasta foi gradativamente reduzido. As argamassas com as demais origens (UTL B, UTL C e UTL B e C) apresentaram aumento no espalhamento estático. A origem UTL B apresentou crescimento do espalhamento 17, 19, 16 e 3% para os teores de 10, 20, 30 e 35%, respectivamente. A UTL C apresentou um aumento de 48, 32, 32 e 13% para os teores de 10, 20, 30 e 35%, respectivamente. Já a UTL B e C apresentou um aumento de 15, 7, 22, 25%. Este crescimento é associado ao tamanho relativamente pequeno dos grãos, que promoveram melhora na forma dos grãos da pasta, pois as partículas de cimento apresentam forma irregular e lamelar, além de superfícies rugosas. Já as cinzas volantes formadas em um sistema de queima de elevada eficiência apresentam formas esféricas. Uma comparação entre os sistemas de queima pode ter, como base, o teor de incombusto (perda ao fogo – Tabela 13) que a UTL A N apresentou 7,30%, UTL B N 2,88%, UTL C N 0,96% e UTL B e C N 1,31. A descontinuidade do crescimento do espalhamento

dinâmico das argamassas contendo a CV UTL B e C N está relacionada à redução no teor de ar, na argamassa com 20% de substituição. Para o espalhamento estático o teor de ar contribui para a fluidez da argamassa. Logo, o alto teor de ar apresentado pelas argamassas produzidas com areia padrão pode mascarar o que seria influência da CV. Em relação às CV na condição retidas na peneira 45 μm , o comportamento do espalhamento estático apresentou-se menos benéfico que as amostras na condição natural. Isto indica que as CV provenientes do CTJL possuem certa fração de partículas que necessitam de beneficiamento para possibilitar a obtenção do máximo desempenho, promovido pela sua adição ao concreto no estado fresco. A CV proveniente da UTL A R apresentou um crescimento de 3% para o teor de substituição 10%. Por outro lado, os teores de substituição 20, 30 e 35% apresentaram reduções de 2, 1 e 12%, respectivamente. Portanto, constata-se que esta usina produz uma cinza volante de desempenho aquém do buscado para utilização em concreto. Com o uso da CV UTL B R, foi obtido um aumento de 15% no espalhamento estático, utilizando 10% de substituição. Contudo, este desempenho benéfico não se manteve para os demais teores de substituição – 0, 3 e 2% de redução em 20, 30 e 35%. As argamassas produzidas com a CV UTL C R apresentaram aumento no *flow 0* de 33, 23 e 17, para os teores de substituição de 10, 20 e 30%. Já o teor de 35% manifestou uma redução de 6%. Utilizando a CV UTL B e C, foram obtidos aumentos de 3, 15 e 5% com os teores 10, 30 e 35% de substituição. Com o teor de 20% foi obtida uma redução de 5%. Este comportamento adverso é atribuído ao teor de ar reduzido manifestado por esta argamassa. Foram produzidas argamassas com a fração de partículas menores que 45 μm (P). Nesta condição, independente da origem (UTL) e do teor de substituição, constatou-se desempenho benéfico no espalhamento estático. Entretanto, novamente, o teor de ar elevado observado para argamassas produzidas com areia padrão influenciou nos resultados do espalhamento estático. Como pode ser observado, a CV UTL A P apresentou uma descontinuidade no aumento do *flow 0* - 30, 16 38 e 54% para os teores de substituição, na ordem crescente já comentada.

Os maiores desempenhos no espalhamento estático foram obtidos com o teor de 35% de substituição das CV UTL B (96%) e CV UTL C (90%). Isto indica que a UTL B e UTL C produzem

cinzas volantes com desempenho no estado fresco muito semelhantes, o que explica sua mistura para comercialização.

A fim de comprovar a melhora no desempenho obtido com estas CV, a fração retida na malha 45 μm (R) foi moída até a finura de Blaine da sua fração passante na peneira 45 μm (P). Com este beneficiamento, foram produzidas argamassas com os mesmos teores de substituição. Os valores de *flow* 0 obtidos para a CV UTL A M foram de 28, - 6, - 7 e - 8% para os teores anteriormente mencionados. Porém, com o acréscimo nos teores de substituição, ocorreu redução substancial no teor de ar, fator de considerável influência no espalhamento estático. Este teor reduziu de 15,5% (argamassa referência) para 6,7% (argamassa CV UTL A M 20%), 6,3% (argamassa CV UTL A M 30%) e 5,4% (argamassa CV UTL A M 35%). Isto indica que o uso de areia padrão proporciona mais uma variável na avaliação da influência da CV na fluidez da fase de argamassa do concreto. Comportamento semelhante pode ser observado para as argamassas contendo CV moída das demais origens, com os teores de substituição em ordem crescente. A CV UTL B M apresentou aumento no *flow* 0 de 15, 11, -1 e 3% e teor de ar de 15,2, 9,8, 9,0 e 9,6%. Com a CV UTL C M, foram obtidos crescimentos de 28, 3, 17, 13%, e teores de ar de 20,1, 13,6 11,7 12,2%. O teor de 10% de substituição (*flow* 0 – 28%; teor de ar 20,1) apresenta acréscimo no *flow* 0 não apenas pela forma das partículas da CV, também pelo aumento de 4,6% no teor de ar. Os demais materiais deveriam ser inertes neste processo. A UTL B e C apresentou aumentos de 10, 3, 5 e 47%; este comportamento está relacionado diretamente aos teores de ar apresentados – 16,7, 10,1, 10,4 e 14,6%. Isto vem a indicar, mais uma vez, que a areia padrão promove mais uma variável em um ensaio onde se busca avaliar o desempenho de um MCS.

Em relação ao espalhamento dinâmico, será analisado apenas o *flow* 10, pois o *flow* 5 apresentou valores muito semelhantes ao *flow* 10. Conforme ressaltado no item 3.2.3, este foi determinado somente em busca de certa adequação aos ensaios do *flow* 10, devido à intenção de investigar correlações entre os ensaios em argamassa e em concreto.

A CV UTL A N apresentou reduções no espalhamento dinâmico. Mesmo com a redução no teor de ar, como já comentado, este teor ajuda no espalhamento estático e atrapalha no espalhamento dinâmico. A UTL B N apresentou aumento no espalhamento dinâmico em 4, 7, 5% para os teores de substituição

de 10, 20 e 30%. Com 35% de substituição houve uma redução de 1%. A UTL C N apresentou aumento de 20, 9 e 11% no *flow* 10, para os teores de substituição de 10, 20 e 30%. Com 35% de substituição, o comportamento foi igual ao da amostra UTL B N. A CV UTL B e C N apresentou redução do espalhamento em teores 10 e 20% de substituição, e aumento com 30 e 35% de substituição. As amostras de CV P apresentaram, como no espalhamento estático, comportamento benéfico ao espalhamento dinâmico para todos os teores de substituição, condição e origem das CV. Quanto às amostras retidas, a CV UTL A R apresentou reduções semelhantes àquelas manifestadas pela CV UTL A N. Porém, com 35% de substituição, proporcionou uma redução de 15,5% (Argamassa referência) para 8,0% no teor de ar, o que proporciona aumento no espalhamento dinâmico. A CV UTL B R mostrou redução de 4, 1 e 10% para os teores de substituição de 20, 30 e 35%; enquanto o teor de 10% apresentou aumento de 2%. A CV UTL C R mostrou comportamento adverso ao manifestado pela UTL B R. Com teores de 10 e 20% de substituição, houve um aumento de 9 e 4%; enquanto, com 30 e 35%, houve uma redução de 1 e 31%. Em relação às amostras moídas, é possível perceber certa melhora no desempenho, independentemente das origens, se comparado com os resultados das amostras retidas. Isto mostra que o beneficiamento de moagem até a finura de Blaine, apresentada na sua fração passante na malha de 45 μm , potencializa o desempenho da CV. A amostra moída comercial apresentou comportamento semelhante ao das amostras moídas das UTL B e UTL C.

Com o intuito de ratificar conclusões sobre as variáveis investigadas – origem (UTL), característica das partículas das CV (condição) e quantidade de CV adicionada (teor de substituição), nas propriedades avaliadas – espalhamento estático e dinâmico e no teor de ar, considerou-se pertinente realizar testes estatísticos de análise de variância, conforme apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 – ANOVA – influência da condição, da Usina Termelétrica (UTL) de origem e do teor de substituição nas propriedades no estado fresco das argamassa com areia padrão

Parâmetro	Fonte	SQ	GL	MQ	F	Probabilidade
Teor de ar	UTL	0,0237	3	0,0079	11,69	≈100,00%
	Condição	0,0387	3	0,0129	19,11	≈100,00%
	Teor de substituição (%)	0,0072	3	0,0024	3,53	97,94%
	Erro	0,0364	54	0,0007		
Flow 0	UTL	6260,9	3	2087,0	2,34	91,66%
	Condição	11272,2	3	3757,4	4,22	99,05%
	Teor de substituição (%)	569,2	3	189,7	0,21	11,29%
	Erro	48131,1	54	891,3		
Flow 5	UTL	9989,4	3	3329,8	3,21	97,01%
	Condição	10551,9	3	3517,3	3,40	97,58%
	Teor de substituição (%)	409,3	3	136,4	0,13	5,92%
	Erro	55934,7	54	1035,8		
Flow 10	UTL	11059,2	3	3686,4	3,33	97,40%
	Condição	9825,2	3	3275,1	2,96	95,98%
	Teor de substituição (%)	887,3	3	295,8	0,27	15,15%
	Erro	59701,1	54	1105,6		

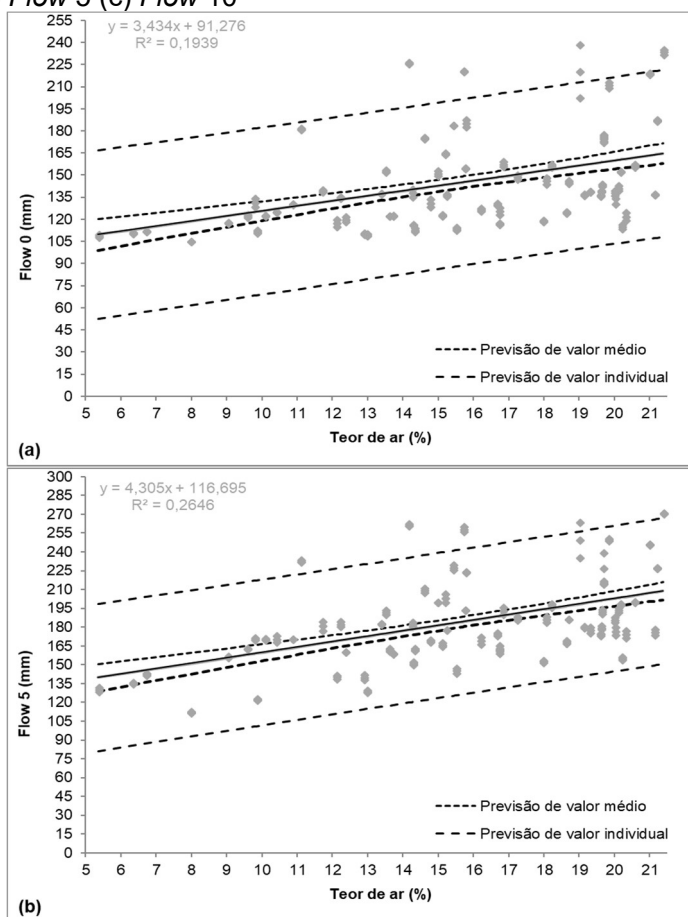
Fonte: Autor (2018).

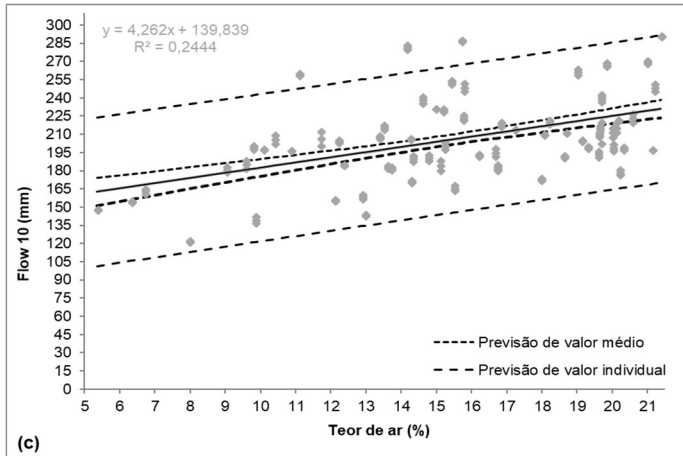
O teor de ar é significativamente influenciado, com 95% de confiança, por todas as variáveis do experimento, sendo o teor de substituição o de menor influência; porém, esta também é significativa. No espalhamento estático (*flow 0*), apenas a condição das CV apresenta influência significativa, a origem apresenta fator de influência de 91,66%, sendo influente, porém sem significância estatística. No espalhamento dinâmico (*flow 5* e *flow 10*), a origem e a condição das CV apresentam influência significativa, com 95% de confiança. No *flow 5*, a ordem de

importância é condição e origem; já para o *flow* 10, esta ordem se inverte. Efeitos de segunda e terceira ordem não puderam ser investigados porque não foram realizadas repetições dessas argamassas.

Para investigar a influência do teor de ar no espalhamento, foram investigadas correlações, como se pode observar na Figura 25. A Tabela 19 apresenta os coeficientes de determinação de *Person* R^2 e de *Student* t e t_α .

Figura 25 – Areia padrão – Correlação entre o teor de ar e (a) *Flow* 0 (b) *Flow* 5 (c) *Flow* 10





Fonte: Autor (2018).

Tabela 19 – Coeficientes que investigam a correlação entre uma variável dependente e outra independente – Figura 25 (a), (b) e (c)

Fatores correlacionados	<i>Person</i>	<i>Student</i>	
	R ²	t (b/Sb)	t _{α/(2(n-2))}
Teor de ar (%) vs Flow 0	0,1939	6,9699	
Teor de ar (%) vs Flow 5	0,2646	8,5245	1,972
Teor de ar (%) vs Flow 10	0,2444	8,0822	

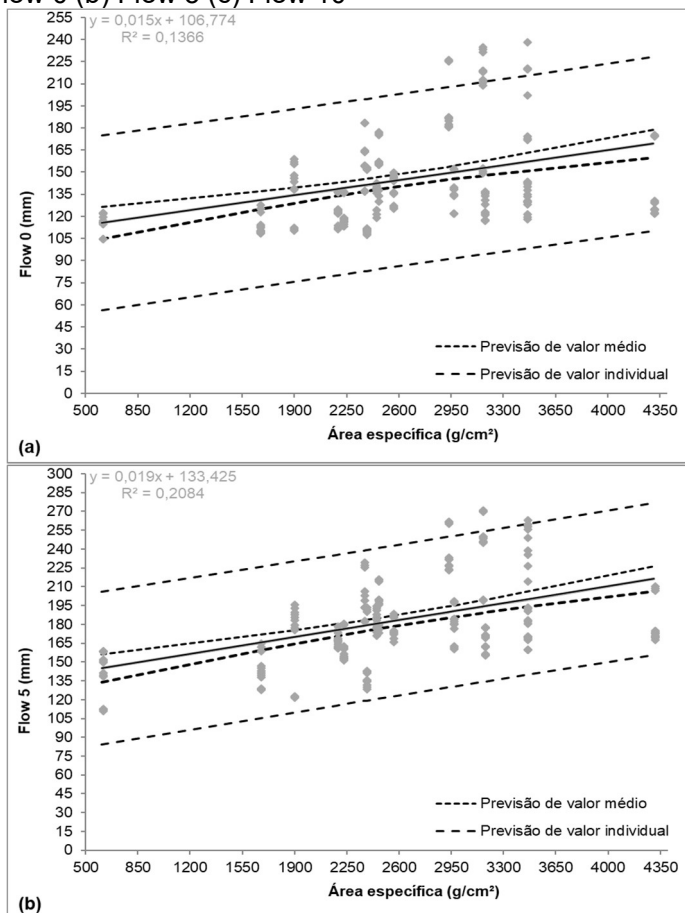
Fonte: Autor (2018).

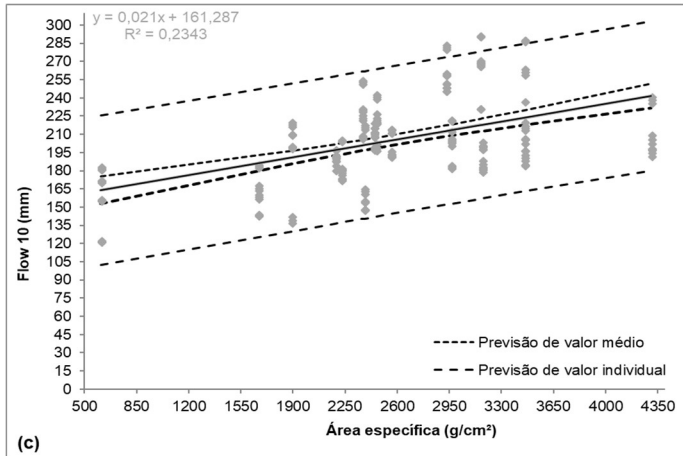
Como observado no item 4.1.4, o coeficiente de correlação de *Person* não apresenta sensibilidade para confirmar ou refutar uma correlação entre estas propriedades. Da mesma forma, como feito para as correlações investigadas no item 4.1.4, foi utilizado o método de *Student* para determinar a significância das correlações apresentadas na Figura 25. Como o $t > t_{\alpha}$, existe correlação significativa entre as propriedades correlacionadas. Entretanto, o teor de ar correlacionado com o espalhamento dinâmico (*flow 5* e *flow 10*) deveria apresentar um coeficiente angular negativo, pois, com o aumento do teor de ar, o *flow 10* é reduzido. Porém, há a variável do teor de substituição do cimento por CV, além da condição das partículas e origem da CV como variável. Isto contribui para o anteriormente ressaltado, que o uso de areia padrão desencadeia outras variáveis aos experimentos.

Com o intuito de corroborar a possibilidade ressaltada de que o uso de areia padrão proporciona mais uma variável – o teor

de ar, foram realizadas correlações entre a área específica e os espalhamentos estático e dinâmico. Estas correlações são apresentadas na Figura 26. A Tabela 20 contém os coeficientes de correlação obtidos pelas investigações das correlações da Figura 26.

Figura 26 – Areia padrão – Correlação entre a área específica e (a) Flow 0 (b) Flow 5 (c) Flow 10





Fonte: Autor (2018).

Tabela 20 – Coeficientes que investigam a correlação entre uma variável dependente e outra independente – Figura 26 (a), (b) e (c)

Fatores correlacionados	<i>Person</i>	<i>Student</i>	
	R ²	t (b/Sb)	t $\alpha/(2(n-2))$
Área específica (g/cm ²) vs Flow 0	0,1366	5,6369	
Área específica (g/cm ²) vs Flow 5	0,2084	7,2943	1,972
Área específica (g/cm ²) vs Flow 10	0,2343	7,8614	

Fonte: Autor (2018).

A área específica apresenta influência significativa, tanto no espalhamento estático quanto no espalhamento dinâmico, com 95% de confiança. Porém, sua influência é maior no espalhamento dinâmico do que no estático. Este comportamento é associado ao teor de ar, que é reduzido com o uso desta CV.

Park *et al.* (2005) observaram que a adição de cinza volante com área específica (Blaine) maior que 3300 cm²/g proporcionam maior fluidez ao compósito cimentício. Jalal, Fathi e Farzad (2013) destacam que CV com área específica entre 3000 e 3500 cm²/g reduz a viscosidade do compósito, porém, sem manifestação de exsudação ou segregação.

4.2.1.2 Estado endurecido

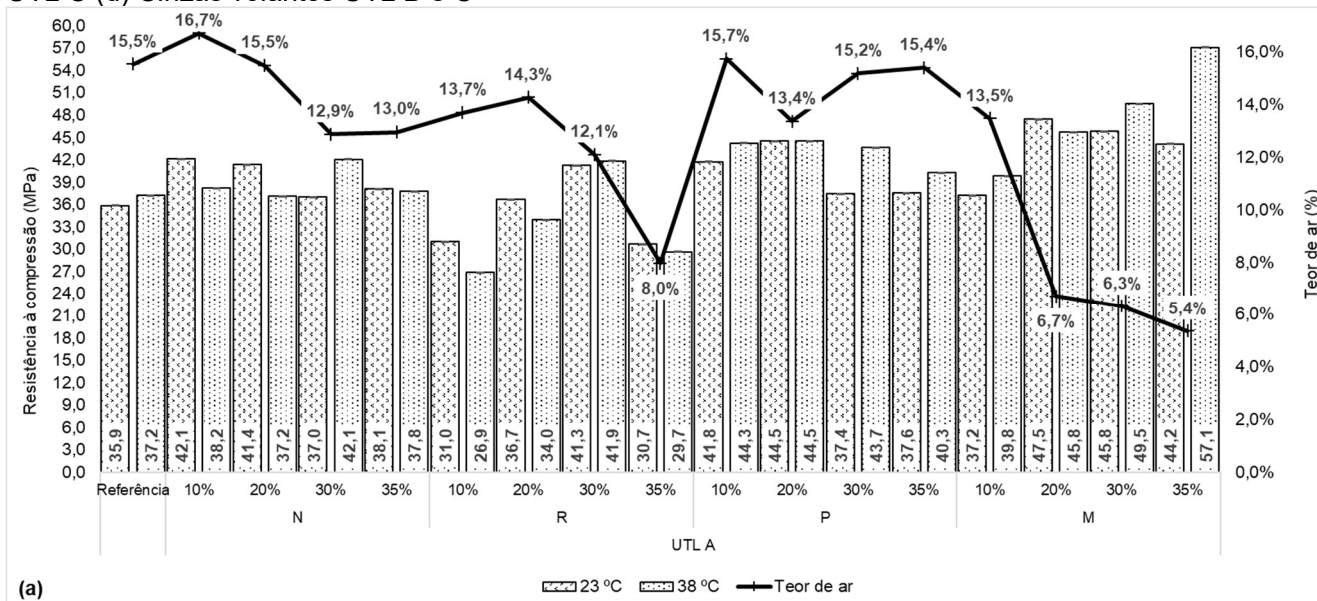
No estado endurecido, foram realizados ensaios de compressão axial aos 28 dias de idade, com cura a 23 °C, como estabelecido pela NBR 5752 (ABNT, 2014); e a 38 °C, segundo o procedimento descrito pela NBR 5752 (ABNT, 1992). Como ressaltado no item 3.2.3, a cura a 38 °C foi realizada devido ao aumento da resistência constatado por Salum (2016) nos concretos do interior de blocos de fundação. Foi utilizado este método por ser normatizado para argamassas, possibilitando a obtenção de resultados, de forma padronizada, que vão ao encontro dos interesses desta pesquisa.

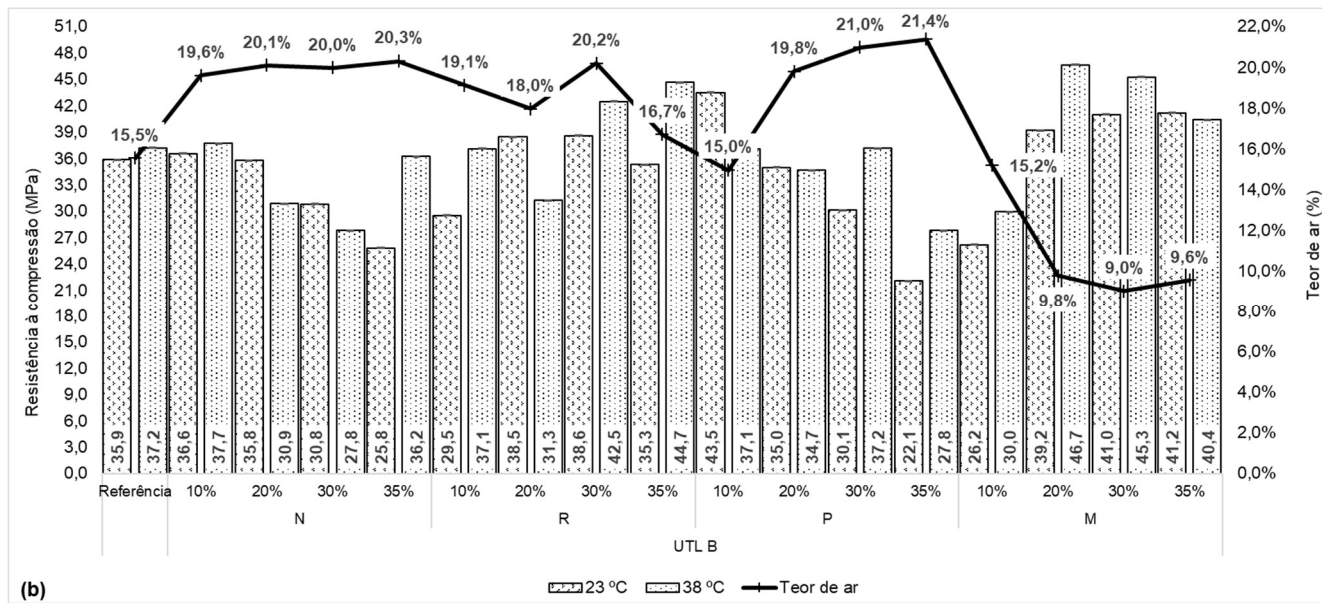
Estes ensaios tiveram modificações, como já destacado no item 4.2.2.1 – estado fresco, devido à constatação da possibilidade de adequação do método para obtenção de resultados mais confiáveis e que remetessem aos objetivos específicos desta pesquisa. Desta forma, foram moldados 8 corpos de prova para cada um dos 69 traços, sendo curados 4 a 23 °C e 4 a 38 °C.

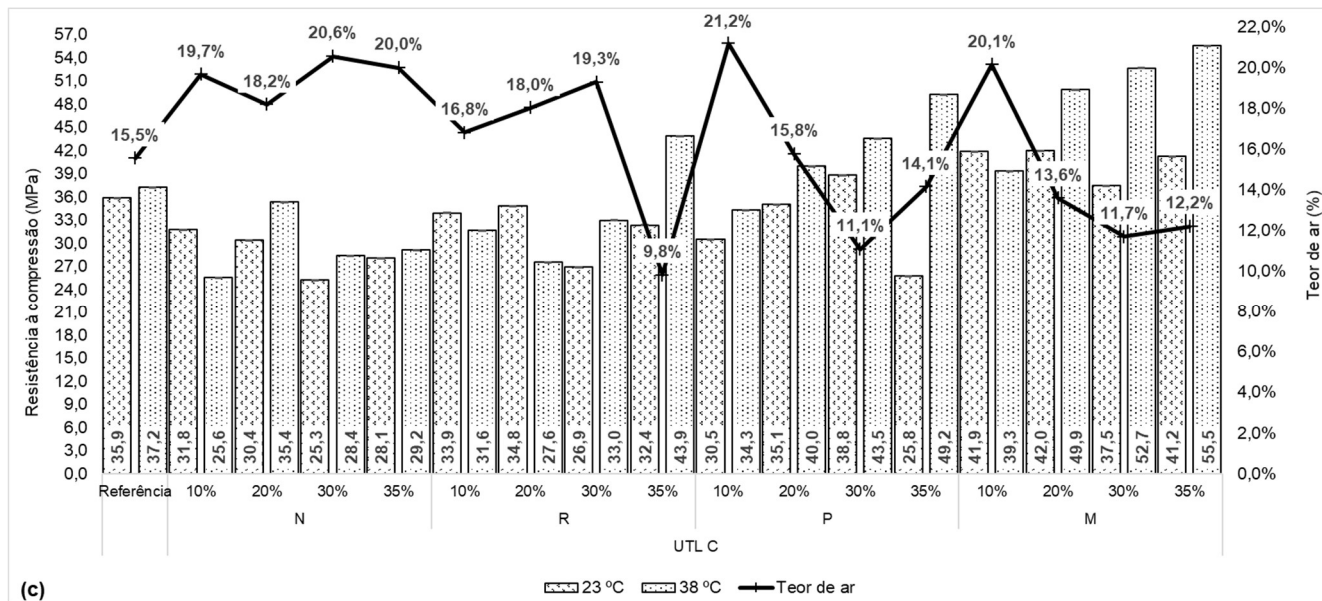
Em razão das modificações realizadas, considerou-se necessário estabelecer um controle um pouco mais rigoroso para aceitação dos resultados obtidos. Com isto, foram utilizadas as médias de 4 corpos de prova que apresentaram erro relativo menor que 5%.

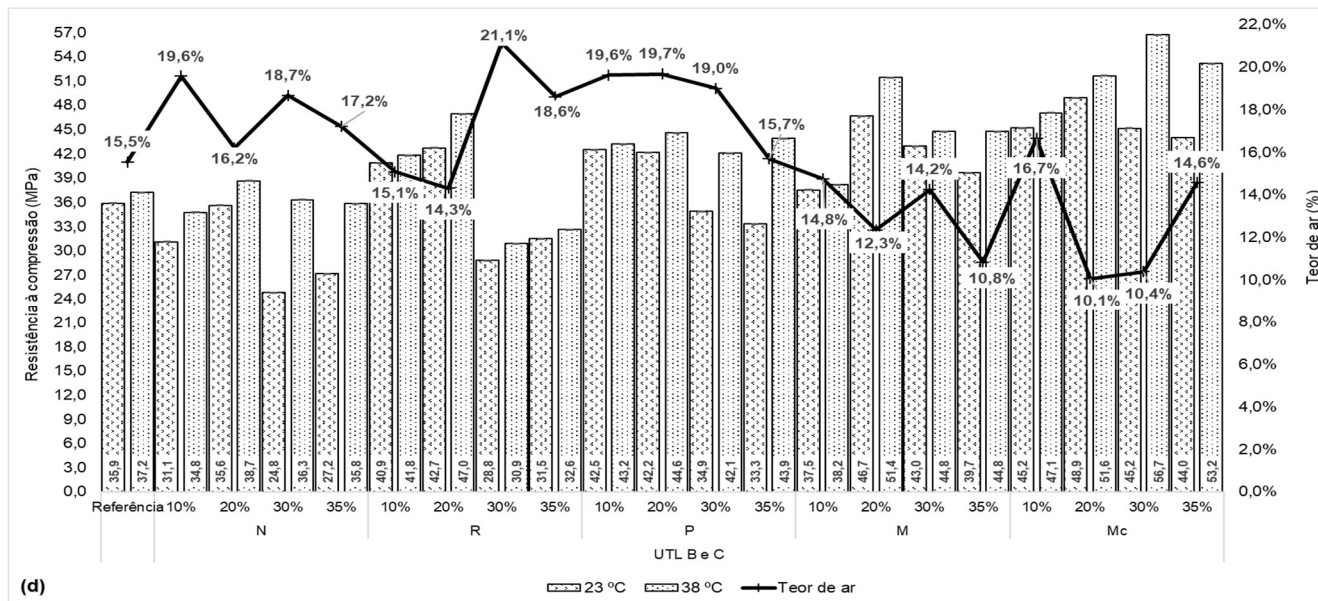
A Figura 27 apresenta os resultados para as curas em 23 e 38 °C aos 28 dias, representadas pelas barras, além do teor de ar representado pela linha, referentes às argamassas produzidas com as diferentes CV apresentadas, rotuladas na Figura 14.

Figura 27 – Relação entre a resistência à compressão com cura em 23 °C e 38 °C com o teor de ar das argamassas com areia padrão (a) Cinzas volantes UTL A (b) Cinzas volantes UTL B (c) Cinzas volantes UTL C (d) Cinzas volantes UTL B e C









Fonte: Autor (2018).

A resistência à compressão de sistemas cimento-cinza volante, como mostrado no item 2.2.1.1, necessita que as fases de silicato do cimento hidratem, liberando o CH, o que possibilita a reação pozolânica. Analisando os resultados que compõem a Figura 27, é cabível inferir que, para cura de 23 °C, com exceção das CV UTL B P, foram obtidos valores de 75% da resistência de referência. Grande parte das CV apresentou valores de resistência de até 136%, em relação a amostra referência - como a CV moída comercial, em 20% de substituição, por exemplo. Os resultados das amostras naturais ficaram, em grande parte das amostras, abaixo da resistência da amostra de referência. O crescimento da resistência das amostras contendo CV UTL A N tem sua contribuição para a evolução da resistência creditado a sua complementação da curva granulométrica da areia padrão na fração fina, pois seu potencial de fixação do Ca(OH)_2 - determinado no ensaio de Chapelle modificado (251,19 $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ de pozolana) ficou muito abaixo do valor utilizado como parâmetro de MCS pozolânica (435,6 $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ de pozolana). O mesmo comportamento foi observado para as argamassas contendo as CV R. Entretanto, as amostras passantes e moídas apresentaram incrementos de resistência, indicando que o beneficiamento das CV potencializa sua contribuição para o desenvolvimento da resistência à compressão das argamassas, assim como as contribuições constatadas no estado fresco.

Para a cura de 38 °C, todas as amostras apresentaram valores acima de 70%, chegando a patamares de 160%. As reduções manifestaram-se nas resistências à compressão, tanto em amostras grossas como em algumas porcentagens de substituição por CV finas. Este comportamento é atribuído à variação do teor de ar destas amostras. Conforme já mencionado, o uso de areia padrão para a produção destas argamassas apresentou teores de ar muito elevados para argamassa referentes a esta fração de um traço de concreto. Esta variável torna a avaliação do real comportamento mais complexa. Gava (1999) comenta entre seus resultados que este método não possui sensibilidade para medir o real desempenho do MCS. Enquanto Hoppe Filho *et al.* (2017) comentam que de IAP não é recomendado para determinar uma escala quanto a reatividade dos MCS, uma vez que neste método ocorre o esgotamento da cal durante o período de ensaio, o que cessa as reações pozolânicas.

Em busca de determinar a significância destes comportamentos, foram realizados testes fatoriais (ANOVA) em busca da identificação de efeitos individuais e das possíveis interações. Os resultados são apresentados na Tabela 21.

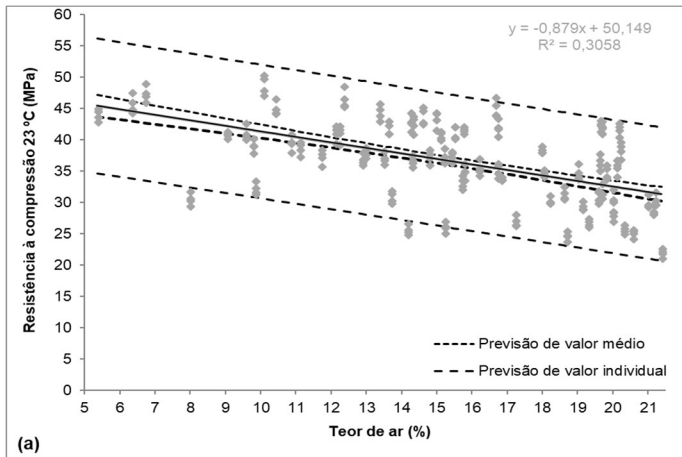
Tabela 21 – ANOVA – influência da condição, da Usina Termelétrica (UTL) de origem e do teor de substituição nas resistências à compressão com cura a 23 °C e 38 °C – Areia padrão

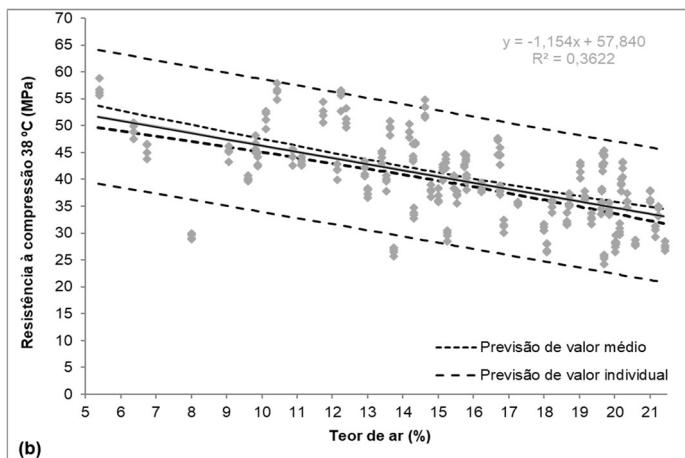
Parâmetro	Fonte	SQ	GL	MQ	F	Probabilidade
Resistência 23 °C	UTL	1435,03	3	478,35	521,00	100,00%
	Condição	2291,42	3	763,813	831,92	100,00%
	Teor de substituição (%)	1165,72	3	388,57	423,22	100,00%
	UTL vs Teor de substituição (%)	1007,22	9	111,91	121,89	100,00%
	UTL vs Teor de substituição (%)	1760,04	9	195,56	213,00	100,00%
	UTL vs Condição	1298,59	9	144,29	157,16	100,00%
	Teor de substituição (%) vs Condição	626,90	27	23,22	25,29	100,00%
	Erro	176,280	192	0,92		
Resistência 38 °C	UTL	714,71	3	238,24	211,01	100,00%
	Condição	4885,50	3	1628,50	1442,41	100,00%
	Teor de substituição (%)	766,69	3	255,56	226,36	100,00%
	UTL vs Teor de substituição (%)	2100,82	9	233,42	206,75	100,00%
	UTL vs Condição	2863,17	9	318,13	281,78	100,00%
	Teor de substituição (%) vs Condição	1117,78	9	124,20	110,01	100,00%
	UTL vs Teor de substituição (%) vs Condição	1059,41	27	39,24	34,75	100,00%
	Erro	216,770	192	1,13		

Fonte: Autor (2018).

O uso de areia padrão induz as análises a inferências possivelmente equivocadas. Observando a Tabela 21, é possível concluir que todas as variáveis apresentam influência significativa, tanto individual quanto com interações. Ressalta-se que o teor de ar determinado nas argamassas produzidas foi muito alto para argamassas referentes a esta fração do concreto, como já comentado. Por esta razão, foram realizadas avaliações da existência de correlações entre as resistências obtidas com os dois sistemas de cura, a 23 e 38 °C. A Figura 28 apresenta a plotagem dos valores, assim como a reta média e os intervalos de confiança para os valores médios e individuais.

Figura 28 – Areia padrão – Correlação entre o teor de ar e (a) Resistência à compressão 23 °C (b) Resistência à compressão 38 °C





Fonte: Autor (2018).

Com base na distribuição dos dados plotados, é possível destacar que há correlação entre o teor de ar e as resistências, tanto em cura a 23 °C quanto a 38 °C. Percebe-se, ainda, que o teor de ar apresenta valores que vão (aproximadamente) de 5 a 22%. Ainda, as resistências aumentam com a redução desses valores do teor de ar. A Tabela 22 apresenta os coeficientes de correlação entre o teor de ar e as resistências obtidas com 23 e 38 °C de cura.

Tabela 22 – Coeficientes que investigam a correlação entre uma variável dependente e outra independente – Figura 28 (a) e (b)

Fatores correlacionados	<i>Person</i>	<i>Student</i>	
	R ²	t (b/Sb)	t α/(2(n-2))
Teor de ar (%) vs Resistência 23 °C	0,3058	10,905	1,969
Teor de ar (%) vs Resistência 38 °C	0,3622	12,3840	

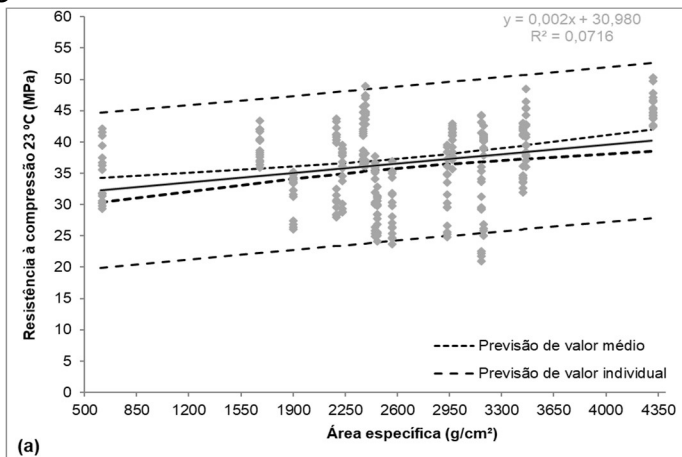
Fonte: Autor (2018).

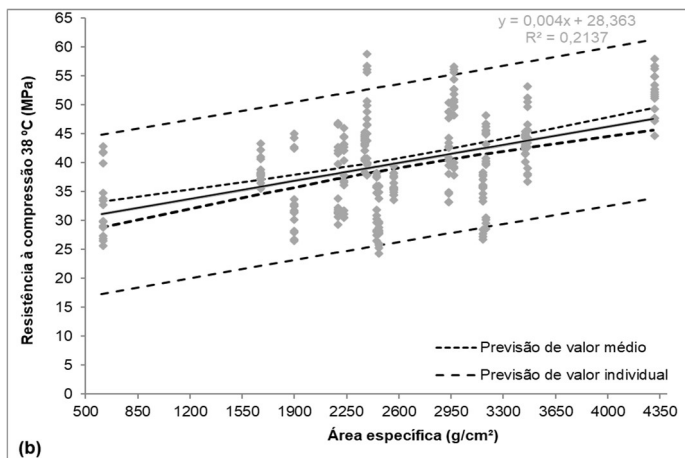
Existem correlações significativas entre o teor de ar e as resistências em 23 e 38 °C de cura. Com isto, é possível apontar para outras inferências, além de constatar atividade pozolânica destas cinzas volantes. Isto leva a questionar se o uso de areia padrão é o mais apropriado para investigação do uso de MCS pozolânico em concretos. Há, então, a necessidade de uma

investigação onde apenas o teor de MCS seja a variável, pois, nos ensaios em argamassa, as CV que se mostraram não reativas nos ensaios de Chapelle modificado seriam classificadas como pozolânicas. Isto porque o critério é o aumento de resistência, sem maior atenção ao efeito que desencadeou este comportamento, se é um efeito químico de pozolanicidade ou um efeito físico de preenchimento dos macroporos devido ao preenchimento da faixa fina da curva granulométrica da areia padrão.

Com o intuito de corroborar com as hipóteses levantadas quanto à influência do teor de ar na avaliação destas CV, foram estabelecidas correlações entre área específica e as resistências à compressão obtidas com os dois sistemas de cura. Estas correlações são apresentadas na Figura 29, os coeficientes de correlação são mostrados na Tabela 23.

Figura 29 – Areia padrão – Correlação entre a área específica e (a) Resistência à compressão 23 °C (b) Resistência à compressão 38 °C





Fonte: Autor (2018).

Tabela 23 – Coeficientes que investigam a correlação entre uma variável dependente e outra independente – Figura 29 (a) e (b)

Fatores correlacionados	<i>Person</i>	<i>Student</i>
	R ²	t (b/Sb) t $\alpha/(2(n-2))$
Área específica (g/cm ²) vs Resistência 23 °C	0,0716	4,5625
Área específica (g/cm ²) vs Resistência 38 °C	0,2137	8,5606

Fonte: Autor (2018).

Há significância na correlação, quando o fator $t > t_{\alpha}$. Logo, a correlação é mais significativa para a cura com 38 °C do que com 23 °C. Porém, a área específica influencia significativamente nas resistências obtidas nos dois sistemas de cura, com 95% de confiança. Contudo, esta correlação não pode ser utilizada para previsão de valor. Estas curvas foram construídas apenas para avaliar a influência da área específica na resistência.

4.2.2 Ensaios com combinação de areia de cava de britagem

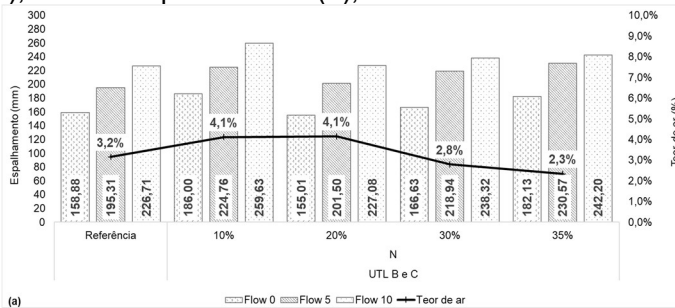
Como os resultados mostraram-se influenciados pelo elevado teor de ar gerado pelo uso de areia padrão, foram realizados ensaios utilizando a combinação da areia fina (areia de

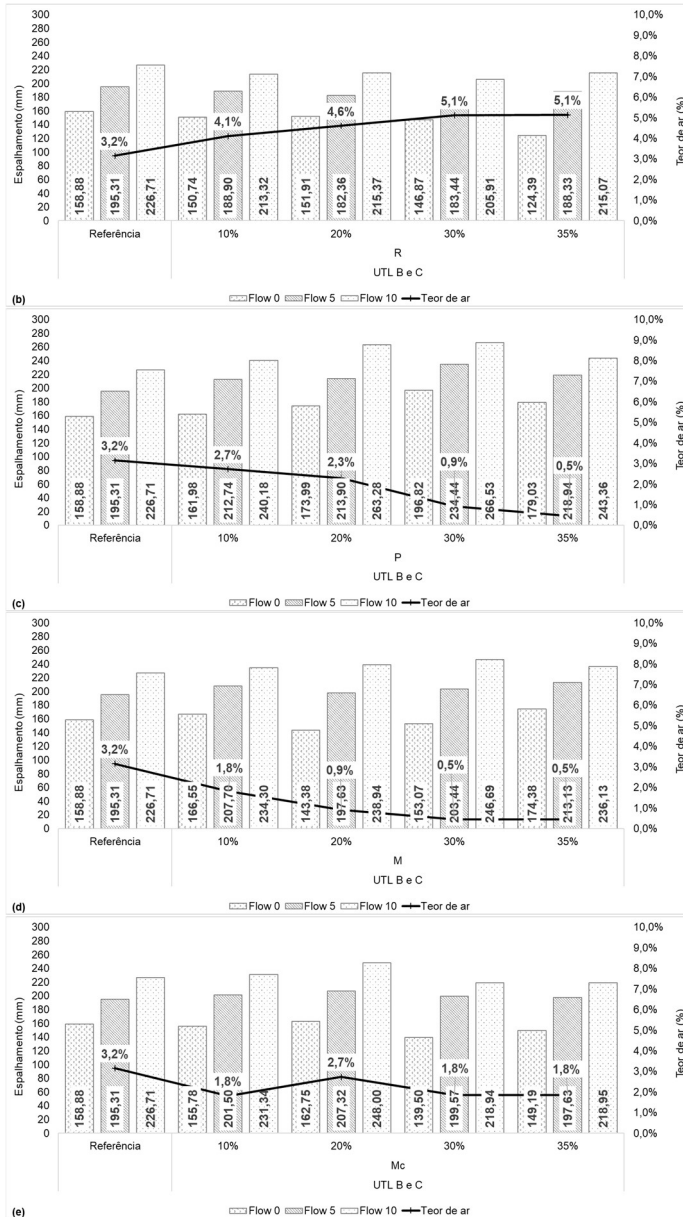
cava) e areia média grossa (areia de britagem). Esta combinação é a mesma utilizada no estudo em concreto. Foram avaliados, nesta etapa do programa experimental, somente as CV da origem UTL B e C destacadas na Figura 14 pela linha tracejada, totalizando 21 traços. Esta seleção foi feita com base nas condições química e física e na capacidade de fixação de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, que foram as CV com resultados mais expressivos. Os ensaios realizados foram os mesmos que nas argamassas com areia padrão.

4.2.2.1 Estado fresco

No estado fresco foram avaliados os espalhamentos estático e dinâmicos, além do teor de ar. Seus resultados são apresentados na Figura 30, onde as barras representam os espalhamentos e a linha representa o teor de ar.

Figura 30 – Relação entre o espalhamento estático e dinâmicos com o teor de ar das argamassas com areia padrão, com cinza volante UTL B e C (a), Natural (b), Retida 45 μm (c), Passante 45 μm (d), Retida 45 μm e moída (e), e Moída comercial





Fonte: Autor (2018).

O espalhamento estático apresentou valores muito próximos ou mais elevados que a argamassa de referência com as CV natural (N), passante (P) e moída (M), para todos os teores de substituição, e apenas para os teores de 10 e 20% para a CV moída comercial. Com o uso de areias usuais do mercado, os teores de ar apresentados estão condizentes com os valores esperados para a fração de argamassa do concreto. Os parâmetros para o teor de ar foram tomados pelos resultados obtidos nos estudos desenvolvidos por Weidmann (2008) e Damo (2011). Nestas condições de ensaio, é possível observar que as cinzas volantes com partículas mais grossas apresentam influência parcialmente negativa no espalhamento estático, assim como as CV com as partículas quebradas pelo processo de moagem. Isto pode ser afirmado observando os resultados das argamassas contendo CV passante (P), que apresentaram aumentos de 6, 16, 18 e 7% para as porcentagens de 10, 20, 30 e 35%, respectivamente, em comparação a argamassa referência. Enquanto as argamassas contendo CV moída (M) apresentaram ganhos de 3, 5, 9 e 4% para as porcentagens de 10, 20, 30 e 35%, respectivamente. Também, aquelas contendo CV moída comercial (Mc) apresentaram valores de 2, 9, -3 e -3% para os mesmos teores de substituição ao cimento.

Esta redução nos espalhamentos indica aumento na demanda de água para uma mesma trabalhabilidade, para os ensaios em argamassa.

Para determinar a influência das variáveis investigadas nas propriedades de interesse no estado fresco, foram realizadas análises de variância apresentadas na Tabela 24.

Tabela 24 – ANOVA – Influência da condição e do teor de substituição nas propriedades no estado fresco das argamassas com areia de britagem e areia de cava

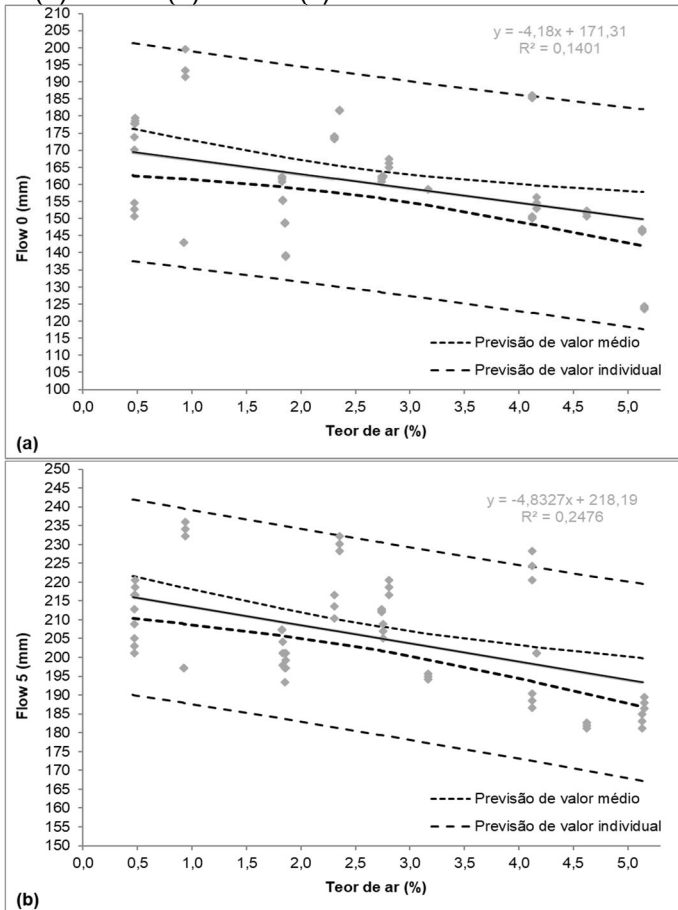
Parâmetro	Fonte	SQ	GL	MQ	F	Probabilidade
Teor de ar	Condição	0,0037	4	0,00093	20,66	≈100,00%
	Teor de substituição (%)	0,0003	3	0,00011	2,38	87,90%
	Erro	0,0005	12	0,00004		
Flow 0	Condição	3250,97	4	812,74	3,92	97,08%
	Teor de substituição (%)	120,28	3	40,09	0,19	10,11%
	Erro	2488,517	12	207,376		
Flow 5	Condição	3173,39	4	793,35	12,76	99,97%
	Teor de substituição (%)	241,46	3	80,49	1,29	67,87%
	Erro	746,379	12	62,198		
Flow 10	Condição	11238,43	4	2809,61	28,87	100,00%
	Teor de substituição (%)	126,78	3	42,26	0,43	26,76%
	Erro	1167,645	12	97,304		

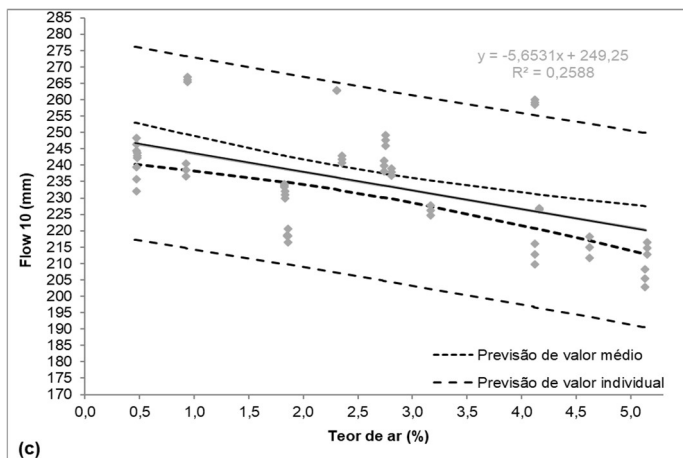
Fonte: Autor (2018).

Com a análise de variância, é possível inferir que a condição das partículas das CV apresentou influência significativa no teor de ar e nos espalhamentos estático e dinâmicos, como observado nos ensaios em argamassa contendo areia padrão. O teor de substituição não apresentou diferença significativa em nenhuma das propriedades investigadas. Porém, como ressaltado anteriormente, quando avaliados individualmente, podem ser observadas reduções nos espalhamentos, assim como aumentos em porcentagens expressivas, considerando as variáveis investigadas. Efeitos de segunda ordem não puderam ser determinados, pois não foram realizadas repetições nestas argamassas.

Como feito para o estudo com argamassas produzidas com areia padrão, foram determinadas correlações entre o teor de ar e os espalhamentos estáticos e dinâmicos. Estas correlações são apresentadas na Figura 31, e seus coeficientes de correlação são mostrados na Tabela 25.

Figura 31 – Areia de cava e de britagem – Correlação entre o teor de ar e (a) *Flow 0* (b) *Flow 5* (c) *Flow 10*





Fonte: Autor (2018).

Tabela 25 – Coeficientes que investigam a correlação entre uma variável dependente e outra independente – Figura 31 (a), (b) e (c)

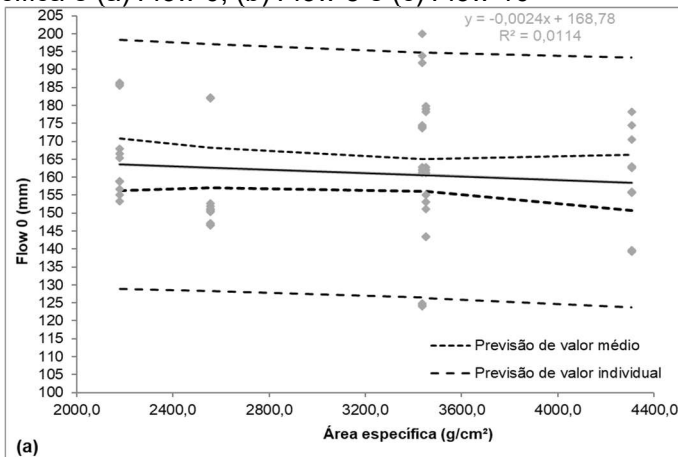
Fatores correlacionados	<i>Person</i>	<i>Student</i>	
	R ²	t (b/Sb) t α/(2(n-2))	
Teor de ar (%) vs Flow 0	0,1401	3,15239	
Teor de ar (%) vs Flow 5	0,2476	4,47980	2,000
Teor de ar (%) vs Flow 10	0,2588	4,61465	

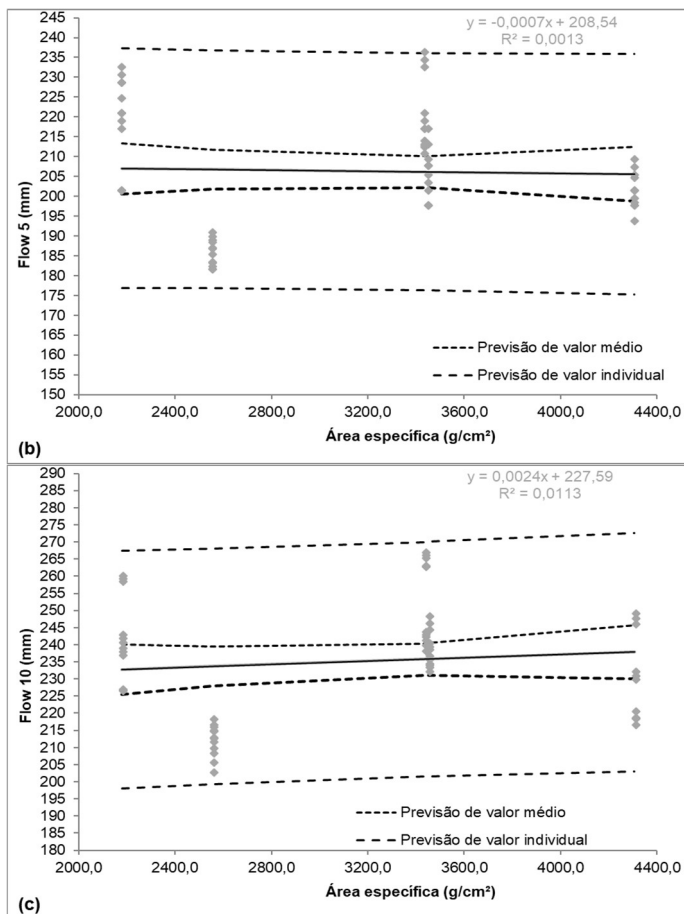
Fonte: Autor (2018).

Para as argamassas produzidas com a combinação de areia de cava e de britagem, o teor de ar apresentou correlações com os espalhamentos estático e dinâmicos. Porém, estas correlações são mais fracas que as apresentadas nos ensaios com areia padrão, pois os valores de t são menores – como pode ser observado comparando as Tabela 19 e Tabela 25. As correlações são significativas, pois, como pode ser observado nas Figura 25 e Figura 31, as reduções nos teores de ar são consideravelmente expressivas. Ainda, os valores de conteúdo de ar apresentados pelas amostras referência com areia padrão (15,5% - Figura 24) e combinação de areia do mercado (3,2% - Figura 30) são muito adversos. O conteúdo de ar apresentado pelas argamassas contendo as areias do mercado é condizente com os valores esperados e apresentados em diferentes pesquisas desenvolvidas no GTec (Grupo de Tecnologia em

Materiais e Componentes à Base de Cimento Portland) da UFSC, por Weidmann (2008) e Damo (2011). Foram utilizados os resultados destas pesquisas como referência, devido ao uso da fração de argamassa do concreto para as avaliações por meio de estudos em argamassa posteriormente relacionados a estudos em concreto. Estas considerações ratificam as inferências expostas anteriormente quanto ao uso de areia padrão para avaliações de MCS. Foram plotadas, ainda, correlações entre os espalhamentos estático e dinâmicos e a área específica, com o intuito de corroborar com a aceitação da hipótese levantada, de que o uso de areia padrão desencadeia outra variável, que pode induzir a conclusões equivocadas quanto ao desempenho de MCS. A Figura 32 apresenta gráficos destas correlações, e a Tabela 26 mostra seus coeficientes de correlação.

Figura 32 – Areia de cava e de britagem – Correlação entre a área específica e (a) *Flow 0*, (b) *Flow 5* e (c) *Flow 10*





Fonte: Autor (2018).

Tabela 26 – Coeficientes que investigam a correlação entre uma variável dependente e outra independente – Figura 32 (a), (b) e (c)

Fatores correlacionados	<i>Person</i>		<i>Student</i>	
	R ²	t (b/Sb)	t $\alpha/(2(n-2))$	
Área específica (g/cm ²) vs Flow 0	0,0114	0,81709		
Área específica (g/cm ²) vs Flow 5	0,0013	0,27100	2,002	
Área específica (g/cm ²) vs Flow 10	0,0113	0,81375		

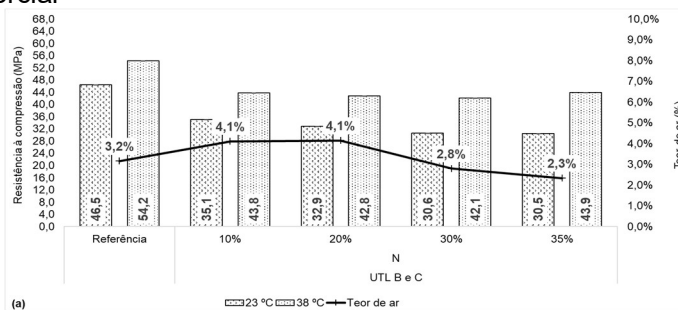
Fonte: Autor (2018).

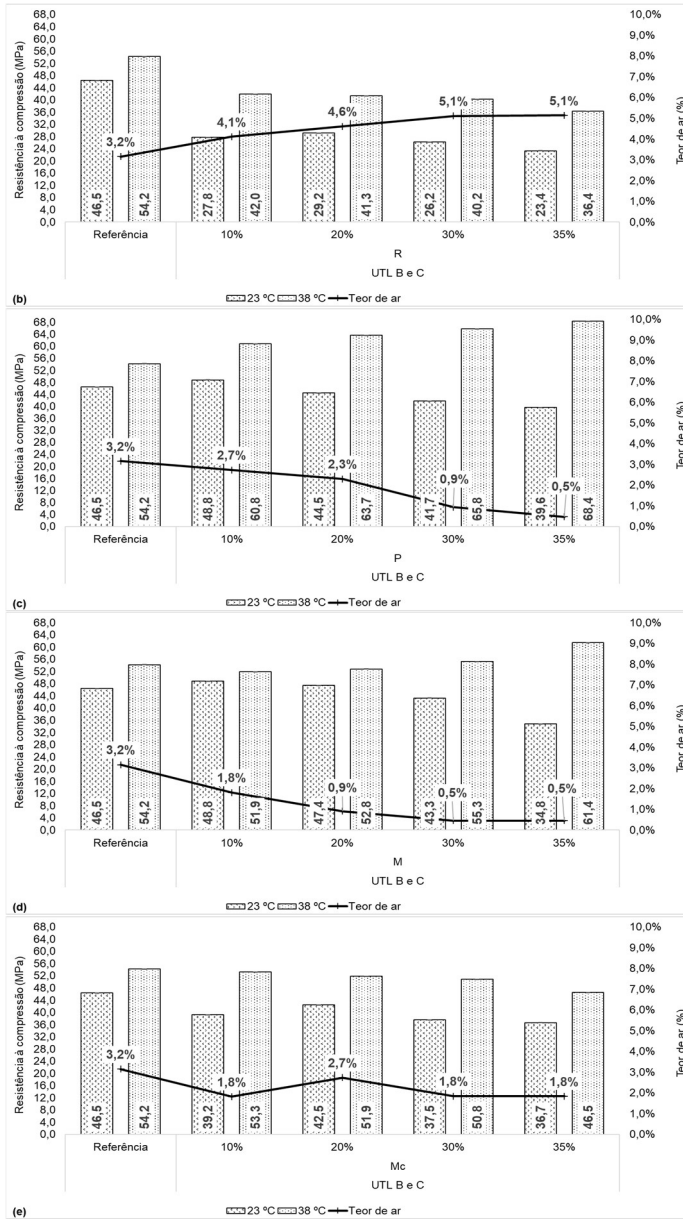
A área específica não mostrou correlações significativas, tanto com o espalhamento estático (*flow 0*) quanto com os espalhamentos dinâmicos (*flow 5* e *flow 10*). Ao contrário dos resultados obtidos no estudo com areia padrão, estes resultados mostram que a hipótese de que o uso de areia padrão não é a melhor escolha para avaliação do comportamento de MCS em substituição ao cimento Portland. Esta consideração é pertinente devido à investigação de cinzas volantes com diferentes condições das partículas e reatividade determinada pelo ensaio de Chapelle modificado – item 4.1.2.

4.2.2.2 Estado endurecido

A Figura 33 mostra os valores médios de resistência à compressão, representados pelas barras, obtidos para as argamassas produzidas com as CV destacadas com a linha pontilhada na Figura 14. Para estes ensaios foram moldados apenas 6 corpos de prova para cada CV, sendo destinados 3 para cada sistema de cura, 23 e 38 °C. Como para os ensaios no estado endurecido com areia padrão, foram aceitos resultados médios de 3 corpos de prova com erro relativo menor que 5%. A Figura 33 mostra, ainda, os valores do teor de ar de cada amostra, representadas pela linha.

Figura 33 – Relação entre a resistência à compressão com cura em 23 °C e 38 °C, com o teor de ar das argamassas com areia padrão com cinza volante UTL B e C (a), natural (b), Retida 45 µm (c), Passante 45 µm (d), Retida 45 µm e moída (e) e Moída comercial





Fonte: Autor (2018).

Com a temperatura de cura de 23 °C, a amostra natural (N) apresentou reduções de resistência, em relação à amostra referência, de 24, 29, 34 e 34%, para os teores de substituição de 10, 20, 30 e 35%, respectivamente. Já com a temperatura de 38 °C ocorreram reduções um pouco menos expressivas – 19, 22, 21, 18%. Com a amostra retida foram obtidas reduções de resistência, em relação à amostra referência, de 40, 37, 44 e 50%, para os teores de substituição de 10, 20, 30 e 35%, respectivamente. Quando esta argamassa é submetida à 38 °C de cura, estas reduções manifestam 22, 24, 26 e 31%. Com a amostra passante ocorreram aumento de 5% e reduções de 4, 10 e 15%, com 23 °C de cura, para as porcentagens de substituição de 10, 20, 30 e 35%, respectivamente. Enquanto para 38 °C foram obtidos incrementos de 12, 16, 22 e 25% para os teores de substituição em ordem crescente. As partículas menores e selecionadas apresentaram maior reatividade que a amostra natural e retida. Isto vai ao encontro com o relatado pelos pesquisadores citados no capítulo 0. Com o intuito de avaliar a possibilidade de um beneficiamento da fração retida, foi feita a moagem desta fração até a finura de Blaine da fração passante. Esta CV apresentou valores, quando comparadas com a amostra contendo somente cimento Portland, de 5, 2, -7 e -25% com 23 °C, e -4, -2, 4 e 14% com 38 °C de temperatura de cura. Foi investigada, ainda, a amostra moída comercial (Mc) beneficiada em escala industrial. Foram obtidos valores de -14, -9, -19 e -21% aos 23 °C e 0, -5, -4 e -14% aos 38 °C.

Os resultados apresentam comportamentos que vão ao encontro com o relatado por outros pesquisadores mencionados no capítulo 0. Quanto mais fina e mais próxima de esférica forem as partículas, mais elevado será seu desempenho, tanto na demanda de água para uma mesma consistência, quanto no desenvolvimento da resistência à compressão.

A Tabela 27 apresenta a ANOVA para determinar a influência da condição das partículas, o teor de substituição do cimento pelas CV individualmente, além do efeito de segunda ordem com a interação destas variáveis.

Tabela 27 – ANOVA – Influência da condição da Usina Termelétrica (UTL) de origem e do teor de substituição nas resistências à compressão com cura a 23 °C e 38 °C das argamassas com areia de britagem e areia de cava

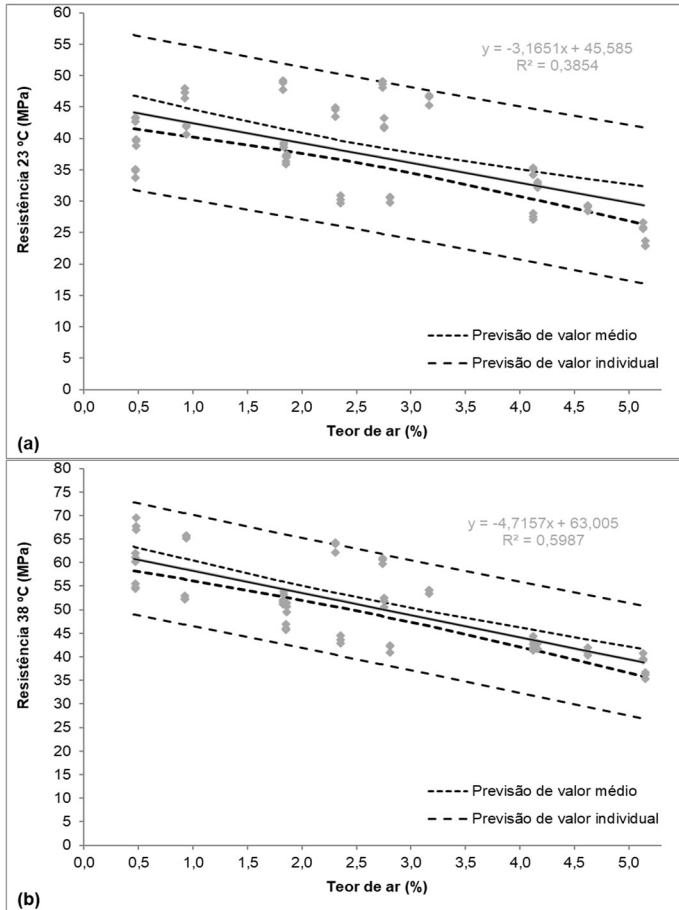
Parâmetro	Fonte	SQ	GL	MQ	F	Probabilidade
Resistência 23 °C	Condição	1364,42	4	341,106	938,421	100,00%
	Teor de substituição (%)	439,86	3	146,62	403,368	100,00%
	Condição vs Teor de substituição (%)	479,25	12	39,9373	109,872	100,00%
	Erro	14,54	40	0,3635	14,54	
Resistência 38 °C	Condição	4672,32	4	1168,08	1773,05	100,00%
	Teor de substituição (%)	8,47	3	2,8224	4,284	98,97%
	Condição vs Teor de substituição (%)	389,43	12	32,4522	49,26	100,00%
	Erro	26,352	40	0,6588		

Fonte: Autor (2018).

É possível perceber que, independente da temperatura de cura, todas as variáveis investigadas apresentam alta influência sobre a resistência à compressão, pois a probabilidade apresenta valores acima de 95%.

Como realizado para o estudo em argamassa utilizando areia padrão, foram estabelecidas correlações entre as resistências nas duas temperaturas de cura e o teor ar como parâmetro fixo. A Figura 34 apresenta a plotagem destas correlações e a Tabela 28 seus coeficientes de correlações.

Figura 34 – Areia de cava e de britagem – Correlação entre o teor de ar e (a) Resistência à compressão 23 °C, e (b) Resistência à compressão 38 °C



Fonte: Autor (2018).

Tabela 28 – Coeficientes que investigam a correlação entre uma variável dependente e outra independente – Figura 34 (a), (b) e (c)

Fatores correlacionados	<i>Person</i>	<i>Student</i>
	R ²	t (b/Sb) t α/(2(n-2))
Teor de ar (%) vs Resistência 23 °C	0,3854	6,18441
Teor de ar (%) vs Resistência 38 °C	0,5987	9,54023

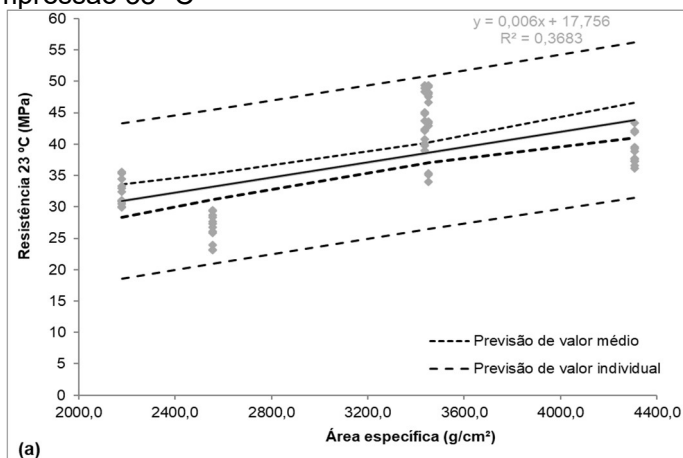
Fonte: Autor (2018).

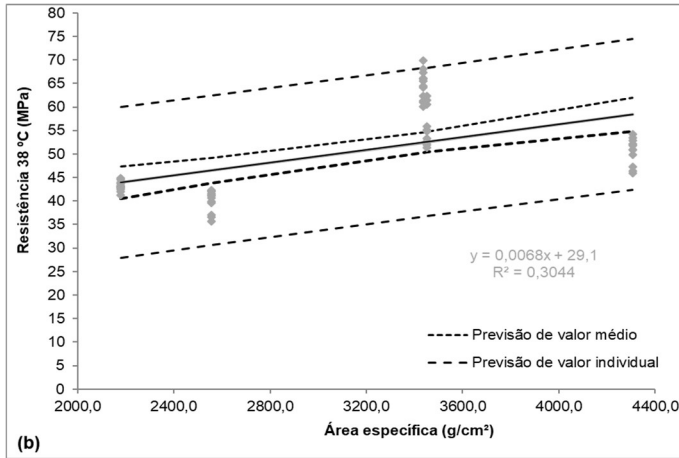
Observando os valores t determinados pela razão entre o coeficiente angular e seu desvio padrão da reta, é possível constatar que há correlações significativas entre o teor de ar e as resistências obtidas nas duas condições de cura. Os valores t obtidos com a combinação de areias do mercado (23 °C – 6,18441; 38 °C – 9,540323) são menores que os apresentados com a areia padrão (23 °C – 10,905; 38 °C – 10,384). Estes valores indicam que há fundamento, em dados experimentais, para a aceitação da hipótese de que a areia padrão gera maior expressividade na influência do conteúdo de ar, devido a sua falta de finos (grãos menores que 0,15 mm). Portanto, a areia padrão estabelecida pela NBR 7214 não é a mais indicada para produção de argamassa destinada à avaliação do desempenho MCS para substituir parcialmente o cimento.

Para contribuir com a possibilidade levantada, foram estabelecidas correlações entre as resistências obtidas com 23 e 38 °C; nesta ocasião, com a área específica de Blaine como parâmetro fixo. A Figura 35 apresenta a plotagem dos dados individuais, assim como a reta média e os intervalos de confiança médio e individual. Os coeficientes de correlação são apresentados na

Tabela 29.

Figura 35 – Areia de cava e de britagem – Correlação entre a área específica e (a) Resistência à compressão 23 °C, e (b) Resistência à compressão 38 °C





Fonte: Autor (2018).

Tabela 29 – Coeficientes que investigam a correlação entre uma variável dependente e outra independente – Figura 35 (a) e (b)

Fatores correlacionados	<i>Person</i>	<i>Student</i>
	R^2	$t (b/Sb) \quad t \alpha/(2(n-2))$
Área específica (g/cm^2) vs Resistência 23 °C	0,3683	5,81451
Área específica (g/cm^2) vs Resistência 38 °C	0,3044	5,03817

Fonte: Autor (2018).

Os valores t obtidos para as correlações entre as resistências nas duas temperaturas e a área específica são maiores que os valores de t_{α} . Logo, há significância entre estas correlações. Este comportamento é semelhante ao observado nas argamassas com areia padrão. Porém, os valores t obtidos, tanto para 23 °C quanto para 38 °C, são semelhantes, enquanto nos ensaios com areia padrão, estes valores são expressivamente distintos, sendo maior para 38 °C do que para 23 °C.

4.3 ESTUDO EM CONCRETO

Nesta etapa do programa experimental foi investigado apenas o comportamento de concretos contendo as CV UTL B e C N e UTL B e C Mc. Para isto, foram produzidas 9 famílias de concreto, uma contendo apenas cimento Portland como aglomerante (Referência), e outras quatro contendo cimento e CV UTL B e C N, com teores de substituição volumétrica de 10, 20,30 e 35%. Além destas, foram produzidas outras quatro contendo cimento e CV UTL B e C Mc com os mesmos teores de substituição, também em volume absoluto. Cada família de concreto é composta por um traço rico, médio rico, médio pobre e pobre de consumo de aglomerante.

Inicialmente foram determinados os teores de argamassa para cada traço de todas as famílias, totalizando 36 determinações dos teores de argamassa ideal. Por conseguinte, foram utilizados os procedimentos experimentais na forma e sequência apresentados no item 3.2.4.

No presente item são apresentados e analisados os resultados referentes ao teor de argamassa, à demanda de água, à perda de abatimento após 15 minutos, à bombeabilidade (cone invertido – Weidmann, 2008) no estado fresco, e às resistências à compressão para as idades de 3, 7, 28, 63, 91, 180 dias, além da evolução do ganho de resistência nestas idades. Os teores de argamassa dos diferentes traços de concreto apresentaram variação em relação aos teores de substituição das duas CV investigadas no estudo em concreto. Estes teores de argamassa foram arredondados com precisão de 0,25%, pois os procedimentos para sua determinação são tecnológicos e não científicos. A demanda de água é referente ao volume de água para obtenção do slump de 140 ± 20 mm após a simulação de transporte. A perda de abatimento remete à redução no valor do slump após a simulação de transporte.

A Tabela 30 apresenta todos os resultados obtidos nos ensaios, nos estados fresco e endurecido, da família de concreto referência.

Tabela 30 – Resultados da avaliação das propriedades no estado fresco e endurecido para a família de concreto referência

Traço		Rico	Médio Rico	Médio Pobre	Pobre
Estado Fresco	α (%)	52,50	53,00	53,50	54,00
	Água/m ³ (kg)	189,1	180,6	179,3	183,0
	Slump final (mm)	120	120	120	130
	Perda Abtim. (mm)	60	40	30	30
	Teor de Ar (%)	4,2	4,1	4,1	3,8
	Cone inv. (s)	2,11	2,02	1,97	1,81
	R3 Média (MPa)	44,3	33,5	27,1	20,4
	CV (%)	2,3	5,0	4,4	4,9
	R7 Média (MPa)	53,2	43,8	38,6	30,9
	CV (%)	4,0	5,0	3,2	4,8
Estado endurecido	R28 Média (MPa)	60,6	52,4	48,6	43,3
	CV (%)	2,4	3,8	2,8	4,8
	R63 Média (MPa)	65,2	60,2	53,0	60,3
	CV (%)	4,6	2,4	3,4	4,3
	R91 Média (MPa)	68,2	63,0	57,6	52,2
	CV (%)	3,9	2,9	3,0	3,4
	R180 Média (MPa)	72,2	68,7	62,3	55,4
	CV (%)	3,7	2,5	3,6	1,3

Fonte: Autor (2018).

Os teores de argamassa ideal não foram fixos para cada família de concreto, como já mencionado no capítulo 3, sendo esta fixação recomendada para o método de dosagem IPT EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992). Para concretos de mesma trabalhabilidade, quanto maior o volume de pasta do traço, menor o seu teor de argamassa ideal. Isto é confirmado por meio dos dados experimentais apresentados neste item. Há, ainda, uma variação na demanda de água em relação ao traço: quanto menor o volume de sólidos na pasta, menor é este valor. Porém, nota-se que esta redução apresenta certo crescimento para o traço pobre. Devido ao volume mais baixo de pasta, ocorre uma pequena alteração no comportamento. Isto decorre em razão da maior quantidade de agregados, o que promove maior atrito entre suas partículas, que não são bem lubrificadas devido ao baixo teor de pasta, necessitando, assim, maior quantidade de água que o traço

médio pobre para o mesmo abatimento. As perdas de abatimento para esta família de concreto apresentaram valores de acordo com os obtidos em concretos produzidos pela indústria de tecnologia de concreto e empresas de serviços de concretagem. Os valores obtidos para teores de ar foram semelhantes aos manifestados nos ensaios de argamassa, estando de acordo com concretos de linha produzidos no mercado atualmente. Os valores do cone invertido foram bastante satisfatórios, considerando que os resultados de Weidmann (2008) ficaram um pouco mais elevados. Contudo, o método foi alterado, como indicado no item 3.2.4.3.

As resistências à compressão mostraram variação de 43,3 a 60,6 MPa aos 28 dias. Considerando o desvio padrão de dosagem estabelecido pela NBR 12655 (ABNT, 2015), pode-se considerar resistências características de 40 a 57 MPa para esta idade, sem considerar extrapolações aos pontos dos extremos das curvas obtidas. Há, também, uma evolução expressiva nas resistências de 28 para 91 e 180 dias. Como uma edificação estará com sua carga total, considerada em projeto, aplicada sobre seus elementos estruturais, em boa parte das situações, próximo ou até mesmo após os 180 dias, esta evolução da resistência poderia ser explorada. Entretanto, estes crescimentos não são considerados nos projetos estruturais.

A Tabela 31 expressa os resultados obtidos para a família de concreto com 10% do volume absoluto de cimento substituído por CV UTL B e C N.

Tabela 31 – Resultados da avaliação das propriedades no estado fresco e endurecido para a família de concreto 10% CV UTL B e C N

Traço		Rico	Médio Rico	Médio Pobre	Pobre	
Estado Fresco	α (%)	52,00	52,50	53,00	53,50	
	Água/m ³ (kg)	188,9	185,0	170,9	174,5	
	Slump final (mm)	140	130	130	120	
	Perda Abtim. (mm)	40	30	30	20	
	Teor de Ar (%)	3,2	3,8	3,3	3,2	
	Cone inv. (s)	2,07	2,16	1,56	1,15	
	R3	Média (MPa)	37,4	28,4	23,6	18,9
CV (%)		4,9	4,8	4,5	5,0	
R7	Média (MPa)	41,5	33,8	29,5	25,0	
	CV (%)	4,7	2,6	3,6	4,2	
Estado endurecido	R28	Média (MPa)	46,0	41,2	35,6	30,9
		CV (%)	4,1	2,6	2,3	3,2
R63	Média (MPa)	56,3	46,4	43,1	37,5	
	CV (%)	3,8	2,8	3,3	3,4	
R91	Média (MPa)	63,5	57,2	52,7	43,0	
	CV (%)	4,1	3,9	4,8	4,6	
R180	Média (MPa)	71,3	63,1	57,3	47,8	
	CV (%)	2,8	2,3	2,9	4,2	

Fonte: Autor (2018).

Os teores de argamassa puderam ser reduzidos em 0,5% para cada traço, quando comparados à família de concreto referência. Isto é atribuído ao aumento de coesão e fluidez à mistura, o que proporciona, ainda, redução na demanda de água não muito expressiva, devido ao baixo teor de substituição ao cimento, e esta CV possui uma área específica moderada (2555 cm²/g). Esta redução vai ao encontro do apresentado no capítulo 0. A indicação do aumento da coesão pode ser reforçada pelo aumento no tempo de escoamento no cone invertido, indicando maior resistência à segregação. O teor de ar apresentou valores um pouco menores que a família de concreto referência. Este comportamento se deve à redução na tendência de floculação. Este efeito é creditado à particularidade das partículas de CV, pois,

suas partículas promovem redução da tendência de floculação das partículas de cimento.

As resistências à compressão mostraram considerável redução, quando comparadas à família de referência, até os 28 dias. Reduções são esperadas para concreto contendo cinza volante. Conforme comentado no capítulo 0, isto se deve a necessidade da liberação do Ca(OH)_2 da hidratação do cimento para hidratação da CV. Esta liberação é muito mais expressiva após os 28 dias. Porém, em idades avançadas, o traço com maior teor de pasta apresenta resistência próxima ao mesmo traço da família referência. Já os demais traços com menor teor de pasta apresentam aumento na taxa de evolução da resistência, porém, em proporção demasiadamente menor. Comportamentos semelhantes foram observados por Lam, Wong e Poon (1998), Tutikian (2007) e Huang *et al.* (2013).

Saha (2018) apresentou resultados recentes de taxa de evolução da resistência à compressão do concreto com teores de 10, 20 30 e 40% de CV substituindo o cimento Portland. Sua cinza volante apresentava propriedades físicas e químicas semelhantes a CV UTL B e C Mc. O autor determinou ainda que aos 180 dias a porosidade do concreto é entorno de 30% menor que aos 28 dias, havendo um comportamento linear para os teores investigados. O autor apresenta resultados tendências semelhantes para a penetração de cloretos. Este comportamento é atribuído a ligação de vazios com solução de poros alcalina possibilitando a reação pozolânica das partículas de CV ainda não hidratadas.

A Tabela 32 apresenta os resultados para a família de concreto contendo 20% CV UTL B e C N.

Tabela 32 – Resultados da avaliação das propriedades no estado fresco e endurecido para a família de concreto 20% CV UTL B e C N

Traço		Rico	Médio Rico	Médio Pobre	Pobre
Estado Fresco	α (%)	51,50	52,00	52,50	53,00
	Água/m ³ (kg)	199,0	182,1	176,3	183,3
	Slump final (mm)	150	140	120	130
	Perda Abtim. (mm)	60	40	20	50
	Teor de Ar (%)	3,2	3,2	3,2	3,2
	Cone inv. (s)	1,78	1,70	1,46	1,30
	R3	Média (MPa)	34,8	26,3	22,2
CV (%)		2,1	2,4	4,8	5,0
R7	Média (MPa)	42,4	36,3	26,4	18,5
	CV (%)	4,8	1,6	2,8	4,9
R28	Média (MPa)	53,1	46,6	33,2	27,5
	CV (%)	5,0	4,2	4,8	2,6
R63	Média (MPa)	59,2	51,5	40,4	36,3
	CV (%)	3,3	5,0	3,7	4,3
R91	Média (MPa)	64,8	61,2	51,1	46,8
	CV (%)	3,7	2,8	4,8	4,9
R180	Média (MPa)	73,1	69,7	59,5	55,9
	CV (%)	3,2	2,8	1,9	2,3

Fonte: Autor (2018).

Com 20% de substituição de CV UTL B e C N, foi possível incrementar certa redução ao teor de argamassa. Porém, para manter o abatimento pelo tronco de cone, ocorreu aumento da demanda de água, com exceção do traço com segundo maior teor de pasta, que apresentou redução em relação ao mesmo traço da família 10% CV natural. A perda de abatimento também manifestou aumento considerável, quando a família 10% de CV natural é tomada como parâmetro. Contudo, quando a família referência é tomada com parâmetro, há redução no traço médio pobre, e aumento no traço pobre enquanto os traços de maior volume de pasta os valores foram iguais. O teor de ar se manteve na grandeza da família 10% CV natural. O tempo de escoamento no cone invertido apresentou redução quando comparado às

demais famílias, exceto para o traço com menor teor de pasta. As resistências à compressão apresentaram reduções em relação à família de concreto referência. Essas reduções foram em grandeza semelhante àquelas obtidas com a família UTL B e C N 10%. Porém, com idades maiores que 63 dias, a taxa de crescimento da resistência foi maior que os concretos com 10% de CV natural. Estes comportamentos no estado fresco são conferidos ao teor de cinza volante. Neste volume de substituição ocorreram reduções nas propriedades, tanto no estado fresco quanto endurecido, que podem ser observadas nos estudos em concreto e em argamassa.

Os resultados das investigações das propriedades no estado fresco e endurecido para a família de concreto UTL B e C N 30% são apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 – Resultados da avaliação das propriedades no estado fresco e endurecido para a família de concreto 30% CV UTL B e C N

Traço		Rico	Médio Rico	Médio Pobre	Pobre	
Estado Fresco	α (%)	51,00	51,50	52,00	52,50	
	Água/m ³ (kg)	192,8	184,7	177,7	181,1	
	Slump final (mm)	130	130	120	130	
	Perda Abtim. (mm)	60	30	60	20	
	Teor de Ar (%)	3,1	3,2	3,1	3,2	
	Cone inv. (s)	1,59	1,76	1,49	1,49	
	R3	Média (MPa)	28,3	22,7	18,3	12,9
		CV (%)	4,9	4,5	2,8	4,8
	R7	Média (MPa)	38,4	30,6	24,1	16,7
		CV (%)	3,0	2,1	1,9	3,2
Estado endurecido	R28	Média (MPa)	47,7	40,3	33,5	23,8
		CV (%)	4,5	1,2	4,6	1,5
	R63	Média (MPa)	59,0	52,3	40,5	33,3
		CV (%)	1,4	4,8	3,2	2,1
	R91	Média (MPa)	73,3	61,4	52,2	45,7
		CV (%)	2,9	3,4	4,3	5,0
	R180	Média (MPa)	85,3	73,5	70,2	56,6
		CV (%)	2,3	1,4	1,6	5,0

Fonte: Autor (2018).

O teor de argamassa pode ser reduzido na mesma proporção que vem sendo apresentada, à medida que o teor de CV aumenta. Este efeito, como já ressaltado, é atribuído à redução na tendência natural de floculação das partículas de cimento, necessitando de menor teor de argamassa para a mesma trabalhabilidade. A demanda de água apresentou certa redução em relação à família de concreto UTL B e C 20%, porém, ainda mais elevada que as famílias referência e UTL B e C 10%. Este aumento na demanda de água pode ser em razão do teor de incombusto. Essas partículas de carvão mal queimadas podem ter mostrado preferência em adsorver o aditivo, reduzindo seu efeito. Efeito semelhante foi observado para a CV UTL A N nos estudos em argamassa. A perda de abatimento manifestou aumento próximo aos apresentados pelas famílias de concreto analisadas até o momento, com exceção do traço com o segundo menor teor de pasta, que apresentou a maior perda de abatimento. Este comportamento tem relação direta com a demanda de água. O teor de ar manteve a grandeza que as demais famílias de concreto já analisadas contendo esta CV. Os tempos de cone invertido mostraram redução, quando comparados a estes traços das famílias analisadas anteriormente para os dois traços com maior teor de pasta. Contudo, os dois traços de menor teor de pasta apresentaram aumento pouco expressivo em relação à família contendo 20% de CV natural. Tempos menores exigem menos esforços dos equipamentos de bombeamento do concreto. Logo, quanto mais elevado o teor de CV em substituição ao cimento, até este teor, menor desgaste ocorrerá aos equipamentos que bombeiam estes concretos.

A resistência à compressão apresenta redução, de acordo com a tendência já observada, até a idade de 63 dias. Após esta idade ocorre considerável aumento na taxa de crescimento da resistência. Este efeito é mais expressivo com teores de pasta mais elevados.

A Tabela 34 é composta dos valores obtidos para a família UTL B e C N 35%, na investigação de suas propriedades no estado fresco e endurecido.

Tabela 34 – Resultados da avaliação das propriedades no estado fresco e endurecido para a família de concreto 35% CV UTL B e C N

Traço		Rico	Médio Rico	Médio Pobre	Pobre	
Estado Fresco	α (%)	50,75	51,25	51,75	52,25	
	Água/m ³ (kg)	196,4	184,3	182,5	178,3	
	Slump final (mm)	140	120	120	140	
	Perda Abtim. (mm)	70	50	50	50	
	Teor de Ar (%)	3,2	3,2	3,2	3,2	
	Cone inv. (s)	1,79	1,92	1,42	1,42	
Estado endurecido	R3	Média (MPa)	29,1	20,5	12,9	10,3
		CV (%)	1,5	3,4	4,9	5,0
	R7	Média (MPa)	39,9	29,0	21,1	14,7
		CV (%)	4,9	4,0	4,8	4,4
	R28	Média (MPa)	48,2	34,3	30,1	23,5
		CV (%)	4,1	4,0	4,6	4,3
	R63	Média (MPa)	54,6	50,9	42,5	33,2
		CV (%)	3,5	1,0	3,2	4,1
	R91	Média (MPa)	60,6	57,2	50,5	38,5
		CV (%)	3,6	4,1	2,5	3,5
	R180	Média (MPa)	82,7	71,8	67,0	60,2
		CV (%)	1,5	2,1	1,6	4,1

Fonte: Autor (2018).

O teor de argamassa manteve a tendência de redução destacada até o momento, quanto mais elevado o teor de CV, menor o teor de argamassa necessário. Quanto à demanda de água para o traço com maior teor de pasta, ocorreu aumento em relação ao mesmo traço das famílias referência, CV 10% e CV 30% natural. Ainda houve redução em relação ao mesmo traço da família CV 20% natural. A perda de abatimento apresentou aumento em relação às demais famílias anteriormente analisadas. O conteúdo de ar manteve teores semelhantes aos apresentados para as famílias de concreto contendo CV natural, e menor que a família referência. A taxa de evolução da resistência para esta família de concreto é maior que as apresentadas pelas famílias referência, UTL B e C N 10% e UTL B e C N 20%, e menor que a

da família UTL B e C N 30%. O teor de 30% pode ser apontado como o ideal para emprego em concretos.

A Tabela 35 mostra os resultados para a família de concretos com 10% de CV UTL B e C Mc. Esta é a primeira família de concreto da outra CV investigada nos estudos em concreto a ser analisada.

Tabela 35 – Resultados da avaliação das propriedades no estado fresco e endurecido para a família de concreto 10% CV UTL B e C Mc

Traço		Rico	Médio Rico	Médio Pobre	Pobre	
Estado Fresco	α (%)	52,00	52,50	53,00	53,50	
	Água/m ³ (kg)	177,9	164,6	162,7	171,5	
	Slump final (mm)	130	130	140	120	
	Perda Abtim. (mm)	30	50	50	20	
	Teor de Ar (%)	2,4	2,4	2,3	2,3	
	Cone inv. (s)	2,03	1,62	1,47	1,31	
	Estado endurecido	R3	Média (MPa)	35,7	28,6	26,5
CV (%)			5,0	4,9	2,4	4,9
R7		Média (MPa)	42,4	37,7	32,2	24,6
		CV (%)	2,4	3,0	3,0	4,8
R28		Média (MPa)	55,1	46,5	41,9	34,8
		CV (%)	3,2	4,1	4,9	3,0
R63		Média (MPa)	65,2	54,4	51,2	40,3
		CV (%)	3,4	5,0	2,7	1,4
R91		Média (MPa)	78,3	66,4	58,5	48,1
		CV (%)	2,8	2,0	2,4	3,1
R180		Média (MPa)	88,1	79,5	69,4	56,8
		CV (%)	1,8	0,6	1,5	3,7

Fonte: Autor (2018).

Quanto ao teor de argamassa, são observadas reduções em relação ao concreto referência de mesma ordem apresentada pela família UTL B e C N 10%. Isto mostra que esta propriedade não tem sensibilidade para ser influenciada pela diferença das características das partículas moídas. O teor de ar apresentou redução, quando comparado às famílias de concreto referência, e

contendo CV UTL B e C N. Este efeito pode ser associado ao beneficiamento da CV Mc. A perda de abatimento manteve valores próximos aos anteriormente observados; porém, com grande redução no traço com maior teor de pasta. A demanda de água apresentou redução em relação às famílias referência, e contendo CV UTL B e C N, o que corrobora com a hipótese de que o beneficiamento potencializou a contribuição da CV para o concreto. Em relação à resistência à compressão, aos 28 dias foram obtidas resistências de 80 a 90% daquelas apresentadas pelos concretos da família referência. Isto mostra que o beneficiamento contribui para a aceleração do crescimento da taxa de evolução da resistência à compressão, pois este crescimento é o maior para as famílias de concreto analisadas. Isto tem relação com a capacidade da CV em fixar o Ca(OH)_2 , determinado no ensaio de Chapelle modificado. Enquanto a CV UTL B e C N apresentou 452,27 $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ de pozolana a UTL B e C Mc apresentou 620,43 $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ de pozolana (Tabela 14). Com isso, pode-se perceber que o ensaio de Chapelle modificado pode ser utilizado com um indicador com expressiva precisão para determinar a pozolanicidade de um MCS. Ainda, pode-se perceber que o parâmetro de 435,6 $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ de pozolana, proposto por Raverdy *et al.* (1980) e utilizado pela NBR 15895 (ABNT, 2010), não permite estimar em quanto tempo o MCS começará a ter reações significativas de hidratação. Em idades mais avançadas, esta relação apresenta considerável crescimento, mostrando que, quando o cimento reduz, a cinza volante aumenta a taxa de hidratação.

A Tabela 36 apresenta os resultados para a família de concreto contendo 20% de CV Mc em substituição ao cimento.

Tabela 36 – Resultados da avaliação das propriedades no estado fresco e endurecido para a família de concreto 20% CV UTL B e C Mc

Traço		Rico	Médio Rico	Médio Pobre	Pobre
Estado Fresco	α (%)	51,50	52,00	52,50	53,00
	Água/m ³ (kg)	179,2	153,5	150,4	164,8
	Slump final (mm)	160	140	130	140
	Perda Abtim. (mm)	50	60	50	50
	Teor de Ar (%)	2,2	2,2	2,3	2,3
	Cone inv. (s)	1,96	1,40	1,18	1,53
	R3	Média (MPa)	34,5	28,8	25,2
	CV (%)	1,9	3,9	1,4	4,9
R7	Média (MPa)	41,4	35,7	30,2	22,4
	CV (%)	5,0	3,8	5,0	4,8
R28	Média (MPa)	52,4	48,6	42,6	36,2
	CV (%)	5,0	3,8	4,2	1,5
R63	Média (MPa)	67,2	60,9	53,1	42,9
	CV (%)	1,4	3,6	4,0	2,7
R91	Média (MPa)	80,0	77,5	65,9	51,4
	CV (%)	2,1	1,7	4,0	2,3
R180	Média (MPa)	94,8	87,5	81,7	61,4
	CV (%)	1,6	1,2	3,3	1,5

Fonte: Autor (2018).

O teor de argamassa manteve a redução ressaltada anteriormente. A demanda de água, comparada às famílias referência e contendo CV natural é menor para todos os traços. Porém, em relação à família UTL B e C Mc 10%, o traço com maior teor de pasta apresentou valor um pouco mais alto, mantendo a redução para os demais. Para o teor de ar foram expressos valores próximos aos da família UTL B e C Mc 10%, e menores que aqueles das famílias referência e contendo CV natural. Os tempos de cone invertido apresentam redução em relação à família UTL B e C Mc 10%, que já apresenta valores menores que as demais famílias analisadas anteriormente. Estes pontos ressaltados mostram que há benefícios no estado fresco com o uso deste teor de CV Mc.

Em relação ao estado endurecido, as resistências apresentaram valores próximos aos obtidos com os traços da família contendo 10% de CV Mc. Houve crescimento no traço com menor teor de pasta, e redução no traço com maior teor de pasta. Em relação à família referência, foram obtidos crescimentos um pouco menores que a família com 10% Mc; porém, maiores que as famílias contendo CV UTC B e C N.

A Tabela 37 apresenta os resultados da família contendo CV UTL B e C 30%.

Tabela 37 – Resultados da avaliação das propriedades no estado fresco e endurecido para a família de concreto CV UTL B e C Mc 30%

Traço		Rico	Médio Rico	Médio Pobre	Pobre	
Estado fresco	α (%)	51,00	51,50	52,00	52,50	
	Água/m ³ (kg)	177,9	160,5	156,9	172,0	
	Slump final (mm)	120	140	130	160	
	Perda Abtim. (mm)	50	50	50	20	
	Teor de Ar (%)	1,5	2,1	2,3	1,3	
	Cone inv. (s)	1,53	1,58	1,81	1,91	
	R3	Média (MPa)	33,0	23,2	17,8	8,7
		CV (%)	3,2	4,5	4,7	3,5
R7	Média (MPa)	37,3	30,9	27,0	15,2	
	CV (%)	5,0	4,8	2,9	1,6	
R28	Média (MPa)	51,9	44,3	37,4	24,7	
	CV (%)	3,3	2,5	3,9	4,4	
R63	Média (MPa)	62,1	55,2	51,6	35,0	
	CV (%)	4,7	3,2	2,9	2,7	
R91	Média (MPa)	75,3	67,6	60,4	45,2	
	CV (%)	2,4	3,7	1,0	3,9	
R180	Média (MPa)	88,8	78,2	71,1	53,7	
	CV (%)	2,5	5,0	2,3	4,4	

Fonte: Autor (2018).

O teor de argamassa manteve o comportamento apresentado pelas famílias contendo CV natural. A demanda de água mostrou-se menor que a família referência e as famílias

contendo CV natural. Contudo, comparado à demanda apresentada pela família contendo 20% CV Mc, o traço com maior teor de pasta apresentou redução, enquanto os demais apresentaram aumento na demanda de água. A perda de abatimento manteve valores próximos aos apresentados pelas demais famílias contendo CV Mc. O traço com menor teor de pasta apresentou perda de abatimento menor que todas as demais famílias, sendo igual ao valor apresentado pelas famílias contendo 10 e 30%CV natural. Em relação ao teor de ar foram obtidos valores com redução expressiva para os traços de maior e de menor volume de pasta. Os traços com teores médios de pasta mantiveram teores de ar semelhantes aos das famílias contendo CV Mc. Tomando a família CV Mc 20% com parâmetro, a capacidade de passagem pelo cone invertido apresentou redução apenas para o traço com maior volume de pasta. Os demais apresentaram aumento nesta propriedade.

Analisando a resistência à compressão, observa-se que a taxa de crescimento apresentou redução em relação à família contendo 20% de CV Mc.

A Tabela 38 apresenta os resultados da família contendo CV UTL B e C 35%.

Tabela 38 – Resultados da avaliação das propriedades no estado fresco e endurecido para a família de concreto 35% CV UTL B e C Mc

Traço		Rico	Médio Rico	Médio Pobre	Pobre	
Estado Fresco	α (%)	50,75	51,25	51,75	52,25	
	Água/m ³ (kg)	193,3	190,3	179,3	190,2	
	Slump final (mm)	160	130	130	140	
	Perda Abtim. (mm)	40	30	40	50	
	Teor de Ar (%)	2,1	2,1	2,0	2,0	
	Cone inv. (s)	1,65	2,25	1,58	1,62	
	Estado endurecido	R3	Média (MPa)	32,0	24,6	19,3
CV (%)			3,2	3,9	4,9	4,7
R7		Média (MPa)	36,9	27,6	23,4	17,8
		CV (%)	3,9	4,3	4,4	4,0
R28		Média (MPa)	50,0	43,2	36,0	27,6
		CV (%)	4,8	3,6	5,0	3,3
R63		Média (MPa)	63,8	53,5	48,3	36,7
		CV (%)	4,9	2,1	4,0	4,1
R91		Média (MPa)	76,0	61,7	56,2	42,5
		CV (%)	2,9	3,0	2,4	3,7
R180		Média (MPa)	89,5	70,9	65,8	49,0
		CV (%)	2,1	2,9	1,6	2,8

Fonte: Autor (2018).

Para a família de concreto contendo 35% de CV Mc, o teor de argamassa pode ser reduzido em 0,25% em relação à família contendo 30% de CV Mc. Este valor utilizado foi o mesmo teor utilizado para a família 35% CV N. Em relação à demanda de água, os valores foram maiores para demais famílias contendo CV Mc, e maiores que os apresentados pela família referência. Isto mostra que, nesta quantidade, para famílias de concreto com as características apresentadas no item 3.2.4, este teor de CV apresenta expressivo aumento na demanda de água. A perda de abatimento apresentou redução para todos os traços, com exceção do que possui menor teor de pasta. Para bombeabilidade, foram obtidos valores mais altos que a família anteriormente analisada; porém, menores que a família referência.

Quanto à resistência à compressão foram obtidos valores entre 64 e 83% em relação à família referência aos 28 dias. Chegando aos 180 dias, há valores de 88% para o traço com menor teor de pasta, e crescimentos de 3 a 15% para os demais traços.

Com o objetivo de verificar a influência da família de concreto, da idade de determinação da resistência e do traço, foi realizado um teste de ANOVA por meio de um projeto fatorial, investigando efeitos individuais, de segunda e terceira ordem.

A Tabela 39 apresenta os valores médios da razão entre a resistência obtida em cada família de concreto e a família referência. A Tabela 40 apresenta o quadro de ANOVA para os dados individuais, que proporcionaram as médias apresentadas na Tabela 39.

Tabela 39 – Razão entre as resistências de cada família de concreto e a família referência

Traço	Família	R3	R7	R28	R63	R91	R180		
Rico	Referência	1	1	1	1	1	1		
	UTL B e	10%	0,84	0,78	0,76	0,86	0,93	0,99	
		20%	0,79	0,8	0,88	0,91	0,95	1,01	
		C N	30%	0,64	0,72	0,79	0,9	1,07	1,18
		35%	0,66	0,75	0,8	0,84	0,89	1,15	
	UTL B e	10%	0,81	0,8	0,91	1	1,15	1,22	
		C Mc	20%	0,78	0,78	0,86	1,03	1,17	1,31
		30%	0,74	0,7	0,86	0,95	1,1	1,23	
		35%	0,72	0,69	0,83	0,98	1,11	1,24	
	Médio Rico	Referência	1	1	1	1	1	1	
		UTL B e	10%	1,15	0,77	0,79	0,77	0,91	0,92
			20%	0,79	0,83	0,89	0,86	0,97	1,01
C N			30%	0,68	0,7	0,77	0,87	0,97	1,07
35%			0,61	0,66	0,65	0,85	0,91	1,05	
UTL B e		10%	0,85	0,86	0,89	0,9	1,05	1,16	
		C Mc	20%	0,86	0,82	0,93	1,01	1,23	1,27
		30%	0,69	0,71	0,85	0,92	1,07	1,14	
		35%	0,73	0,63	0,82	0,89	0,98	1,03	

Continua na próxima página.

Continuação da página anterior.

Traço	Família	R3	R7	R28	R63	R91	R180	
	Referência	1	1	1	1	1	1	
Médio Pobre	10%	0,87	0,76	0,73	0,81	0,91	0,92	
	UTL B e	20%	0,82	0,68	0,68	0,76	0,89	0,96
	C N	30%	0,68	0,62	0,69	0,76	0,91	1,13
		35%	0,48	0,55	0,62	0,8	0,88	1,08
		10%	0,98	0,83	0,86	0,97	1,02	1,11
	UTL B e	20%	0,93	0,78	0,88	1	1,14	1,31
	C Mc	30%	0,66	0,7	0,77	0,97	1,05	1,14
		35%	0,71	0,61	0,74	0,91	0,98	1,06
		Referência	1	1	1	1	1	1
Pobre	10%	0,70	0,81	0,71	0,62	0,82	0,86	
	UTL B e	20%	0,55	0,6	0,64	0,60	0,90	1,01
	C N	30%	0,48	0,54	0,55	0,55	0,88	1,02
		35%	0,38	0,48	0,54	0,55	0,74	1,09
		10%	0,69	0,80	0,80	0,67	0,92	1,03
	UTL B e	20%	0,65	0,72	0,84	0,71	0,98	1,11
	C Mc	30%	0,32	0,49	0,57	0,58	0,87	0,97
		35%	0,54	0,58	0,64	0,61	0,81	0,88

Fonte: Autor (2018).

Tabela 40 – ANOVA – Influência do traço, da família e idade na razão entre a resistência de cada família e a família referência

Parâmetro	Fonte	SQ	GL	MQ	F	Probabilidade
Razão entre a resistência de cada família e a família referência	Traço	1,58	3	0,53	59,61	100,00%
	Família	3,87	8	0,48	54,79	100,00%
	Idade	9,23	5	1,84	208,76	100,00%
	Traço vs Família	0,68	24	0,03	3,22	100,00%
	Idade vs Família	2,76	40	0,071	7,81	100,00%
	Traço vs idade	0,30	40	0,01	0,84	24,59%
	Traço vs Família vs Idade	0,66	120	0,01	0,62	0,10%
	Erro	4,163	471	0,01	4,16	

Fonte: Autor (2018).

Na razão entre a resistência de cada família e a família referência, os fatores de maior influência são o traço, a família de concreto, a idade – efeitos individuais e o efeito de segunda ordem traço versus família. Os demais efeitos de segunda ordem e o efeito de terceira ordem não apresentaram influência significativa, pois o valor da probabilidade é menor que 95%, com 5% de significância.

4.3.1 Diagramas de dosagem

Utilizar diagramas de dosagem possibilita a obtenção de traços de concreto de forma rápida e confiável. Porém, devem ser considerados os intervalos utilizados para as variáveis tecnológicas do concreto empregadas na construção dos diagramas, logo, extrapolações não são indicadas. Também deve ser utilizado o mesmo conjunto de materiais empregado nos experimentos que forneceram os resultados utilizados para determinação dos diagramas. Caso haja alteração dos materiais, devem ser feitos ajustes por meio de avaliações experimentais.

Com os estudos experimentais desenvolvidos foi possível observar que o teor de argamassa (α) pode ser reduzido em função do aumento do teor de pasta do traço. Assim, pode ser revisada a consideração feita no método de dosagem IPT EPUSP, de que o teor de argamassa deve ser fixo para todos os traços da família de concreto, tornando possível certa economia em traços mais ricos. Além disto, também é possível alcançar melhores condições de controle da trabalhabilidade em traços mais pobres. Foram feitas alterações no diagrama construído, possibilitando a apresentação de mais informações de outras propriedades tecnológicas da família de concreto. Estas modificações foram baseadas nos diagramas já apresentados em pesquisas publicadas, como as de Baggio (2000), Assunção (2002) e Tutikian (2004; 2007), além de considerações próprias quando as informações que compõem os diagramas de dosagem. Com a configuração apresentada nesta dissertação, é possível obter traços de concreto considerando a resistência média de dosagem em função da relação água/aglomerante (a/ag) – como nas demais configurações – no primeiro quadrante. No segundo quadrante (abaixo do primeiro) está representada a correlação entre o a/ag e a relação materiais secos/aglomerante (m) – como nas demais

configurações. Porém, neste quadrante, a equação proposta por Lyse em 1932 não apresentou melhor previsão de comportamento por uma equação linear, mas com uma equação logarítmica. Isto é atribuído ao uso de aditivos à base de policarboxilatos. Neste quadrante ainda é apresentada a curva que relaciona o teor de argamassa (α) e a relação materiais secos/aglomerante (m). A primeira vez que o teor de argamassa apareceu em um diagrama de dosagem foi apresentado por Tutikian (2007), entretanto, nesta pesquisa considerou-se mais apropriado mudar sua posição no diagrama. Esta relação entre o consumo de cimento e o teor de argamassa é de relevância expressiva, pois com o ajuste proposto, de que o teor de argamassa pode ser reduzido com o aumento do volume de pasta, sua apresentação no diagrama de resposta é pertinente. No terceiro quadrante são apresentadas a curva proposta por Prizskulnik e Kirilos (Molinari), e a curva que relaciona o m e o custo de um metro cúbico de concreto. Esta curva é apresentada por Tutikian (2007). No quarto quadrante são representadas a curva que relaciona o consumo de cimento e a resistência média. A configuração proposta para os diagramas de dosagem deve ser utilizada no sentido horário, partindo da resistência à compressão média de dosagem e seguindo paralelamente ao eixo das abcissas no primeiro quadrante, ao encontro da curva da idade em que se deseja a resistência. Em seguida, deve-se descer paralelamente ao eixo das ordenadas, ao eixo contendo a relação água/aglomerante. Continua-se para o segundo quadrante, determinando a relação materiais secos/aglomerante, retornando para curva do teor de argamassa e descendo para o segundo eixo das abcissas, paralelamente ao eixo das ordenadas, para determinar seu valor. A curva de custo é utilizada apenas como informação, não podendo ser utilizada como ponto determinante para passagem para o próximo quadrante. Em seguida, determina-se o consumo de aglomerante equivalente. Chegando ao quarto e último quadrante, determina-se o rendimento de resistência por kg de cimento equivalente.

Caso haja interesse, o diagrama pode ser utilizado no sentido anti-horário; desta vez, partindo do consumo de cimento até a determinação da resistência média de dosagem.

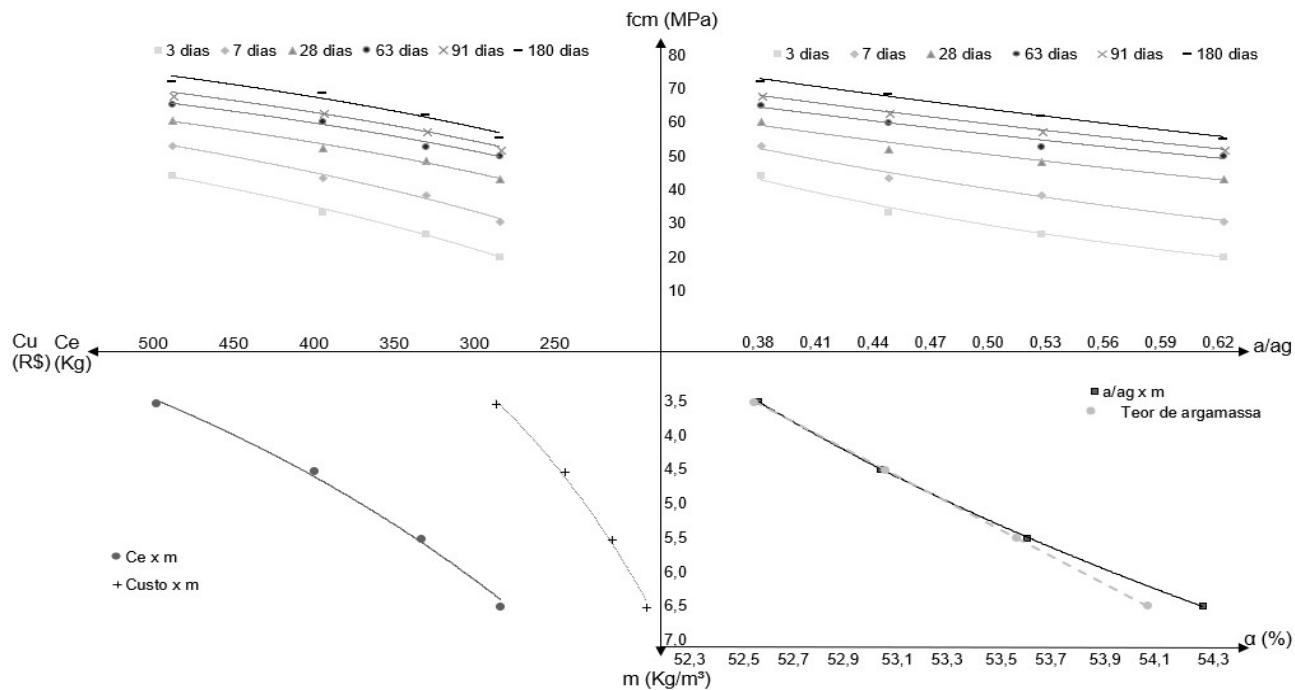
Posteriormente, são mostradas as tabelas contendo as equações apresentadas nos diagramas ilustrados nas figuras que seguem cada uma das tabelas para as 9 famílias de concreto investigadas nesta pesquisa.

Tabela 41 – Equações de comportamento e R² – Família de concreto referência

Quadrante	Propriedade	Equação de comportamento	R ²
I	Lei de Abrams	3 dias $f_{cm} = \frac{142,39}{23,199^{a/ag}}$	0,991
		7 dias $f_{cm} = \frac{119,458}{8,767^{a/ag}}$	0,990
		28 dias $f_{cm} = \frac{98,08}{3,776^{a/ag}}$	0,970
		63 dias $f_{cm} = \frac{98,438}{3,032^{a/ag}}$	0,956
		91 dias $f_{cm} = \frac{103,443}{3,013^{a/ag}}$	0,999
		180 dias $f_{cm} = \frac{111,641}{3,049^{a/ag}}$	0,992
II	Lei de Lyse	$m = 9,396 + 6,0973 * \ln a/ag$	1,000
II	Teor de argamassa (α)	$\alpha = 50,75 + 0,50 * m$	1,000
III	Lei de Priszkulnik e Kirilos (Molinari)	$Ce = \frac{1000}{0,397 + 0,463 * m}$	0,999
III	Custo	$Cu = \frac{441,211}{1,124^m}$	0,990
IV	Rendimento de resistência por kg de cimento (MPa x kg Ce)	3 dias $f_{cm} = -236,51 + 45,167 * \ln Ce$	0,996
		7 dias $f_{cm} = -202,76 + 41,215 * \ln Ce$	0,992
		28 dias $f_{cm} = -139,27 + 32,127 * \ln Ce$	0,989
		63 dias $f_{cm} = -120,54 + 29,967 * \ln Ce$	0,982
		91 dias $f_{cm} = -120,68 + 30,514 * \ln Ce$	0,992
		180 dias $f_{cm} = -125,55 + 32,077 * \ln Ce$	0,955

Fonte: Autor (2018).

Figura 36 – Diagrama de dosagem – Família de concreto referência



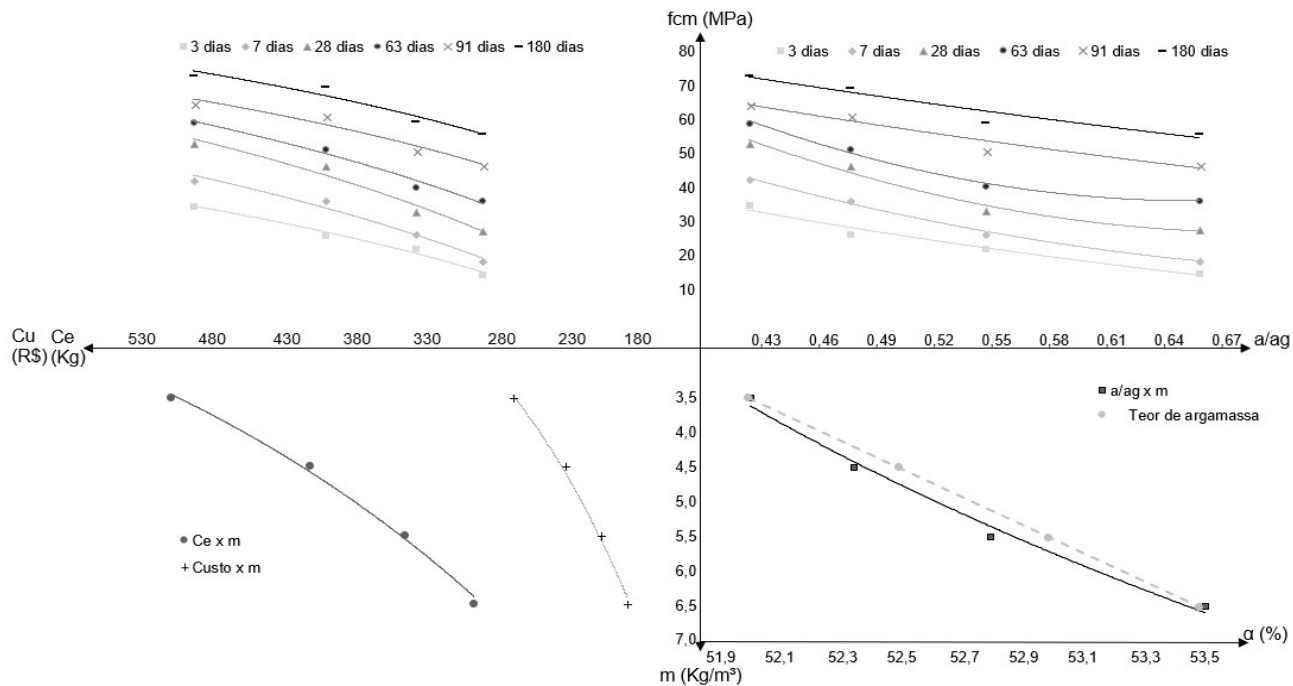
Fonte: Autor (2018).

Tabela 42 – Equações de comportamento e R² – Família de concreto 10% CV UTL B e C N

Quadrante	Propriedade	Equação de comportamento	R ²	
I	Lei de Abrams	3 dias	$f_{cm} = \frac{125,587}{23,538^{a/ag}}$	0,987
		7 dias	$f_{cm} = \frac{101,951}{10,425^{a/ag}}$	0,988
		28 dias	$f_{cm} = \frac{96,70}{6,581}$	0,978
		63 dias	$f_{cm} = \frac{113,116}{6,325^{a/ag}}$	0,982
		91 dias	$f_{cm} = \frac{130,706}{6,047^{a/ag}}$	0,983
		180 dias	$f_{cm} = \frac{148,354}{6,369^{a/ag}}$	0,995
II	Lei de Lyse	$m = 9,9435 + 6,9193 * \ln a/ag$	0,985	
II	Teor de argamassa (α)	$\alpha = 50,75 + 0,50 * m$	1,000	
III	Lei de Priszkulnik e Kirilos (Molinari)	$Ce = \frac{1000}{0,397 + 0,463 * m}$	0,999	
III	Custo	$Cu = \frac{415,66}{1,121^m}$	0,989	
IV	Rendimento de resistência por kg de cimento (MPa x kg Ce)	3 dias	$f_{cm} = -193,17 + 36,724 * \ln Ce$	0,986
		7 dias	$f_{cm} = -242,86 + 46,183 * \ln Ce$	0,978
		28 dias	$f_{cm} = -264,42 + 51,374 * \ln Ce$	0,969
		63 dias	$f_{cm} = -224,64 + 45,798 * \ln Ce$	0,981
		91 dias	$f_{cm} = -159,34 + 36,323 * \ln Ce$	0,951
		180 dias	$f_{cm} = -143,41 + 35,08 * \ln Ce$	0,946

Fonte: Autor (2018).

Figura 37 – Diagrama de dosagem – Família de concreto 10% CV UTL B e C N



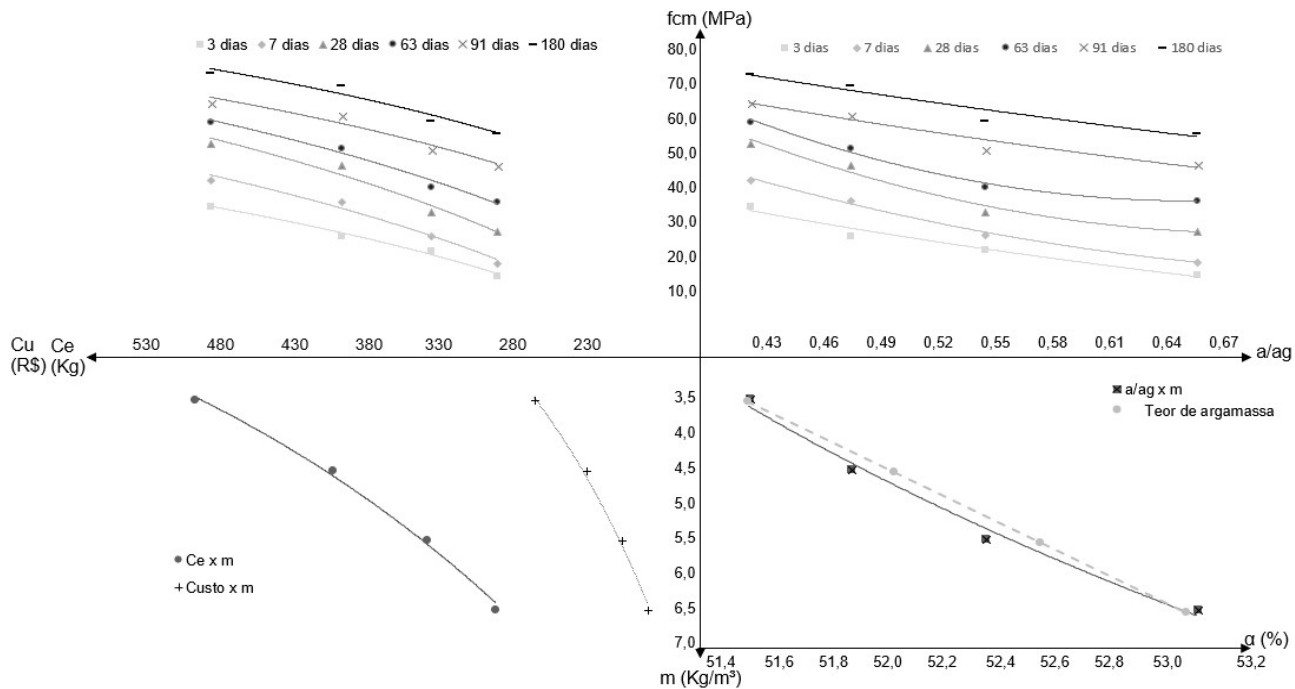
Fonte: Autor (2018).

Tabela 43 – Equações de comportamento e R² – Família de concreto 20% CV UTL B e C N

Quadrante	Propriedade	Equação de comportamento	R ²	
I	Lei de Abrams	3 dias	$f_{cm} = \frac{147,314}{33,495^{a/ag}}$	0,987
		7 dias	$f_{cm} = \frac{196,153}{37,366^{a/ag}}$	0,995
		28 dias	$f_{cm} = \frac{179,444}{18,644^{a/ag}}$	0,957
		63 dias	$f_{cm} = \frac{140,276}{8,406^{a/ag}}$	0,932
		91 dias	$f_{cm} = \frac{119,376}{4,317^{a/ag}}$	0,946
		180 dias	$f_{cm} = \frac{121,033}{3,359^{a/ag}}$	0,929
II	Lei de Lyse	$m = 9,4609 + 6,7545 * \ln a/ag$	0,990	
II	Teor de argamassa (α)	$\alpha = 49,75 + 0,50 * m$	1,000	
III	Lei de Prizskulnik e Kirilos (Molinari)	$Ce = \frac{1000}{0,398 + 0,463 * m}$	0,999	
III	Custo	$Cu = \frac{390,199}{1,118^m}$	0,989	
IV	Rendimento de resistência por kg de cimento (MPa x kg Ce)	3 dias	$f_{cm} = -193,17 + 36,72 * \ln Ce$	0,986
		7 dias	$f_{cm} = -242,86 + 46,18 * \ln Ce$	0,979
		28 dias	$f_{cm} = -264,42 + 51,37 * \ln Ce$	0,969
		63 dias	$f_{cm} = -224,64 + 45,80 * \ln Ce$	0,981
		91 dias	$f_{cm} = -159,34 + 36,32 * \ln Ce$	0,951
		180 dias	$f_{cm} = -143,41 + 35,08 * \ln Ce$	0,946

Fonte: Autor (2018).

Figura 38 – Diagrama de dosagem – Família de concreto 20% CV UTL B e C N



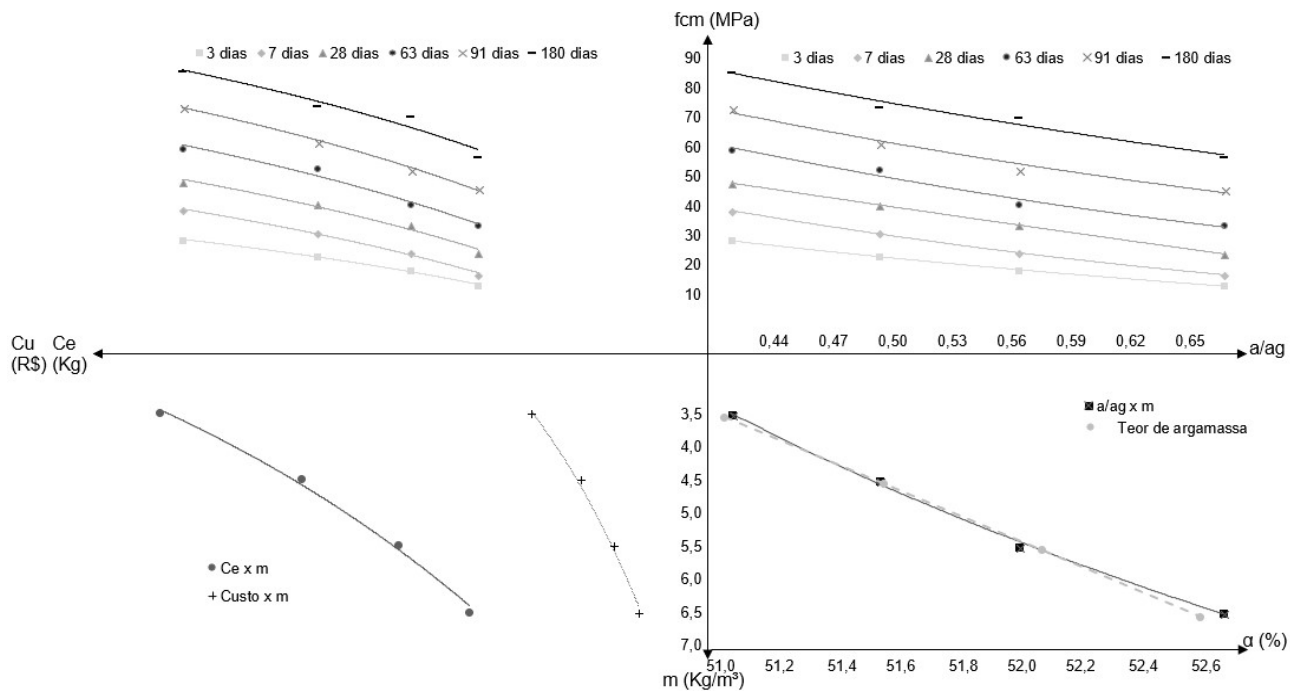
Fonte: Autor (2018).

Tabela 44 – Equações de comportamento e R² – Família de concreto 30% CV UTL B e C N

Quadrante	Propriedade	Equação de comportamento	R ²	
I	Lei de Abrams	3 dias	$f_{cm} = \frac{107,696}{23,783^{a/ag}}$	0,999
		7 dias	$f_{cm} = \frac{159,395}{29,083^{a/ag}}$	0,999
		28 dias	$f_{cm} = \frac{158,564}{16,634^{a/ag}}$	0,992
		63 dias	$f_{cm} = \frac{163,854}{11,094^{a/ag}}$	0,979
		91 dias	$f_{cm} = \frac{159,419}{6,771^{a/ag}}$	0,976
		180 dias	$f_{cm} = \frac{165,047}{4,877^{a/ag}}$	0,973
II	Lei de Lyse	$m = 9,1758 + 6,6334 * \ln a/ag$	0,988	
II	Teor de argamassa (α)	$\alpha = 49,25 + 0,50 * m$	1,000	
III	Lei de Priszkulnik e Kirilos (Molinari)	$Ce = \frac{1000}{0,398 + 0,464 * m}$	0,999	
III	Custo	$Cu = \frac{364,841}{1,114^m}$	0,989	
IV	Rendimento de resistência por kg de cimento (MPa x kg Ce)	3 dias	$f_{cm} = -150,43 + 28,85 * \ln Ce$	0,994
		7 dias	$f_{cm} = -214,50 + 40,82 * \ln Ce$	0,995
		28 dias	$f_{cm} = -228,41 + 44,67 * \ln Ce$	0,978
		63 dias	$f_{cm} = -254,08 + 50,68 * \ln Ce$	0,979
		91 dias	$f_{cm} = -256,47 + 53,08 * \ln Ce$	0,997
		180 dias	$f_{cm} = -230,81 + 50,99 * \ln Ce$	0,945

Fonte: Autor (2018).

Figura 39 – Diagrama de dosagem – Família de concreto 30% CV UTL B e C N



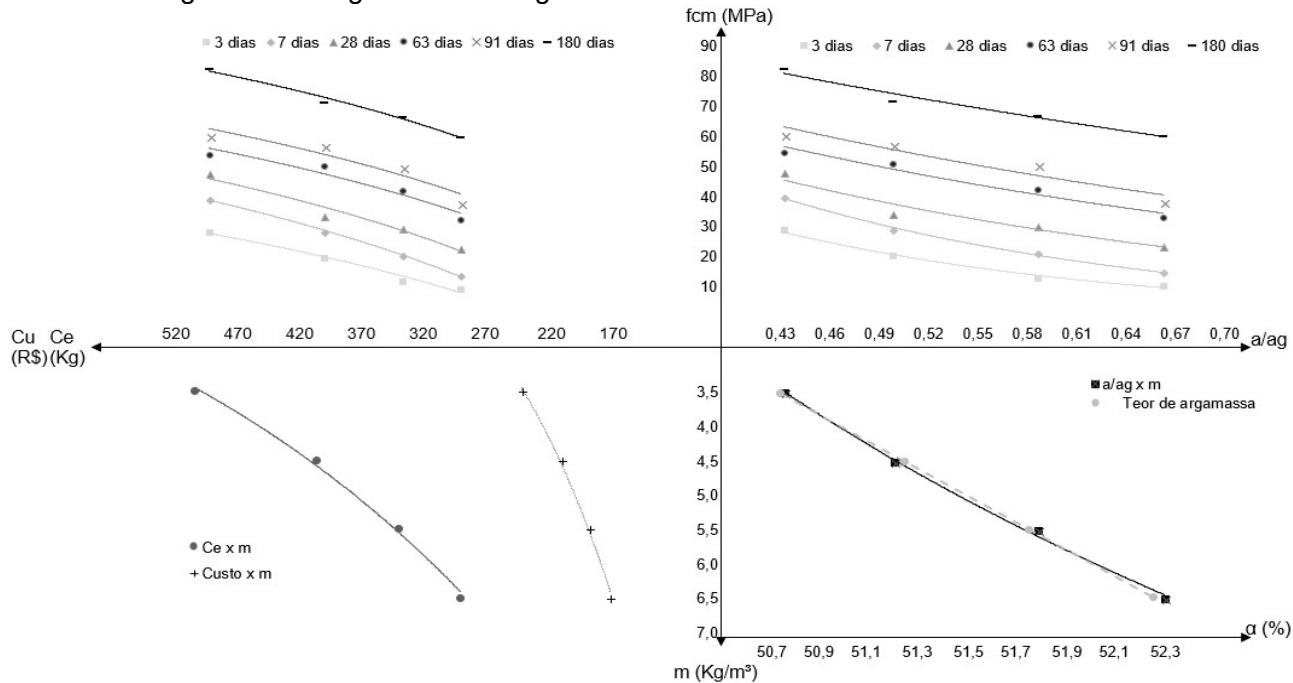
Fonte: Autor (2018).

Tabela 45 – Equações de comportamento e R² – Família de concreto 35% CV UTL B e C N

Quadrante	Propriedade	Equação de comportamento	R ²	
I	Lei de Abrams	3 dias	$f_{cm} = \frac{204,160}{97,994^{a/ag}}$	0,985
		7 dias	$f_{cm} = \frac{246,746}{69,390^{a/ag}}$	0,997
		28 dias	$f_{cm} = \frac{159,733}{18,174^{a/ag}}$	0,954
		63 dias	$f_{cm} = \frac{144,127}{8,640^{a/ag}}$	0,959
		91 dias	$f_{cm} = \frac{144,579}{6,778^{a/ag}}$	0,915
		180 dias	$f_{cm} = \frac{141,985}{3,665^{a/ag}}$	0,969
II	Lei de Lyse	$m = 9,2779 + 6,9001 * \ln a/ag$	0,998	
II	Teor de argamassa (α)	$\alpha = 49,00 + 0,50 * m$	1,000	
III	Lei de Priszkulnik e Kirilos (Molinari)	$Ce = \frac{1000}{0,398 + 0,464 * m}$	1,000	
III	Custo	$Cu = \frac{352,157}{1,113^m}$	0,989	
IV	Rendimento de resistência por kg de cimento (MPa x kg Ce)	3 dias	$f_{cm} = -201,94 + 37,15 * \ln Ce$	0,979
		7 dias	$f_{cm} = -258,02 + 47,96 * \ln Ce$	0,998
		28 dias	$f_{cm} = -234,63 + 45,33 * \ln Ce$	0,963
		63 dias	$f_{cm} = -196,05 + 40,72 * \ln Ce$	0,936
		91 dias	$f_{cm} = -190,58 + 40,9 * \ln Ce$	0,891
		180 dias	$f_{cm} = -176,5 + 41,67 * \ln Ce$	0,986

Fonte: Autor (2018).

Figura 40 – Diagrama de dosagem – Família de concreto 35% CV UTL B e C N



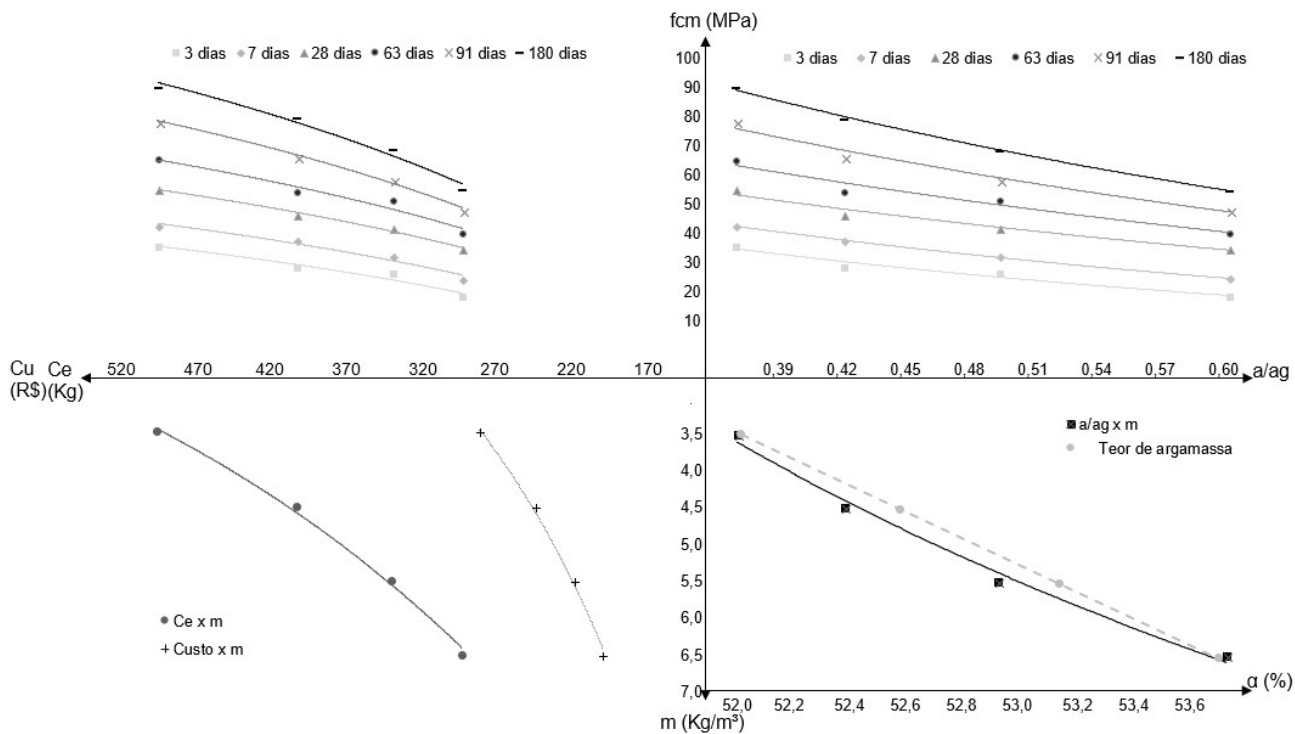
Fonte: Autor (2018).

Tabela 46 – Equações de comportamento e R² – Família de concreto 10% CV UTL B e C Mc

Quadrante	Propriedade	Equação de comportamento	R ²
I	Lei de Abrams	3 dias $f_{cm} = \frac{92,233}{13,896^{a/ag}}$	0,966
		7 dias $f_{cm} = \frac{100,694}{10,266^{a/ag}}$	0,999
		28 dias $f_{cm} = \frac{106,690}{6,542^{a/ag}}$	0,974
		63 dias $f_{cm} = \frac{129,245}{6,879^{a/ag}}$	0,963
		91 dias $f_{cm} = \frac{160,280}{7,520^{a/ag}}$	0,983
		180 dias $f_{cm} = \frac{193,962}{8,175^{a/ag}}$	0,999
II	Lei de Lyse	$m = 9,6795 + 6,0961 * \ln a/ag$	0,991
II	Teor de argamassa (α)	$\alpha = 50,75 + 0,50 * m$	1,000
III	Lei de Priszkulnik e Kirilos (Molinari)	$Ce = \frac{1000}{0,397 + 0,463 * m}$	0,999
III	Custo	$Cu = \frac{415,271}{1,121^m}$	0,989
II	Rendimento de resistência por kg de cimento (MPa x kg Ce)	3 dias $f_{cm} = -152,86 + 30,39 * \ln Ce$	0,949
		7 dias $f_{cm} = -163,97 + 33,43 * \ln Ce$	0,966
		28 dias $f_{cm} = -178,50 + 37,63 * \ln Ce$	0,991
		63 dias $f_{cm} = -211,12 + 44,51 * \ln Ce$	0,959
		91 dias $f_{cm} = -271,18 + 56,33 * \ln Ce$	0,994
		180 dias $f_{cm} = -317,02 + 65,81 * \ln Ce$	0,981

Fonte: Autor (2018).

Figura 41 – Diagrama de dosagem – Família de concreto 10% CV UTL B e C Mc



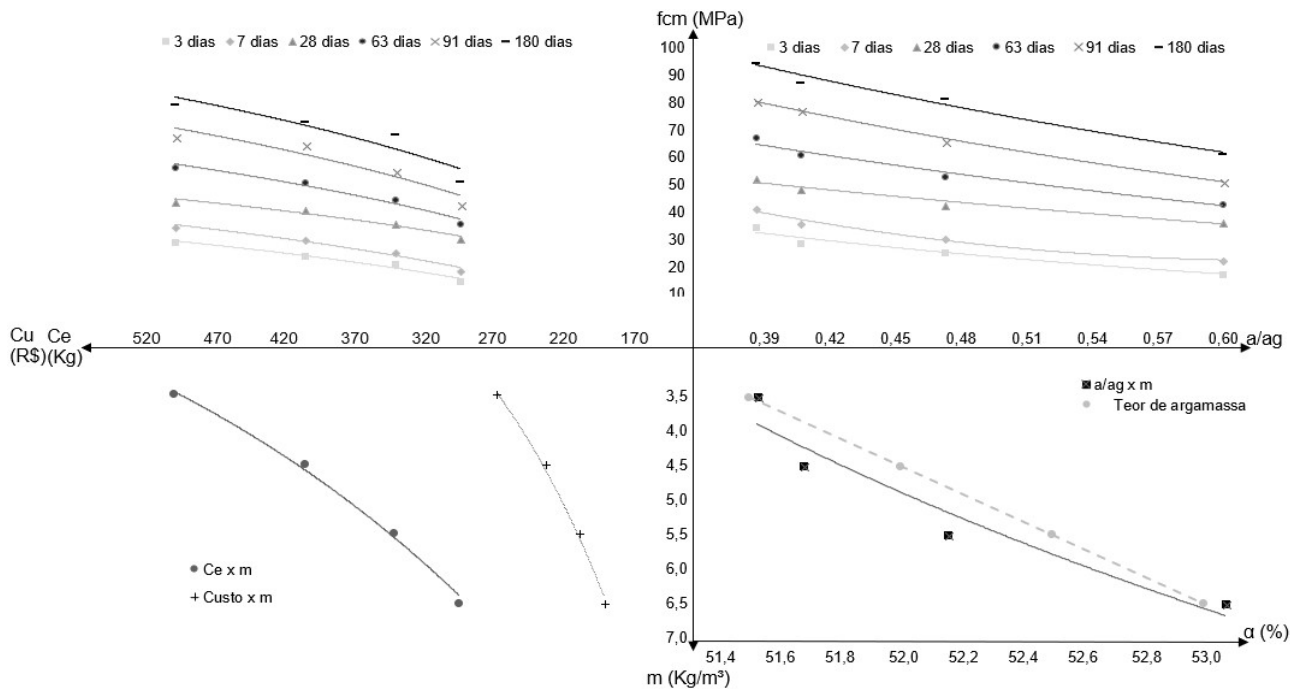
Fonte: Autor (2018).

Tabela 47 – Equações de comportamento e R² – Família de concreto 20% CV UTL B e C Mc

Quadrante	Propriedade	Equação de comportamento	R ²	
I	Lei de Abrams	3 dias	$f_{cm} = \frac{101,406}{18,977^{a/ag}}$	0,970
		7 dias	$f_{cm} = \frac{111,501}{14,944^{a/ag}}$	0,974
		28 dias	$f_{cm} = \frac{96,613}{5,274^{a/ag}}$	0,971
		63 dias	$f_{cm} = \frac{140,227}{7,378^{a/ag}}$	0,977
		91 dias	$f_{cm} = \frac{183,123}{8,416^{a/ag}}$	0,998
		180 dias	$f_{cm} = \frac{198,983}{7,007^{a/ag}}$	0,980
II	Lei de Lyse	$m = 9,9019 + 6,2956 * \ln a/ag$	0,926	
II	Teor de argamassa (α)	$\alpha = 49,75 + 0,50 * m$	1,000	
III	Lei de Priszkulnik e Kirilos (Molinari)	$C = \frac{1000}{0,398 + 0,463 * m}$	0,999	
III	Custo	$Cu = \frac{389,419}{1,118^m}$	0,989	
IV	Rendimento de resistência por kg de cimento (MPa x kg Ce)	3 dias	$f_{cm} = -157,75 + 31,08 * \ln Ce$	0,964
		7 dias	$f_{cm} = -177,72 + 35,44 * \ln Ce$	0,976
		28 dias	$f_{cm} = -137,72 + 30,81 * \ln Ce$	0,964
		63 dias	$f_{cm} = -214,15 + 45,58 * \ln Ce$	0,967
		91 dias	$f_{cm} = -261,60 + 55,75 * \ln Ce$	0,897
		180 dias	$f_{cm} = -270,61 + 59,37 * \ln Ce$	0,869

Fonte: Autor (2018).

Figura 42 – Diagrama de dosagem – Família de concreto 20% CV UTL B e C Mc



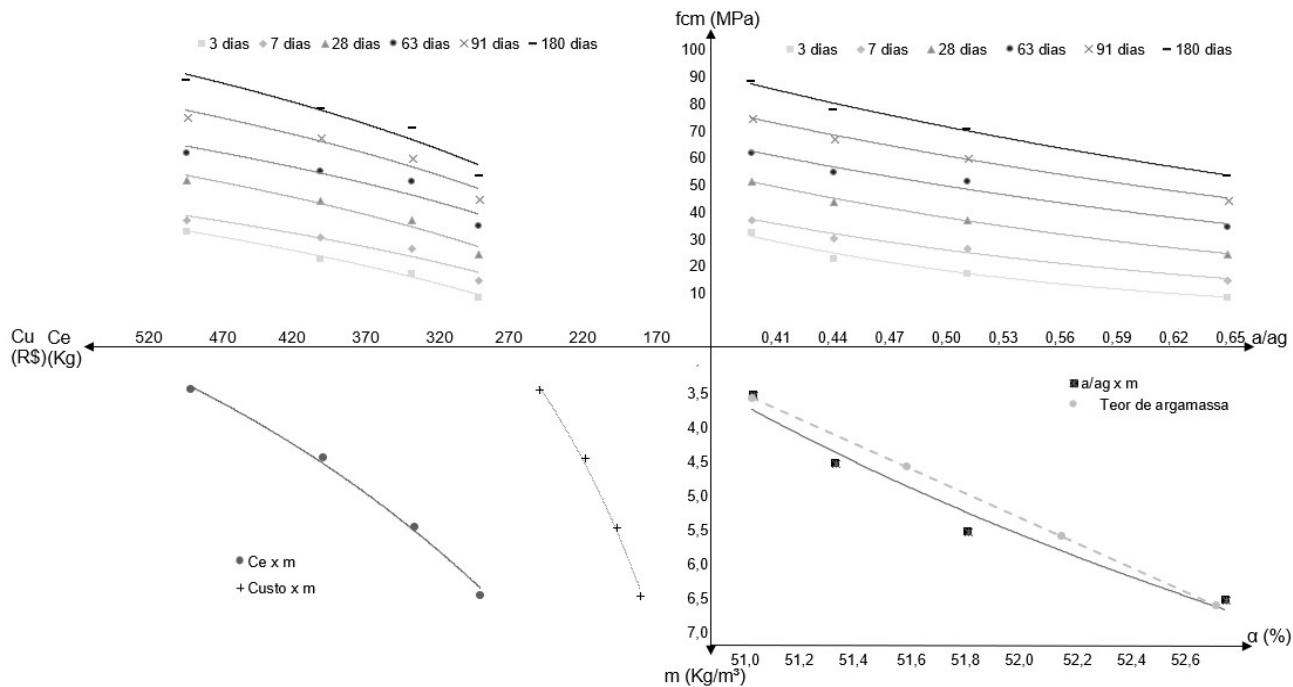
Fonte: Autor (2018).

Tabela 48 – Equações de comportamento e R² – Família de concreto 30% CV UTL B e C Mc

Quadrante	Propriedade	Equação de comportamento	R ²	
I	Lei de Abrams	3 dias	$f_{cm} = \frac{239,727}{206,569^{a/ag}}$	0,950
		7 dias	$f_{cm} = \frac{143,098}{34,296^{a/ag}}$	0,890
		28 dias	$f_{cm} = \frac{160,824}{20,007^{a/ag}}$	0,937
		63 dias	$f_{cm} = \frac{145,799}{9,342^{a/ag}}$	0,864
		91 dias	$f_{cm} = \frac{163,703}{7,805^{a/ag}}$	0,933
		180 dias	$f_{cm} = \frac{187,870}{7,427^{a/ag}}$	0,940
II	Lei de Lyse	$m = 9,3985 + 5,8502 * \ln a/ag$	0,994	
II	Teor de argamassa (α)	$\alpha = 49,25 + 0,50 * m$	1,000	
III	Lei de Priszkulnik e Kirilos (Molinari)	$Ce = \frac{1000}{0,398 + 0,464 * m}$	0,999	
III	Custo	$Cu = \frac{363,629}{1,114^m}$	0,989	
IV	Rendimento de resistência por kg de cimento (MPa x kg Ce)	3 dias	$f_{cm} = -244,34 + 44,71 * \ln Ce$	0,989
		7 dias	$f_{cm} = -207,34 + 39,64 * \ln Ce$	0,922
		28 dias	$f_{cm} = -256,65 + 49,98 * \ln Ce$	0,955
		63 dias	$f_{cm} = -230,41 + 47,47 * \ln Ce$	0,867
		91 dias	$f_{cm} = -262,84 + 54,83 * \ln Ce$	0,933
		180 dias	$f_{cm} = -303,24 + 63,47 * \ln Ce$	0,943

Fonte: Autor (2018).

Figura 43 – Diagrama de dosagem – Família de concreto 30% CV UTL B e C Mc



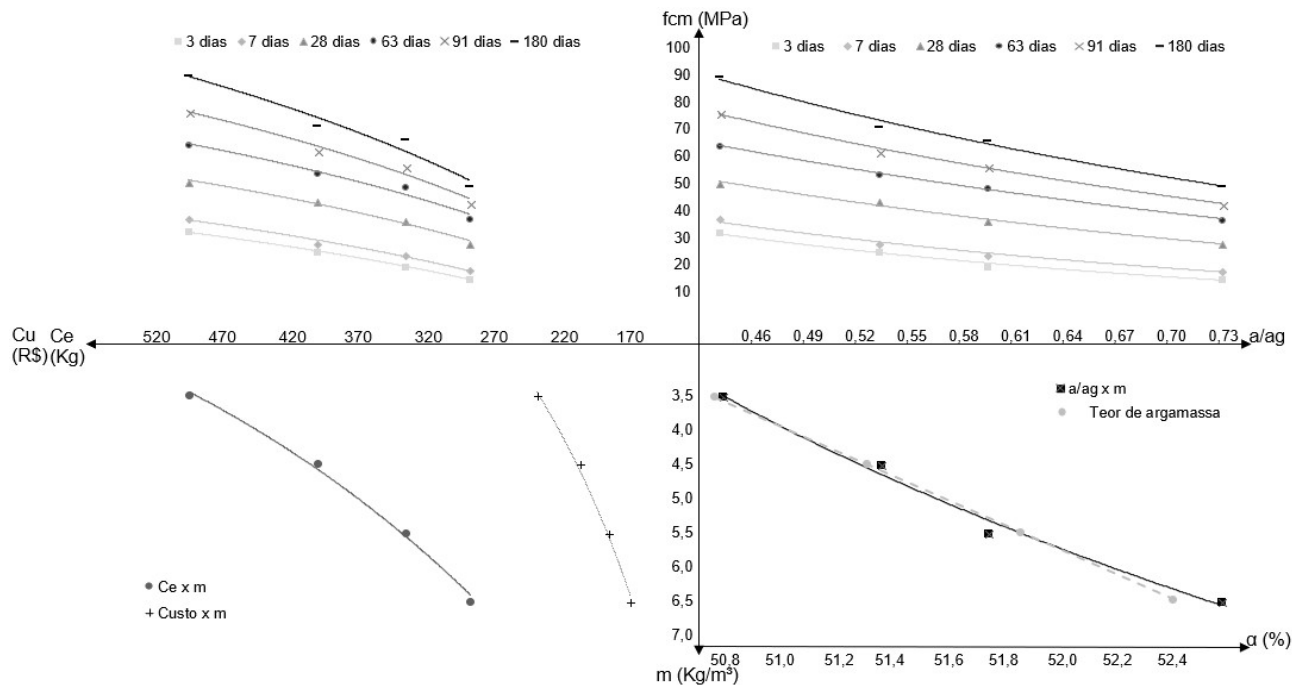
Fonte: Autor (2018).

Tabela 49 – Equações de comportamento e R² – Família de concreto 35% CV UTL B e C Mc

Quadrante	Propriedade	Equação de comportamento	R ²
I	Lei de Abrams	3 dias $f_{cm} = \frac{103,956}{15,376^{a/ag}}$	0,985
		7 dias $f_{cm} = \frac{106,268}{12,042^{a/ag}}$	0,986
		28 dias $f_{cm} = \frac{126,87}{8,093^{a/ag}}$	0,992
		63 dias $f_{cm} = \frac{147,236}{6,674^{a/ag}}$	0,999
		91 dias $f_{cm} = \frac{179,707}{7,223^{a/ag}}$	0,997
		180 dias $f_{cm} = \frac{215,439}{7,621^{a/ag}}$	0,991
II	Lei de Lyse	$m = 9,47 + 6,0527 * \ln a/ag$	0,989
II	Teor de argamassa (α)	$\alpha = 49,00 + 0,50 * m$	1,000
III	Lei de Prizskulnik e Kirilos (Molinari)	$Ce = \frac{1000}{0,398 + 0,464 * m}$	1,000
III	Custo	$Cu = \frac{350,795}{1,112^m}$	0,989
IV	Rendimento de resistência por kg de cimento (MPa x kg Ce)	3 dias $f_{cm} = -172,34 + 32,89 * \ln Ce$	0,999
		7 dias $f_{cm} = -184,05 + 35,52 * \ln Ce$	0,988
		28 dias $f_{cm} = -211,33 + 42,27 * \ln Ce$	0,984
		63 dias $f_{cm} = -241,04 + 49,21 * \ln Ce$	0,973
		91 dias $f_{cm} = -299,75 + 60,55 * \ln Ce$	0,973
		180 dias $f_{cm} = -360,62 + 72,46 * \ln Ce$	0,962

Fonte: Autor (2018).

Figura 44 – Diagrama de dosagem – Família de concreto 35% CV UTL B e C Mc



Fonte: Autor (2018).

Todas as curvas médias mostradas nos diagramas de dosagem apresentaram bons ajustes aos dados individuais, pois o menor R^2 apresentado foi de 0,864. As correlações entre estas propriedades não foram determinadas, pois já foram comprovadas matematicamente em outras pesquisas de impacto, desenvolvidas pelos pesquisadores, os quais estas relações (leis) levam seus nomes, com exceção da relação proposta nesta pesquisa entre a relação agregados/aglomerante (m) e o teor de argamassa (α). Neste caso, todas curvas apresentaram valor de t maior que t_α .

Observando os diagramas de dosagem, é possível notar que o uso de cinza volante desencadeia efeito de retardo na evolução da resistência à compressão até a idade de 63 dias para os traços contendo maior teor de pasta, sendo retardado para idades mais avançadas para os traços com menor teor de pasta. Este efeito se deve à redução da quantidade de cimento, que possui reatividade muito mais elevada que as partículas de cinza volante. Entretanto, após os 63 dias, as partículas de cimento apresentam baixa taxa de hidratação, enquanto as partículas de cinza volante apresentam reações de hidratação expressivas. Este efeito retardado da hidratação da cinza volante pode ser associado ao teor de CaO disponível para hidratação da CV, uma vez que o cimento precisa liberá-lo que então a CV possa iniciar suas reações. Ainda, deve-se destacar que quanto maior o teor de CV menor será a quantidade de cimento, logo, menor a quantidade de CaO disponível no sistema. Contudo, dependendo do ponto de vista, este retardo na evolução da resistência pode ser benéfico. Isto porque, em idades avançadas, a resistência à compressão será expressivamente mais elevada, se comparada a um concreto que teve a evolução de sua resistência normal ou acelerada. Isto se deve ao fato da melhor estruturação dos cristais de C-S-H durante seu crescimento, que ocorre de forma mais morosa e, portanto, mais ordenada e organizada. Além disso, a cinza volante reduz a tendência natural de floculação das partículas de cimento, com isso seu grau de hidratação será maior. O uso de cinza volante potencializa a durabilidade do concreto e, também, contribui com a prevenção da formação de etringita tardia, como comentado no capítulo 1.

As equações de custo foram determinadas com base nos valores praticados pelos fornecedores de cada um dos materiais, no mês de julho de 2017. Nesta época, a cotação do dólar era R\$ 3,15 e o custo unitário básico da Construção Civil em Santa

Catarina (CUB-SC) estava em R\$ 1.730,33. O valor do cimento Portland, na época, foi 0,44 R\$/kg; para a cinza natural foi 0,20 R\$/kg; para a cinza moída foi 0,22 R\$/kg, para a areia fina, 0,03 R\$/kg; para a areia de britagem e para a brita 19 mm, 0,04 R\$/kg; e para o aditivo, 6,27 R\$/kg. Estes custos são para pequenas quantidades e foram utilizados para todas as famílias de concreto investigadas nesta pesquisa. Com mudança de localização, estes custos podem ter variações expressivas.

Com as equações de comportamento referentes às curvas apresentadas nos diagramas de dosagem, foram determinados os traços para concretos com f_{ck} 30, 35, 40 e 45 MPa, considerando um coeficiente de variação de 10%, e utilizando a equação 15:

$$f_{cm} = \frac{f_{ck}}{1 - 1,65 * CV} \quad (15)$$

Onde:

f_{cm} – resistência média de dosagem;

f_{ck} – resistência característica do concreto.

A Tabela 50 apresenta a relação água-aglomerante, o consumo equivalente de cimento, o consumo real de cimento, e consumo de cinza volante. Para o desdobramento dos consumos de aglomerantes foram utilizadas as equações 16 e 17.

$$CV = C_e * CV\% * \frac{\rho_{cv}}{\rho_c} \quad (16)$$

$$CR = (1 - CV\%) * C_e \quad (17)$$

Onde:

CR – consumo real de cimento Portland;

C_e – consumo equivalente de cimento Portland;

CV% - percentual de cinza volante;

ρ_{cv} – massa específica da cinza volante;

ρ_c - massa específica do cimento Portland.

Destaca-se que estas comparações são para as condições, os parâmetros e o conjunto de materiais utilizados neste programa experimental.

Tabela 50 – Comparativo de traços para diferentes fck com as famílias de concreto (a) 30 MPa, (b) 35 MPa, (c) 40 MPa, e (d) 45 MPa

(a)

fck (MPa)	fcm (MPa)	Família	a/ag	Ce (kg/m ³)	CR (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	Custo (R\$/m ³)
30	35,9	Referência	0,75	253,02	253,02	-	179,81
		10% N	0,52	340,83	306,75	23,2	238,33
		20% N	0,55	342,58	274,06	41,46	212,58
		30% N	0,52	376,47	263,53	59,8	215,73
		35% N	0,51	390,78	254,01	67,25	213,89
		10% Mc	0,58	300,76	270,68	18,31	201,67
		20% Mc	0,59	289,13	231,3	31,29	186,29
		30% Mc	0,50	346,75	242,73	49,25	203,92
		35% Mc	0,61	292,33	190,01	44,98	175,67

(b)

fck (MPa)	fcm (MPa)	Família	a/ag	Ce (kg/m ³)	CR (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	Custo (R\$/m ³)
35	41,9	Referência	0,64	287,21	287,21	-	202,49
		10% N	0,44	418,08	376,27	28,46	272,44
		20% N	0,50	384,03	307,23	46,48	229,34
		30% N	0,47	431,26	301,88	68,50	233,35
		35% N	0,46	452,53	294,14	77,87	231,84
		10% Mc	0,50	345,56	311,00	21,03	224,29
		20% Mc	0,50	337,29	269,83	36,50	209,83
		30% Mc	0,45	386,21	270,34	54,85	218,39
		35% Mc	0,54	327,36	212,78	50,37	191,02

Continua na próxima página.

Continuação da página anterior.

(c)

fck (MPa)	fcm (MPa)	Família	a/ag	Ce (kg/m ³)	CR (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	Custo (R\$/m ³)
40	47,4	Referência	0,54	333,4	333,40	-	228,72
		10% N	0,37	545,17	490,65	37,11	312,62
		20% N	0,45	434,27	347,41	52,56	246,61
		30% N	0,42	501,69	351,18	79,69	251,71
		35% N	0,41	533,86	347,01	91,87	250,56
		10% Mc	0,42	406,74	366,07	24,76	249,72
		20% Mc	0,42	407,01	325,61	44,04	237,14
		30% Mc	0,41	433,77	303,64	61,60	233,31
		35% Mc	0,47	371,21	241,28	57,11	207,45

(d)

fck (MPa)	fcm (MPa)	Família	a/ag	Ce (kg/m ³)	CR (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	Custo (R\$/m ³)
45	53,9	Referência	0,45	401,21	401,21	-	259,95
		10% N	0,31	802,37	722,14	54,62	361,42
		20% N	0,41	497,37	397,89	60,19	264,59
		30% N	0,38	597,21	418,05	94,86	271,10
		35% N	0,37	647,82	421,08	111,48	270,36
		10% Mc	0,36	497,65	447,88	30,29	278,98
		20% Mc	0,35	520,51	416,41	56,32	269,81
		30% Mc	0,37	493,18	345,23	70,04	248,88
		35% Mc	0,42	428,83	278,74	65,98	225,37

Fonte: Autor (2018).

Para todas as resistências características avaliadas na Tabela 50, o traço contendo 35% de CV Mc foi o que apresentou o menor custo. Para o fck 30 MPa, esta redução de custo foi de 2,3%, para 35 MPa – 6,0%, para 40 MPa – 9,3% e para 45 MPa – 13,3%. Esta redução pode ser atribuída ao um efeito combinado da redução da demanda de água e da reação pozolânica da CV Mc, além da CV possuir a metade do custo do cimento. Estes resultados corroboram com o anteriormente comentado, de que os traços com maior teor de pasta são mais beneficiados pela

substituição de cimento por cinza volante, parcialmente. Os resultados mostram que o beneficiamento feito na cinza volante obtida pela combinação da CV provenientes das usinas UTL B e UTL C potencializa expressivamente os benefícios ao concreto. A diferença expressiva observada entre as propriedades dos concretos contendo CV natural e moída tem influência direta da distribuição das partículas destas CV. Conforme pode ser observado na Figura B 1 a CV moída apresenta um D50 de 20,64 μ m e um D90 de 61,8 μ m, enquanto a CV natural apresentou D50 de 77,94 μ m e um D90 de 203,5 μ m. Como explicado no item 2.2.1.1, quanto menor as partículas de MCS reativo mais rápida e mais intensa será sua atividade pozolânica. Entretanto, na evolução da resistência o efeito da redução da distribuição dos tamanhos das partículas pode ser observado somente em idade após os 28 dias. Este efeito pode ser atribuído, como já destacado, à quantidade de CaO disponível no sistema para ser consumido pelas reações de hidratação da CV.

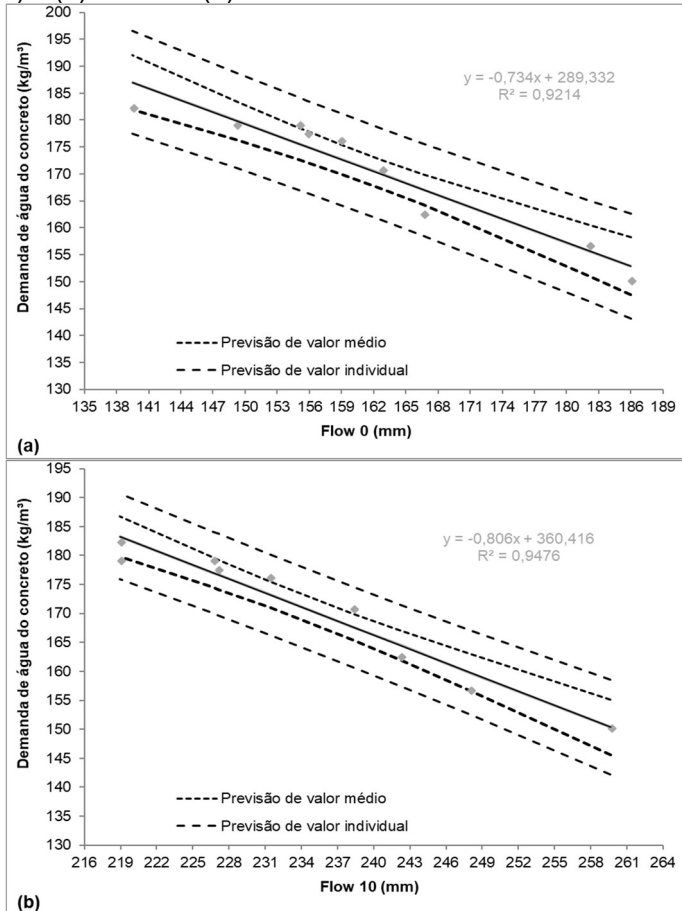
4.4 CORRELAÇÃO ENTRE O ESTUDO EM ARGAMASSA E O ESTUDO EM CONCRETO

Com o propósito de avaliar o potencial dos estudos realizados em argamassa, em pré-estabelecer o desempenho de MCS para posterior uso em concreto, foram investigadas possíveis relações entre os resultados obtidos na etapa 2 – estudo em argamassa; e na etapa 3 – estudo em concreto.

Deve-se destacar que estas correlações foram feitas com os resultados determinados para o estudo em argamassa em que foi utilizado, como agregado, a combinação das areias utilizadas no mercado (areia grossa de britagem e areia fina de cava) para produção de concreto, e o traço médio pobre de m 5,5. A fração de agregado miúdo ficou, em média, 2,48, o mais próximo do valor utilizado nos traços em argamassa.

Foram investigadas correlações entre as propriedades nos estados fresco e endurecidos. A Figura 45 apresenta a correlação entre o espalhamento estático (*flow* 0 - a) e o espalhamento dinâmico (*flow* 10 - b), como parâmetro fixo, e a demanda de água do concreto como variável dependente.

Figura 45 – Correlação entre a demanda de água inicial do concreto (kg/m^3) e (a) Flow 0 e (b) Flow 10



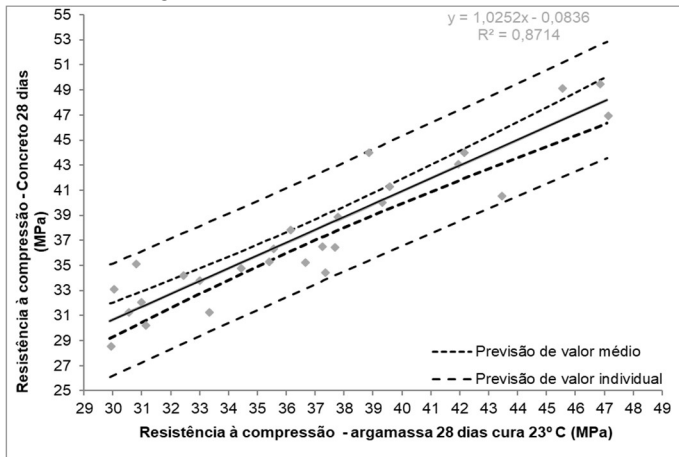
Fonte: Autor (2018).

Com os dados plotados na Figura 45 pode-se inferir que há uma correlação negativa entre o espalhamento da argamassa, tanto estático, quanto dinâmico e a demanda de água do concreto. Contudo, a curva com o *flow* 10 apresentou maior inclinação, logo, é mais afetada pela variação dos resultados obtidos nos ensaios em argamassa. Com isso, pode-se inferir que quanto menor os espalhamentos obtidos em argamassa, maior será a demanda de água no concreto. Esta correlação não foi possível utilizando os resultados do estudo com areia padrão. Por meio da correlação

obtida, conhecendo o espalhamento estático e dinâmico, é possível estimar, com 95% de confiança, a demanda de água do concreto. Assim, não há necessidade da realização direta de um estudo experimental para avaliação de MCS em concreto, mas realizar uma avaliação preliminar confiável em argamassa. Porém, este estudo deve ser realizado em sala com temperatura controlada, pois, como os ensaios são realizados com um volume relativamente pequeno de argamassa, temperaturas elevadas podem aumentar a evaporação da água de amassamento.

Foram determinadas, no estado endurecido, correlações entre a resistência em argamassa com cura a 23 °C, e a resistência em concreto com 28 dias. Esta correlação é apresentada na Figura 46.

Figura 46 – Correlação entre a resistência à compressão em argamassa aos 28 dias com cura a 23 °C e a resistência à compressão aos 28 dias em concreto



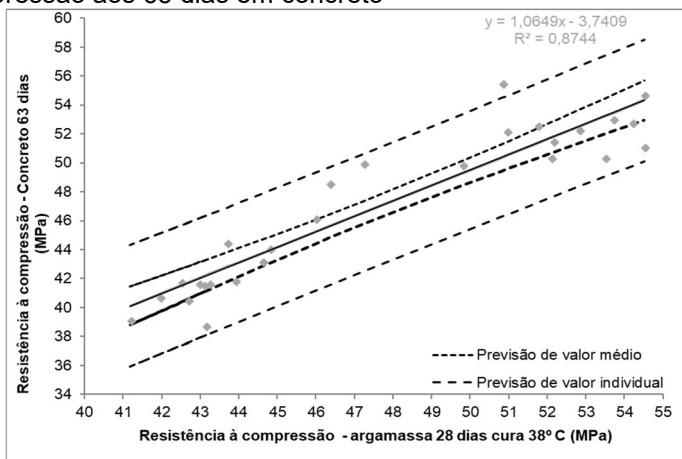
Fonte: Autor (2018).

A correlação obtida com a resistência em argamassa determinada com base no estabelecido pela NBR 5752 (ABNT, 2014) apresenta relação direta com a resistência obtida no concreto aos 28 dias de idade. Esta relação não pôde ser estabelecida com o estudo em argamassa com areia padrão. Com os resultados obtidos é possível estabelecer que uma avaliação preliminar de MCS para uso em concreto pode ser realizada em argamassa. Assim pode ser previsto, com certa precisão, o comportamento quando utilizado em concreto, permitindo a

exclusão ou a maior atenção a certo teor de substituição, podendo ser explorado o máximo potencial de MCS de interesse.

A Figura 47 apresenta a correlação entre a resistência à compressão obtida em argamassa, aos 28 dias, com cura em 38 °C, e a resistência obtida em concreto com idade de 63 dias.

Figura 47 – Correlação entre a resistência à compressão em argamassa aos 28 dias com cura a 38 °C e a resistência à compressão aos 63 dias em concreto



Fonte: Autor (2018).

Como obtido para a correlação apresentada na Figura 46, também há correlação significativa entre a resistência em argamassa obtida com o método de cura proposto pela NBR 5752 (ABNT, 1992) e a resistência aos 63 dias em concreto. Assim, pode ser determinada a taxa de crescimento da resistência, ainda com estudo em argamassa. Para estruturas que possam ter sua resistência necessária com idades mais avançadas, esta determinação é extremamente importante. Este pode ser o critério de desempate para a seleção de um MCS ou de seu teor de substituição.

A Tabela 51 apresenta os coeficientes de correlação para as correlações determinadas entre os ensaios em argamassa e os ensaios em concreto.

Tabela 51 – Coeficientes que investigam a correlação entre uma variável dependente e outra independente – Figura 45, Figura 46 e Figura 47

Fatores correlacionados	Person	Student	
	R ²	t (b/Sb)	t $\alpha/(2(n-2))$
Flow 0 vs Demanda de água	0,9214	9,0581	2,350
Flow 10 vs Demanda de água	0,9476	11,2480	
Resistência 23 °C vs Resistência 28 dias	0,8714	13,0126	2,060
Resistência 38 °C vs Resistência 63 dias	0,8744	13,1956	

Fonte: Autor (2018).

Como pode ser visto na Tabela 51, os ensaios em argamassa e os ensaios em concreto apresentam correlações significativas, com 95% de confiança. Isto contribui para a proposta inicial de determinar uma forma de avaliar, com ensaios tecnológicos, a influência do uso de MCS em concreto por meio de estudos preliminares em argamassa. Esta avaliação torna-se menos trabalhosa que uma avaliação direta em concreto que, em muitas situações, inviabiliza a avaliação de certo MCS, em razão da gama de atividades e a grande carga de trabalho dos técnicos de uma central dosadora de concreto.

4.5 PROPOSTA DE MÉTODO DE ENSAIOS EM ARGAMASSA PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MCS EM CONCRETO

Com base nos resultados obtidos e nas correlações apresentadas no item 4.4, neste item é proposto um conjunto de procedimentos para avaliar, de forma preliminar, o desempenho de MCS destinados a concretos, tanto bombeáveis quanto convencionais, a partir de ensaios em argamassa. Entretanto, como este método é comparativo, existe a necessidade de que o

traço padrão seja estabelecido com base em histórico de concretos já produzidos pela central dosadora.

Por mais que este método proposto esteja fundamentado somente nos resultados desta dissertação, avaliando um universo restrito de cinzas volantes com apenas duas areias, um único tipo de cimento e de aditivo polifuncional de outras bases químicas, ele pode ser considerado promissor para avaliação de outros tipos de MCS combinados com outros tipos de cimento Portland, aditivos e agregados. Deste modo, por ser rápido, prático e simples – para quem possui conhecimento básico de tecnologia de concreto, este método merece maior atenção, além desta dissertação. A seguir, são apresentadas as etapas de execução.

a) Determinação dos parâmetros iniciais

Inicialmente deve ser determinada a relação agregados/aglomerante que se tem interesse em investigar o desempenho do MCS, e o intervalo de abatimento que se deseja utilizar para o concreto.

Feito isto, deve-se determinar a quantidade de areia do traço com base no teor de argamassa utilizada que, como mencionado anteriormente, deve pertencer a um histórico de concretos produzidos pelo interessado. Exemplificando, nesta dissertação, foram utilizados um m de 5,4 – referente a um concreto de fck 40 MPa aos 28 dias, aplicado com slump de 140 ± 20 mm, com o teor de argamassa de 51%, obtendo um valor de a (agregado miúdo unitário) de 2,50. O teor de aditivo, sendo à base de policarboxilato, deve ser a metade do que se utilizaria em concreto. Por fim, é necessário determinar as porcentagens de MCS que se deseja investigar, sendo determinados os traços com substituição em volume absoluto.

b) Estudo experimental em argamassa

Esta etapa deve ser iniciada pela determinação da quantidade água necessária à obtenção de um *flow* 10 entre 200 e 230 mm. Quanto mais fluido se desejar o concreto, mais próximo de 230 o resultado deve ser. A quantidade de água não deve ser maior que um a/ag de 0,48. Se for o caso, deve-se retornar a etapa inicial e aumentar o teor de aditivo. Os espalhamentos em *flow* 0 e o *flow* 5 também devem ser registrados. Observar, após a

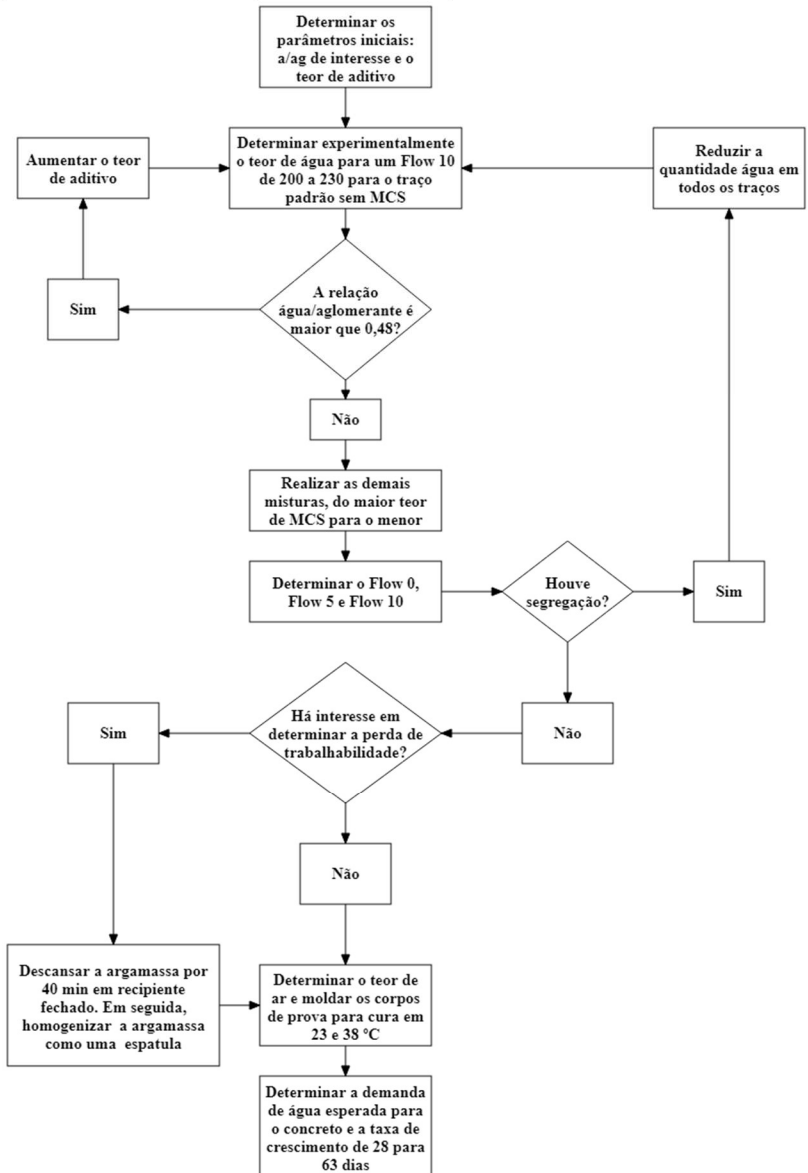
determinação de todos os espalhamentos, a tendência a segregação ou exsudação da argamassa. Caso haja manifestação de exsudação, deve-se retornar a etapa inicial e reduzir a quantidade de água. Em seguida, deve ser determinado o teor de ar aprisionado pelo método gravimétrico e, por fim, moldados os corpos de prova para a determinação da resistência com cura a 23 e 38 °C. Desta forma, é possível determinar a taxa de crescimento de 28 para 63 dias.

É importante lembrar que a correlação estabelecida foi determinada com a água inicial não a água após a simulação de 15 minutos de transporte do concreto até o local de descarga. Caso seja de interesse determinar com a água final a argamassa deve ficar descansando em recipiente fechado por 40 minutos depois de fazer os ensaios no estado fresco e, em seguida, realizados os ensaios no estado fresco novamente para então fazer a moldagem dos corpos de prova.

Os teores que apresentarem resultados apreciáveis devem ser confirmados em concreto, onde se poderá determinar, por meio do cone invertido, a possibilidade de redução do teor de argamassa. Ou, se for o caso, com base na experiência do tecnologista de concreto, por meio de determinações empíricas.

O fluxograma da Figura 48 apresenta, de forma esquemática, o processo anteriormente explicado.

Figura 48 – Fluxograma do método proposto para avaliação preliminar do desempenho de MCS para uso em concreto



Fonte: Autor (2018).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões gerais desta dissertação, bem como sugestões para pesquisas futuras, que podem aprimorar os estudos e o método para avaliação preliminar de Materiais Cimentícios Suplementares (MCS). Buscou-se potencializar ainda mais o beneficiamento das cinzas volantes provenientes do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda (CTJL), para seu uso em concreto, de forma que se obtenham benefícios expressivos a suas propriedades.

5.1 CONCLUSÕES GERAIS

Esta pesquisa teve como objetivo geral investigar as propriedades tecnológicas, no estado fresco e endurecido, de concretos produzidos com substituição parcial do cimento por cinzas volantes provenientes do CTJL. Em razão da quantidade expressiva de cinza volantes a ser avaliada, considerou-se pertinente propor um conjunto de ensaios em argamassa para avaliação preliminar destes MCS na produção de concretos. A realização desta avaliação preliminar possibilita a redução da grande demanda de ensaios, caso a avaliação seja diretamente em concreto.

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi proposto um programa experimental com o intuito de investigar o desempenho das frações retidas e passantes na peneira 45 μm , e o beneficiamento da moagem da fração retida quanto à trabalhabilidade e resistência à compressão. Foram avaliadas as cinzas volantes provenientes das três Usinas Termelétricas (UTL), que formam o CTJL – UTL A, UTL B e UTL C. Além destas, uma quarta procedência, obtida pela combinação das CV provenientes da UTL B e UTL C foi avaliada, nomeada UTL B e C. Esta combinação foi avaliada por ser uma CV comercializada na condição natural e beneficiada por um processo de moagem, com posterior comercialização para utilização na produção de concreto. Foi realizada, inicialmente, a caracterização química e física das cinzas volantes a serem avaliadas para produção de concreto, assim como sua capacidade de fixação do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) pelo método de Chapelle modificado. Em

seguida, foi realizado um estudo em argamassa com o uso de areia padrão do Instituto Tecnológico de São Paulo (IPT) como agregado. Isto foi feito porque esta areia é a recomendada pela NBR 12653 (ABNT, 2015) e pela C 618 (ASTM, 2015) para avaliação de MCS para uso em concretos e argamassas.

Em uma segunda fase desta etapa – estudo em argamassa, foi realizado um conjunto de experimentos com o uso de uma combinação de areias utilizadas no mercado para produção de concreto.

Na última fase foi realizado um estudo em concreto, sendo determinado o teor de argamassa ideal para todos os traços. Conforme constatado nesta pesquisa, quanto maior o teor (em volume absoluto) de pasta, menor a necessidade de argamassa no traço. Com isto, foram produzidos 36 traços apenas para determinar o teor de argamassa, aproveitando para determinar o consumo de água para um abatimento de 80 ± 20 mm – classe S50 da NBR 8953 (ABNT, 2015). Esta foi a classe de abatimento inicial determinada para as famílias de concreto aqui investigadas.

Com os resultados obtidos, foi possível apontar certas inferências:

- a) Na capacidade de fixação do Ca(OH)_2 , a área específica de Blaine e o teor de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 apresentam influência significativa, comprovada estatisticamente com 95% de confiança. Por sua vez, o teor de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 e a área específica de Blaine têm relação direta com a procedência e com a condição das partículas das cinzas volantes. A UTL A é a usina que produz a cinza com menor potencial de reações com o cimento. Já a UTL B e a UTL C apresentam potenciais semelhantes para utilização no concreto; porém, o potencial da UTL C é um pouco mais elevado. Em relação às condições das partículas, as que passam na peneira 45 μm e as moídas apresentaram maior potencial de fixação do Ca(OH)_2 .
- b) Em relação aos ensaios em argamassa, é possível observar que o uso da areia padrão desencadeia o aprisionamento de ar elevado. Isto leva à possibilidade de classificações equivocadas do desempenho dos MCS. O uso desta areia é determinado para o ensaio – índice de pozolanicidade com o cimento Portland, estabelecido pela NBR 12653 (ABNT, 1992; 2014) e C

618 (ASTM, 2015). Gava (1999) inferiu, em suas pesquisas, que este método apresentava potencial de conclusões equivocadas devido as suas condições de controle. Hoppe Filho *et al.* (2017) corroboram com as conclusões de Gava (1999); porém, fazendo uso do método - índice de pozolanicidade com a cal, que utiliza a mesma areia como agregado para a produção das argamassas. Logo, com base nos resultados obtidos nesta pesquisa e com os pontos já ressaltados por Gava (1999) e Hoppe Filho *et al.* (2017), é possível concluir que o uso de areia padrão para avaliação do desempenho de MCS não é a opção mais adequada.

- c) Os resultados obtidos nas argamassas produzidas com as areias utilizadas no mercado para produção de concreto mostram que o teor de ar das argamassas é condizente com os teores esperados para a fração de argamassa de um traço de concreto. Os valores de controle tomados como referência foram obtidos nas pesquisas de Weidmann (2008) e Damo (2011). Estes autores desenvolveram pesquisas com a fração de argamassa de um traço de concreto, os resultados foram utilizados para estabelecer correlação com o comportamento do concreto. Nesta etapa do programa experimental, foi possível observar, de forma mais confiável, o comportamento das argamassas com as diferentes amostras de CV. Desta forma, foi possível estabelecer correlações significativas e confiáveis com os ensaios em concreto. Isto possibilitou concluir que as partículas menores que 45 μm com forma original apresentam o maior potencial de redução na demanda de água, além de alta reatividade com o cimento. Estes resultados vão ao encontro dos resultados apresentados por Mehta e Malhotra (1996); Lothenbach, Srivener e Hooton (2011); Suraneni e Weiss, (2017). As amostras referentes às frações retidas na peneira 45 μm , moídas até a área específica da sua fração passante na referida peneira, também apresentaram desempenhos apreciáveis. Com isto, um beneficiamento bem controlado e bem regulado possibilitaria a obtenção de uma cinza volante com

desempenho muito acima das CV disponíveis provenientes do CTJL no momento.

- d) O estudo em concreto possibilitou determinar que a consideração de Helene e Terzian (1992), de que o teor de argamassa deve ser fixo para uma família de concreto, pode ser reavaliada. Assim, com base nos resultados obtidos, pode-se perceber que os traços com maior volume de pasta necessitam de um menor teor de argamassa, o que pode reduzir expressivamente o custo de traços mais ricos. A simulação de transporte mostrou que há necessidade de tal consideração durante o desenvolvimento de um estudo de dosagem. A trabalhabilidade perdida durante o transporte precisa ser repostada no momento da descarga e aplicação do concreto. O diagrama de dosagem construído possibilitou o estabelecimento e uma configuração diferente para a lei de Lyse, devido ao uso de aditivo à base de policaboxilatos. Esta base química de aditivos não era utilizada quando Lyse a estabeleceu. A configuração proposta para o diagrama de dosagem possibilita uma avaliação rápida de mais propriedades de um traço, do que as já apresentadas na literatura citada nesta dissertação. Com os resultados obtidos nos ensaios em concreto, é possível concluir que o beneficiamento de moagem apresentou potencial expressivo na redução da demanda de água para uma mesma trabalhabilidade. Isto acarretou em certa redução no custo do traço para o teor de 35% de substituição para as resistências características de 30, 35 40 e 45 MPa. Esta redução foi maior com traço de maior resistência, mostrando que traços com maior teor de pasta são mais beneficiados pelo uso de cinza volante em substituição parcial ao cimento. Além de corroborar com os resultados obtidos em argamassa de que a moagem das CV aumento seu potencial de reação com o cimento.
- e) Com as correlações estabelecidas entre os ensaios em argamassa, da segunda etapa do estudo em argamassa, e os ensaios em concreto, foi possível

estabelecer um conjunto de ensaios que possibilita a avaliação de forma mais justa, que fornece resultados com potencial imediato de transferência para a indústria da tecnologia de concreto.

Com os resultados obtidos foi possível alcançar todos os objetivos específicos propostos, o que possibilitou o alcance do objetivo geral estabelecido. Assim, identificou-se que a cinza volante com maior potencial de utilização e viabilidade econômica, entre as formas avaliadas, é a UTL B e C Mc (moída comercial). O teor de CV que mostrou melhor desempenho foi o de 35%, possibilitando a redução do custo do concreto, além de apresentar potencial de mitigação da formação de Etringita Tardia (DEF). Nas pesquisas realizadas por Ramlochan *et al.* (2003) e Ramlochan, Thomas e Hooton (2004), os teores de substituição foram de até 25% ao cimento, o que, segundo os autores, forneceu uma fonte extra de íons de alumínio à pasta, acarretando na mitigação da formação de DEF.

O uso da CV na produção de concreto apresenta aproximadamente 75% da resistência obtida em um concreto referência contendo apenas cimento como aglomerante na idade de 28 dias. Contudo, a CV promove crescimento expressivo da resistência à compressão para idades maiores que 28 dias. Considerando que grande parte dos elementos estruturais que compõem tanto as edificações habitacionais e comerciais, quanto de obras de infraestrutura serão submetidas a toda a carga considerada no projeto estrutural apenas após idades superiores aos 180 dias, este crescimento de resistência para esta idade pode ser melhor explorado. Com isso, os custos do concreto e o consumo de cimento podem ser reduzidos, podendo então diminuir a quantidade de CO₂ emitida pela produção de cimento, além de contribuir com a durabilidade das edificações.

Porém, os resultados obtidos nos estudos em argamassa e a relação entre os ensaios de Chapelle e a área específica de Blaine mostraram que seu potencial ainda está aquém do máximo que CV UTL B e C Mc pode apresentar. Assim, um separador de partículas pode ser regulado de forma que somente as partículas maiores que 45 µm sejam moídas, até que elas obtenham a finura da sua fração menor que 45 µm.

5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

De forma a proporcionar direcionamento na continuação desta pesquisa, o que possibilitará a ampliação do conhecimento da comunidade acadêmica e dos tecnologistas de concreto relacionados ao potencial do uso de MCS em concreto, sugerem-se certas situações a serem pesquisadas. Assim, é possível tornar a transferência dos resultados obtidos em pesquisas acadêmicas para o mercado da tecnologia de concreto mais ágil. Para isto, recomenda-se:

- Investigar o potencial do uso de um aéreo separador que possibilite a separação das partículas maiores que 45 μm de forma eficiente, sendo moída apenas esta fração, e novamente misturada à fração passante. Os moinhos devem ser regulados de forma que a fração maior que 45 μm obtenha a finura da fração passante. Sugere-se que esta investigação seja realizada em escala industrial.
- Avaliar a adesão do método proposto para avaliação do comportamento dos Materiais Cimentícios Suplementares em concreto a outros MCS, reativos e não reativos com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sendo investigadas correlações com os resultados em concreto. Isto possibilitará a difusão de uma forma mais prática, confiável e rápida de avaliar o comportamento destes materiais, quando utilizados em concreto.
- Realizar ensaios com teores mais elevados de substituição ao cimento e com MCS de diferentes origens, além de expandir para cimentos de outros fabricantes e aditivos de outras bases químicas.

REFERÊNCIAS

AÏTCIN, P. C.. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: PINI, 2000. Tradução de: Geraldo G. Serra.

ALVES, J. B.; GORGES, M. P.. **Treinamento para técnicos em manutenção mecânica de usinas**. Capivari de Baixo: [s.n.], 2007. 17 p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE ACI Committee 232.3R-14: **Report on highvolume fly ash concrete for structural applications**. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA. 2014.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 232 – 03. **Use of fly ash in concrete**. 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C 150**: Standard Specification for Portland Cement. Pennsylvania, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C 618**: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. 1 ed. West Conshohocken, Pennsylvania, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro, 1992. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro, 2015. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência, 2016. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado, 2005. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15894-1**: Metacaulim para uso com cimento Portland em

concreto, argamassa e pasta: Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15894-3**: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta: Parte 3: Determinação da finura por meio da peneira 45 µm. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15895**: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido fixado – Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 16 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos — Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland — Índice de atividade pozolânica com cimento — Método de ensaio. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Pozolanas - Determinação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5753**: Cimento Portland - Ensaio de pozolanicidade para cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214**: Areia normal para ensaio de cimento - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 47**: Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002. 23 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. 8 p.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION (AFNOR). **NF P/8-513**. Métakaolin addition pouzzolanique pour bétons – Définitions, spécifications, critères de conformité, La Plaine Saint-Denis Cedex, França. 2010. 8 p.

ASSUNÇÃO, W. J.. **Curvas de dosagem para concretos convencionais e aditivos confeccionados com materiais da região noroeste do Paraná**. 2002. 254 f. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Centro

Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

AZEVEDO, A. G. S., STRECKER, K., ARUJO JUNIOR, A. G., SILVA, C. A.. Produção de geopolímeros à base de cinza volante usando soluções ativadoras com diferentes composições de Na_2O e Na_2SiO_3 . **Cerâmica**, [S.l.], v. 63, n. 366, p.143-151, abr. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132017633662078>.

BAGGIO, A. J.. **Estudo comparativo de métodos de dosagem de concreto de cimento Portland**. 2000. 182 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

BAHURUDEEN, A.; SANTHANAM, M.. Influence of different processing methods on the pozzolanic performance of sugarcane bagasse ash. **Cement and concrete composites**, [S.l.], v. 56, p.32-45, fev. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.002>.

BAZZONI, A.; CANTONI, M.; SCRIVENER, K. L.. Impact of Annealing on the Early Hydration of Tricalcium Silicate. **Journal of the american ceramic society**, [s.l.], v. 97, n. 2, p.584-591, 12 dez. 2013. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/jace.12691>.

BENTZ, D. P.; FERRARIS, C. F.; GALLER, M. A.; HANSEN, A. S.. Guynn, J.M., Influence of particle size distributions on yield stress and viscosity of cement-fly ash pastes. **Cement and concrete research**, [S.l.], v. 42, n. 2, p.404-409, fev. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.11.006>.

BENTZ, D. P.; FERRARIS, C. F.; PELTZ, M. A.; WINPIGLER, J. A.. Mixture proportioning options for improving high volume fly ash concretes. **Materials and construction research division of national institute of standards and technology**. Gaithersburg, MD, 2010. 19 p.

BENTZ, D. P.; PELTZ, M. A.; WINPIGLER, J.. Early-Age Properties of Cement-Based Materials. II: Influence of Water-to-Cement Ratio. **Journal of materials in civil engineering**, [s.l.], v. 21, n. 9, p.512-517, set. 2009. American Society of Civil

Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2009\)21:9\(512\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2009)21:9(512)).

BERNAL, C., COUTO, A. B., BREVIGLIERI, S. T., CAVALHEIRO, E. T. G... Influência de alguns parâmetros experimentais nos resultados de análises calorimétricas diferenciais - DSC. **Química nova**, [S.l.], v. 25, n. 5, p.849-855, set. 2002. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422002000500023>.

BERODIER, E.; SCRIVENER, K. L.. Understanding the Filler Effect on the Nucleation and Growth of C-S-H. **Journal of the american ceramic society**, [s.l.], v. 97, n. 12, p.3764-3773, 18 ago. 2014. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/jace.13177>.

BLEICKER, L.; SASAKI, J. M.. **Introdução à difração de raio-X em cristais**. Universidade Federal do Ceará, 2000.

BORK, J. A.. **Caracterização e avaliação das emissões do uso de lodo sanitário seco como combustível em combustor ciclônico**. 2011. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

British Standards Institution. **EN 196-5**: Methods of testing cement. Pozzolanicity test for pozzolanic cement. London: BSI, 2011.

British Standards Institution. **EN 450-1**: Fly ash for concrete. Definition, specifications and conformity criteria. London: BSI, 2012.

BURTON, W. K.; CABRERA, N.; FRANK, F. C. The Growth of Crystals and the Equilibrium Structure of their Surfaces. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 243, n. 866, p. 299–358, 12 jun. 1951. <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/roypta/243/866/299.full.pdf>.

CAPUTO, D.; LIGUORI, B.; COLELLA, C.. Some advances in understanding the pozzolanic activity of zeolites: The effect of zeolite structure. **Cement and Concrete Composites**, [S.l.], v.

30, n. 5, p.455-462, maio 2008. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.08.004>.

CELIK, K.; MERAL, C.; GURSEL, A. P.; MEHTA, P. K.; A. HORVATH, A.; MONTEIRO, P. J. M.. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended Portland cements containing fly ash and limestone powder. **Cement and concrete composites**, [s.l.], v. 56, p.59-72, fev. 2015. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.003>.

CHEN, Z.; LI, J.; YANG, E.. High Strength Lightweight Strain-Hardening Cementitious Composite Incorporating Cenosphere. **Proceedings of the 9th international conference on fracture mechanics of concrete and concrete structures**, [S.l.], p.1-8, 29 maio 2016. International Association for Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures.
<http://dx.doi.org/10.21012/fc9.130>.

CHO, H.; OH, D.; KIM, K.. A study on removal characteristics of heavy metals from aqueous solution by fly ash. **Journal of hazardous materials**, [S.l.], v. 127, n. 1-3, p.187-195, 9 dez. 2005. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.07.019>.

CINCOTTO, M. A.. Reações de hidratação e pozolânicas. In: ISAIA, G. C.. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 11. p. 381-414.

COELHO, P.. **Usinas termelétricas – a energia da combustão**. 2013. Disponível em:
<<http://www.engquimicasantosp.com.br/2015/06/usinas-termoeletricas-energia-combustao.html>>. Acesso em: 05 nov. 2016.

CORDEIRO, L. N. P. **Análise da variação do índice de amorfismo da cinza de casca de arroz sobre a atividade pozolânica**. 2009. 98p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS.

CROUCH, L. K.; HEWITT, R.; BYARD, B.. High volume fly ash concrete. **World of coal ash**, Northem Kentucky, 2007.

DAL MOLIN, D. C. C.. Adições minerais. In: ISAIA, G. C.. **Concreto: Ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 8. p. 261-310.

DAL MOLIN, D. C. C.; KIRCHHEIM, A. P.. Técnicas para estudo da microestrutura. In: ISAIA, G. C.. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2017. Cap. 14 p. 410 – 451.

DAMO, G. F.. **Avaliação do desempenho de diferentes agregados miúdos de britagem em concretos de cimento Portland**. 2011. 230 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

DAVIS, R. E.; CARLSON, R. W.; KELLY, JOE W.; DAVIS, H. E.. Properties of Cements and concretes Containing Fly Ash, **ACI journal, Proceedings**, V. 33, No. 5. p. 577-612, May-June, 1937.

DUNSTAN JUNIOR, E. R.. A Possible Method for Identifying Fly Ashes That Will Improve the Sulfate Resistance of Concretes. **Cement, concrete, and aggregates**, V. 2, No. 1, p. 20-30. Summer, 1980.

DUNSTAN JUNIOR, E. R.. Fly Ash and Fly Ash Concrete. **Bureau of Reclamation, Report REC-ERC-82-1**, p. 42, 1984.

DUNSTAN JUNIOR, E. R.. Performance of Lignite and Sub-Bituminous Fly Ash in Concrete. **Bureau of Reclamation, Report No. RECERC- 76**, Denver, 23 pp. 1976.

ENGIE. **Complexo Termelétrico Jorge Lacerda**. Disponível em: <<http://www.tractebelenergia.com.br/wps/portal/internet/parque-gerador/usinas-termeletricas/complexo-termeletrico-jorge-lacerda>>. Acesso em: 05 nov. 2016.

EVI, A. S.. A huge number of artificial waste material can be supplementary cementitious material (SCM) for concrete production – a review part II. **Journal of cleaner production**, [S.l.], v. 142, p.4178-4194, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.115>.

FEUERBORN, H.J., Coal combustion products in Europe e an update on production and utilization, standardisation and regulation. **World coal ash conference**, 2011, Dever, CO, USA.

FONSECA, A.. Bandeira da conta de luz seguirá vermelha Termelétricas vão ter que ser religadas. **Tribuna da Bahia**. Bahia, p. 1-1. 14 dez. 2005. Disponível em: <<http://www.tribunadabahia.com.br/2015/12/14/bandeira-da-counta-de-luz-seguira-vermelha>>. Acesso em: 05 nov. 2016.

FRAAY, A. L. A.; BIJEN, J. M.; HAAN, Y. M.. The reaction of fly ash in concrete a critical examination. **Cement and concrete research**, [S.l.], v. 19, n. 2, p.235-246, mar. 1989. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(89\)90088-4](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(89)90088-4).

FUNG, W. W. S.; KWAN, A. K. H.. Role of water film thickness in rheology of CSF mortar. **Cement and concrete composites**, [S.l.], v. 32, n. 4, p.255-264, abr. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.01.005>.

GARRAULT, S.; FINOT, E.; LESNIEWSKA, E.; NONAT, A.. Study of C-S-H growth on C3S surface during its early hydration. **Materials and Structures**, [s.l.], v. 38, n. 278, p.435-442, 15 fev. 2005. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1617/14343>.

GARTNER, E. M.. A proposed mechanism for the growth of C-S-H during the hydration of tricalcium silicate. **Cement and concrete research**, [s.l.], v. 27, n. 5, p.665-672, maio 1997. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(97\)00049-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(97)00049-5).

GARTNER, E. M.; YOUNG, J. F.; DAMIDOT, D. A.; JAWED, I.. Hydration of Portland cement. In: BENSTED, J.; BARNES, P.. **Structure and performance of cements**. 2. ed. London, UK: CRC Press, 2001. Cap. 3. p. 56-112. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/260425875_Hydration_of_Portland_Cement>. Acesso em: 09 maio 2018.

GAVA, G. P.. **Estudo comparativo de diferentes metodologias para avaliação da atividade pozolânica**. 1999. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

GIBERGUES, A. C.; HORNAIN, H. A.. durabilidade do concreto frente às reações expansivas de origem endógena. In:

OLLIVIER, J P; A VICHOT, . **Durabilidade do concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente.** São Paulo: IBRACON, 2014. Cap. 10. p. 327-432.

GRAEFF, E. R.. **Elevação de temperatura de concretos com baixo consumo de cimento e adição de cinza volante.** 2017. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

HADLEY, D.W; DOLCH, W.I; DIAMOND, S. On the occurrence of hollow-shell hydration grains in hydrated cement paste. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 30, n. 1, p.1-6, jan. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(99\)00207-0](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(99)00207-0).

HAIDER, U.; BRITTNAR, Z.; KOPECKY, L.; SMILAUER, V.; POKORNY, J.; ZALESKA, M.; PROSEK, Z.; HRBEK, V.. Determining the role of individual fly ash particles in influencing the variation in the overall physical, morphological, and chemical properties of fly ash. **Acta polytech**, [S.l.], v. 56, n. 4, p.265-283, 31 ago. 2016. Czech Technical University in Prague - Central Library. <http://dx.doi.org/10.14311/ap.2016.56.0265>.

HANEHARA, S.; TOMOSAWA, F.; KOBAYAKAWA, M.; HWANG, K. R.. Effects of water/powder ratio, mixing ratio of fly ash, and curing temperature on pozzolanic reaction of fly ash in cement paste. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 31, n. 1, p.31-39, jan. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(00\)00441-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(00)00441-5).

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P.. **Manual de dosagem e controle de concreto.** 2. ed. São Paulo: SENAI, 1992. 348 p.

HEMALATHA, T.; RAMASWAMY, A.. A review on fly ash characteristics – Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete. **Journal of cleaner production**, [S.l.], v. 147, p.546-559, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.114>.

HOPPE FILHO, J.. **Sistema cimento, cinza e cal hidratada: Mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto.** 2008. 318 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da

Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

HOPPE FILHO, J.; GOBBI, A.; PEREIRA, E.; QUARCIONI, V.A.; MEDEIROS, M. H. F. de. Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e Chappelle modificado. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 3, p.1-19, jun. 2017.

HOPPE FILHO, J.; SOUZA, D. J.; MEDEIROS, M. H. F.; PEREIRA, E.; PORTELLA, K. F.. Ataque de matrizes cimentícias por sulfato de sódio: adições minerais como agentes mitigadores. **Cerâmica**, [s.l.], v. 61, n. 358, p.168-177, jun. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132015613581905>.

HU, C.. Microstructure and mechanical properties of fly ash blended cement pastes. **Construction and building materials**, [s.l.], v. 73, p.618-625, dez. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.009>.

HUANG, C. H.; LIN, S. K.; CHANG, C. S.; CHEN, H. J.. Mix proportions and mechanical properties of concrete containing very high-volume of Class F fly ash. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 46, p.71-78, set. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.016>.

IGNJATOVIĆ, I.; SAS, Z.; DRAGAŠ, J.; SOMLAI, J. ; KOVÁCS, T.. Radiological and material characterization of high volume fly ash concrete. **Journal of environmental radioactivity**, [S.l.], v. 168, p.38-45, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.06.021>.

ISAIA, G. C.. A Evolução do Concreto Estrutural. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 1. p. 1-56.

JALAL, M.; FATHI, M.; FARZAD, M.. Effects of fly ash and TiO₂ nanoparticles on rheological, mechanical, microstructural and thermal properties of high strength self-compacting concrete. **Mechanics of materials**, [s.l.], v. 61, p.11-27, jul. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmat.2013.01.010>.

JEKNAVORIAN, A.; CHEUNG, J.; KOEHLER, E.; ZHOU, P.. **Fly ash concrete with low Portland cement content: Use of chemical to enable successful manufacture.** Michigan: American Concrete Institute, 2017. 8 p.

JUILLAND, P.; GALLUCCI, E.; FLATT, R.; SCRIVENER, K. L.. Dissolution theory applied to the induction period in alite hydration. **Cement and concrete research**, [s.l.], v. 40, n. 6, p.831-844, jun. 2010. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.01.012>.

JUNCKES, R.. **Influência da adição de cinza volante na elevação de temperatura de concretos aplicados em blocos de fundação.** 2015. 164 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, UFSC, Florianópolis, 2015.

KABAY, N.; TUFEKCI, M. M.; KIZILKANAT, A. B.; OKTAY, D.. Properties of concrete with pumice powder and fly ash as cement replacement materials. **Construction and building materials**, [S.l.], v. 85, p.1-8, jun. 2015. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.026>.

KASHANI, A.; NICOLAS, R. S.; QIAO, G. G.; DEVENTER, J. S. V.; PROVIS, J. L.. Modelling the yield stress of ternary cement–slag–fly ash pastes based on particle size distribution. **Powder technology**, [S.l.], v. 266, p.203-209, nov. 2014. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2014.06.041>.

KNUDSEN, T.. Kinetics of the Reaction of beta-C2S and C3S with CO2 and Water Vapor. **Journal of The American Ceramic Society**, [s.l.], v. 63, n. 1-2, p.114-115, jan. 1980. Wiley.
<http://dx.doi.org/10.1111/j.1151-2916.1980.tb10668.x>.

KOCABA, V.; GALLUCCI, E.; SCRIVENER, K. L.. Methods for determination of degree of reaction of slag in blended cement pastes. **Cement and concrete research**, [S.l.], v. 42, n. 3, p.511-525, mar. 2012. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.11.010>.

KWAN, A. K. H.; CHEN, J. J.. Adding fly ash microsphere to improve packing density, flowability and strength of cement paste. **Powder technology**, [S.l.], v. 234, p.19-25, jan. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2012.09.016>.

KWAN, A. K. H.; WONG, H. H. C.. Packing density of cementitious materials: part 2—packing and flow of OPC + PFA + CSF. **Materials and structures**, [S.l.], v. 41, n. 4, p.773-784, 5 jul. 2007. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-007-9281-6>.

LAM, L.; WONG, Y. L.; POON, C. S.. Effect of Fly Ash and Silica Fume on Compressive and Fracture Behaviors of Concrete. **Cement and concrete research**, [S.l.], v. 28, n. 2, p.271-283, fev. 1998. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(97\)00269-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(97)00269-x).

LARGENT, R. **Estimation de l'activité pouzzolanique**, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, LC C. 1978.

LAVAT, A. E.; TREZZA, M. A.; POGGI, M.. Characterization of ceramic roof tile wastes as pozzolanic admixture. **Waste management**, [S.l.], v. 29, n. 5, p.1666-1674, maio 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2008.10.019>.

LAWRENCE, P.; CYR, M.; RINGOT, E.. Mineral admixtures in mortars. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 33, n. 12, p.1939-1947, dez. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(03\)00183-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(03)00183-2).

LEE, C. Y.; LEE, H. K.; LEE, K. M.. Strength and microstructural characteristics of chemically activated fly ash–cement systems. **Cement and concrete research**, [s.l.], v. 33, n. 3, p.425-431, mar. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(02\)00973-0](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(02)00973-0).

LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D.. Supplementary cementitious materials. **Cement and concrete research**, [s.l.], v. 41, n. 12, p.1244-1256, dez. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001>.

LUKE, K.; LACHOWSKI, E.. Internal Composition of 20-Year-Old Fly Ash and Slag-Blended Ordinary Portland Cement Pastes. **Journal of The American Ceramic Society**, [s.l.], v. 91, n. 12, p.4084-4092, dez. 2008. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1551-2916.2008.02783.x>.

LUXÁN, M. P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J.. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity

measurement. **Cement and concrete research**, [s.l.], v. 19, n. 1, p.63-68, jan. 1989. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(89\)90066-5](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(89)90066-5).

LUXÁN, M. P.; SORIA, F.. Study and critical review of the pozzolanity test. **Cement and concrete research**, [s.l.], v. 5, n. 5, p.461-479, set. 1975. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(75\)90021-6](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(75)90021-6).

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K.. **Pozzolanic and cementitious materials**. Advances in Concrete technology, v. 1, Amsterdam, Holanda: Gordon and Breach Publishers, 1996.

MARQUES FILHO, J. Concreto Massa e Compactado a Rolo. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 39. p. 1399-1448.

MASSAZZA, F.. Pozzolana and Pozzolanic Cements. In: HEWLETT, P.C. (Ed.). **Lea's chemistry of cement and concrete**, 4.ed. p.471- 635. London, 2003.

MASSAZZA, F.. Pozzolana and Pozzolanic Cements. **Lea's chemistry of cement and concrete**, [s.l.], p.471-635, 1998. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-075066256-7/50022-9>.

MEHTA, P K; MONTEIRO, P J M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 742 p. Edição: Nicole Pagan Hasparyk.

MEHTA, P. K.; GJØRV, O. E.. Properties of Portland cement concrete containing fly ash and condensed silica-fume. **Cement and concrete research**, [s.l.], v. 12, n. 5, p.587-595, set. 1982. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(82\)90019-9](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(82)90019-9).

MILLS, R.; LOBO, V. M. M. **Self-diffusion in Electrolyte Solutions: A Critical Examination of Data Compiled from the Literature**. [s.l.] Elsevier, 2013.

MINARD, H.; GARRAULT, S.; REGNAUD, L.; NONAT, A.. Mechanisms and parameters controlling the tricalcium aluminate reactivity in the presence of gypsum. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 37, n. 10, p.1418-1426, out. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.06.001>.

MORAES, R. C.. **Efeito físico e pozolânico das adições minerais sobre a resistência mecânica do concreto**. 2001.

178 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

MYADRABOINA, H.; SETUNGE, S.; PATNAIKUNI, I.. Pozzolanic Index and lime requirement of low calcium fly ashes in high volume fly ash mortar. **Construction and building materials**, [s.l.], v. 131, p.690-695, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.038>.

NANOCEM. **Cement, concrete and emissions**: The need for research. 2016. Disponível em: <<http://www.nanocem.org/uploads/Modules/Resources/nanocem--factsheet-1---a4.pdf>>. Acesso em: 08 out. 2016.

NANTHAGOPALAN, P.; HAIST, M.; SANTHANAM, M., MLLER, H.. Investigation on the influence of granular packing on the flow properties of cementitious suspensions. **Cement and concrete composites**, [S.I.], v. 30, n. 9, p.763-768, out. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.06.005>.

NEVILLE, A. M.. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997. 738 p. Tradução: Salvador E. Giammusso.

NEVILLE, A. M.. **Propriedades do concreto**. 5. ed. São Paulo: Bookman, 2016. 912 p. Tradução de: Rui Cremonini.

NICOLEAU, L.; NONAT, A.; PERREY, D.. The di- and tricalcium silicate dissolutions. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 47, p.14-30, maio 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.01.017>.

NITA, C.. **Utilização de pozolanas em compósitos de cimento reforçados com fibra de celulose e PVA**. 2006. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

NOCHAIYA, T.; WONGKEO, W.; CHAIPANICH, A.. Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement-fly ash-silica fume concrete. **Fuel**, [S.I.], v. 89, n. 3, p.768-774, mar. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.003>.

PARK, C.k.; NOH, M.h.; PARK, T.h.. Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures. **Cement**

and concrete research, [s.l.], v. 35, n. 5, p.842-849, maio 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.11.002>.

PNE - Plano nacional de energia 2030. Ministério de Minas e Energia. Vol. 12. Brasília, 2007.

PONIKIEWSKI, T.; GOŁASZEWSKI, J.. The influence of high-calcium fly ash on the properties of fresh and hardened self-compacting concrete and high performance self-compacting concrete. **Journal of cleaner production**, [S.l.], v. 72, p.212-221, jun. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.058>.

PONTES, J. M. P. N.. **Reatividade de pozolanas para argamassa e betões**. 2011. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2011.

PONTES, J.; SILVA, A. S.; FARIA, P. Contributos para a melhoria da durabilidade e sustentabilidade de argamassas e betões - avaliação da reatividade de pozolanas artificiais. In: **Congresso construção**, 4., 2012, Coimbra. https://run.unl.pt/bitstream/10362/9489/1/Faria_2012.pdf.

POON, C. S.; LAM, L.; WONG, Y. L.. A study on high strength concrete prepared with large volumes of low calcium fly ash. **Cement and concrete research**, [S.l.], v. 30, n. 3, p.447-455, mar. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(99\)00271-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(99)00271-9).

POURBAIX; M.. **Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solution**. Houston, NACEm, 1974. p. 263-270.

RAM, L. C.; MASTO, R. E.. Fly ash for soil amelioration: A review on the influence of ash blending with inorganic and organic amendments. **Earth-science reviews**, [S.l.], v. 128, p.52-74, jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.10.003>.

RAMACHANDRAAN, V.; PAROLI, R.; BEAUDOIN, J.; DELGADO., A. **Handbook of thermal analysis of construction materials**. 691 p. USA, 2002.

RAMLOCHAN, T.; ZACARIAS, P.; THOMAZ, M. D. A.; HOOTON, R. D.. The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature. **Cement and concrete research**, [S.l.], v. 33, n. 6, p.807-814, jun. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(02\)01066-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(02)01066-9).

RAMLOCHAN, T; THOMAS, M.D.A; HOOTON, R.D. The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature. **Cement and concrete research**, [S.l.], v. 34, n. 8, p.1341-1356, ago. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.026>.

RASHAD, A. M.. An exploratory study on high-volume fly ash concrete incorporating silica fume subjected to thermal loads. **Journal of cleaner production**, [s.l.], v. 87, p.735-744, jan. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.018>.

RAVERDY, M.; BRIVOT, F.; PAILLÉRE, A. M.; DRON, R. Appreciation de l'actvite pouzzolanique dos constituents secondaires. In: **7th International congress on the chemistry of cement**, Paris, 1980.

RÊGO, J. H. S. **As cinzas de casca de arroz (CCAs) amorfa e cristalina como adição mineral ao cimento**: Aspectos de microestrutura das pastas. 2004. 274f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília. Brasília, 2008.

RÊGO, J. H. S. **Viabilidade Técnica da Utilização da Cinza de Casca de arroz produzida sem controle da temperatura como adição mineral ao cimento**. 2001, 200f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia. 2001.

ROHDE, G. M., ZWONOK, O., FRADIQUE, C., SILVA, N.. **Cinzas de carvão fóssil no Brasil: Aspectos técnicos e ambientais**. Vol. 1 Porto Alegre: CIENTEC, 2006. 202 p.

ROSZCZYNIANSKI, W.. Determination of pozzolan activity of materials by thermal analysis. **Journal of thermal analysis and calorimetry**, Budapest, v. 70, n. 1, p.387-392, jan. 2002.

SADIQUE, M.; COAKLEY, E.. The influence of physico-chemical properties of fly ash and CKD on strength generation of high-volume fly ash concrete. **Advances in cement research**, [s.l.], v.

28, n. 9, p.595-605, out. 2016. Thomas Telford Ltd..
<http://dx.doi.org/10.1680/jadcr.15.00103>.

SALUM, P. L.. **Efeito da elevação de temperatura sobre a resistência à compressão de concretos massa com diferentes teores de cinza volante**. 2016. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 2016.

SCHERER, G. W.; ZHANG, J.; THOMAS, J. J.. Nucleation and growth models for hydration of cement. **Cement and concrete research**, [s.l.], v. 42, n. 7, p.982-993, jul. 2012. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.03.019>.

SCHNEIDER, M.. Process technology for efficient and sustainable cement production. **Cement and concrete research**, [s.l.], v. 78, p.14-23, dez. 2015. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.014>.

SCRIVENER, K. L. The microstructure of concrete. In: SCALNY, J. P.. **Materials science of concrete I**. p. 127-161. USA, 1989.

SCRIVENER, K. L.; JUILLAND, P.; MONTEIRO, P. J. M.. Advances in understanding hydration of Portland cement. **Cement and concrete research**, [s.l.], v. 78, p.38-56, dez. 2015. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.025>.

SCRIVENER, K. L.; NONAT, A.. Hydration of cementitious materials, present and future. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 41, n. 7, p.651-665, jul. 2011. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.026>.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Dados do Setor**. 2017. Disponível em:
<<http://snic.org.br/numeros-do-setor.php>>. Acesso em: 20 ago. 2017.

SURANENI, P.; WEISS, J.. Examining the pozzolanicity of supplementary cementitious materials using isothermal calorimetry and thermogravimetric analysis. **Cement and concrete composites**, [S.l.], v. 83, p.273-278, out. 2017. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.009>.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 1. ed., London: Thomas Telford, 1992.

TEIXEIRA, C. E.. **Sobre a teoria da difração de raio-X em estruturas tridimensionais**. 2014. 145 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Escola de engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

THOMAS, J. J.; BIERNACKIB, J. J.; BULLARDC, J. W.; BISHNOID, S.; DOLADOE, J. S.; SCHERER, G. W.; LUTTGGEG, A.. Modeling and simulation of cement hydration kinetics and microstructure development. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 41, n. 12, p.1257-1278, dez. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.10.004>.

TORRES, I. F.; ANDRADE, T.. Risk analysis of the delayed ettringite formation in pile caps foundation in the metropolitan region of Recife - PE - Brasil. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**, [S.l.], v. 9, n. 3, p.357-394, jun. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952016000300003>.

TRIERWEILLER, A. C.; VIEIRA, D. F.; WEISE, A. D.; RIBEIRO, V. E. T.. Ações de responsabilidade social da empresa tractebel energia s/a – complexo jorge lacerda: os benefícios para capivari de baixo. **Seget – Simpósio de excelência em gestão e tecnologia**. Rio de Janeiro, p. 1-15. dez. 2008. Disponível em: <https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos08/334_Artigo%20final.pdf>. Acesso em: 06 nov. 2016.

TUTIKIAN, B. F.. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis**. 2007. 163 f. Tese (Doutorado) - Programa de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. R. L.. Dosagem de concreto de cimento Portland. In: ISAIA, G. C.. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 12. p. 415-452.

WANG, W.; LU, C.; YUAN, G.; ZHANG, Y.. Effects of pore water saturation on the mechanical properties of fly ash concrete. **Construction and building materials**, [S.l.], v. 130, p.54-63, jan.

2017. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.031>.

WEIDMANN, D. F.. **Contribuição ao estudo da influência da forma e da composição granulométrica de agregados miúdos de britagem nas propriedades do concreto de Cimento Portland**. 2008. 273 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

WHALEN, J. W. Physical chemistry of surfaces, fourth edition (Adamson, Arthur W.). **Journal of Chemical Education**, v. 60, n. 11, p. A322, 1 nov. 1983.

World Energy Resources: **Coal World Energy Council 2013**, https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/10/WER_2013_1_Coal.pdf, sighted 25 Mai 2017.

YAO, Z.T.; JI, X.S; SARKER, P.K.; TANG, J.H.; GE, L.Q.; XIA, M.S.; XI, Y.Q.. A comprehensive review on the applications of coal fly ash. **Earth-science reviews**, [S.l.], v. 141, p.105-121, fev. 2015. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.016>.

ZENG, Q.; LI, K.. Reaction and microstructure of cement–fly-ash system. **Materials and structures**, [S.l.], v. 48, n. 6, p.1703-1716, 16 fev. 2014. Springer Nature.

<http://dx.doi.org/10.1617/s11527-014-0266-y>.

APÊNDICE A

Traços utilizados no estudo em concreto

As quantidades apresentadas na tabela A 1 são referentes aos traços utilizados no desenvolvimento desta pesquisa. Todas as quantidades estão em kg/m³. Os traços estão organizados como rico, médio rico, médio pobre e pobre, de cima para baixo, para cada família de concreto. As famílias de concreto estão separadas pelo teor de substituição de cada CV.

Tabela A 1 - Proporcionamento dos materiais para confecção de 1 m³ de concreto

Família	Cimento	CV	Areia B	Areia N	Brita 19mm	Água inicial*	Água final**	Aditivo
Referência	496,1	0	338,0	338,0	1060,4	178,6	189,1	1,98
	403,5	0	386,4	386,4	1043,1	177,6	180,6	1,61
	340,0	0	421,2	421,2	1027,8	176,8	179,3	1,36
	293,8	0	448,1	448,1	1013,7	176,3	183,0	1,18
10% N	446,5	37,7	332,1	332,1	1070,5	174,3	189,0	1,94
	363,2	30,6	380,4	380,4	1053,1	173,3	185,0	1,58
	306,1	25,8	415,3	415,3	1037,8	170,9	172,6	1,33
	264,5	22,3	442,1	442,1	1023,7	172,1	174,5	1,15
20% N	396,9	75,3	326,2	326,2	1080,6	170,0	199,0	1,89
	322,9	61,3	374,5	374,5	1063,2	169,0	182,1	1,54
	272,1	51,6	409,4	409,4	1047,8	168,3	176,3	1,29
	235,1	44,6	436,2	436,2	1033,7	167,8	183,3	1,12
30% N	347,4	113,0	320,3	320,3	1090,6	165,7	192,8	1,84
	282,5	91,9	368,6	368,6	1073,2	164,7	184,7	1,5
	238,1	77,4	403,5	403,5	1057,8	164,1	177,7	1,26
	205,7	66,9	430,3	430,3	1043,6	163,6	181,8	1,09
35% N	322,6	131,8	317,3	317,3	1095,6	163,6	196,4	1,82
	262,4	107,2	365,7	365,7	1078,1	162,6	184,3	1,48
	221,1	90,34	400,5	400,5	1062,8	161,9	182,5	1,25
	191,0	78,06	427,3	427,3	1048,6	161,5	178,3	1,08

Continua na próxima página

Continuação da página anterior

Família	Cimento	CV	Areia B	Areia N	Brita 19mm	Água inicial*	Água final**	Aditivo
10% Mc	446,5	33,7	332,1	332,1	1070,5	172,9	177,9	1,92
	363,2	27,4	380,4	380,4	1053,1	164,6	171,9	1,56
	306,1	23,1	415,3	415,3	1037,8	162,7	171,1	1,32
	264,5	19,9	442,1	442,1	1023,7	170,6	171,5	1,14
20% Mc	396,9	67,3	326,1	326,1	1080,5	167,1	179,2	1,86
	322,9	54,8	374,5	374,5	1063,1	163,5	166,2	1,51
	272,1	46,1	409,4	409,4	1047,8	150,4	165,5	1,27
	235,1	39,9	436,2	436,2	1033,7	164,8	165,0	1,1
30% Mc	347,3	101,0	320,3	320,3	1090,6	161,4	177,9	1,79
	282,5	82,1	368,6	368,6	1073,1	157,5	160,5	1,46
	238,1	69,2	403,5	403,5	1057,8	156,9	159,8	1,23
	205,7	59,8	430,3	430,3	1043,6	159,3	172,1	1,06
35% Mc	322,6	117,8	317,3	317,3	1095,6	158,5	193,3	1,76
	262,4	95,9	365,7	365,7	1078,1	157,6	190,3	1,43
	221,1	80,8	400,5	400,5	1062,8	157,0	179,3	1,21
	191,0	69,8	427,3	427,3	1048,6	156,5	190,2	1,04

*Quantidade de água necessária para obtenção do abatimento de 80 ± 20 mm.** Quantidade de água necessária para obtenção do abatimento de 140 ± 20 mm, considerando a simulação do transporte.

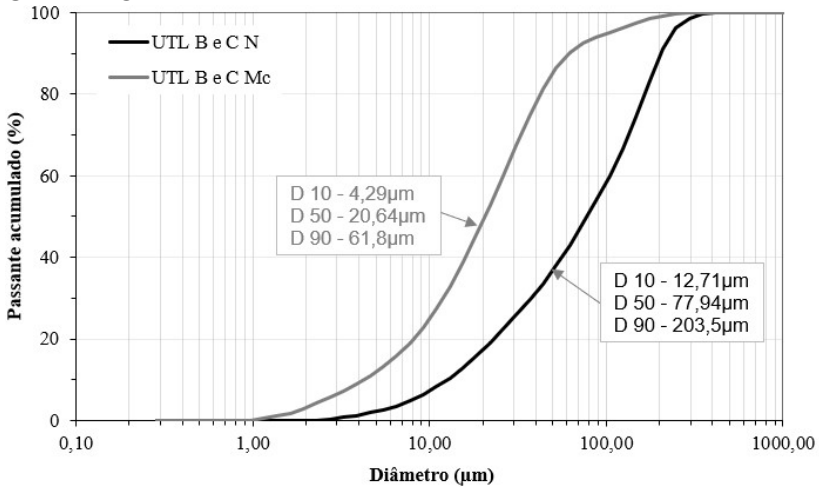
Fonte: Autor (2018).

APÊNDICE B

Distribuição do tamanho das partículas das CV utilizadas no estudo em concreto

A Figura B 1 ilustra as distribuições granulométricas das CV UTL B e C N; CV UTL B e C Mc.

Figura B 1 – Distribuição granulométrica da CV UTL B e C N; CV UTL B e C Mc



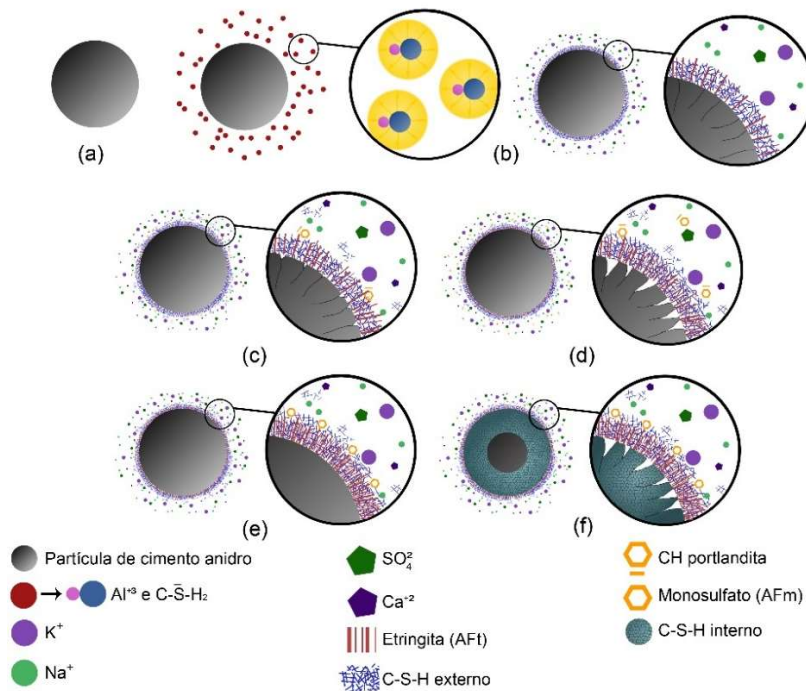
Fonte: Autor (2018).

APÊNDICE C

Hidratação do cimento contendo cinza volante

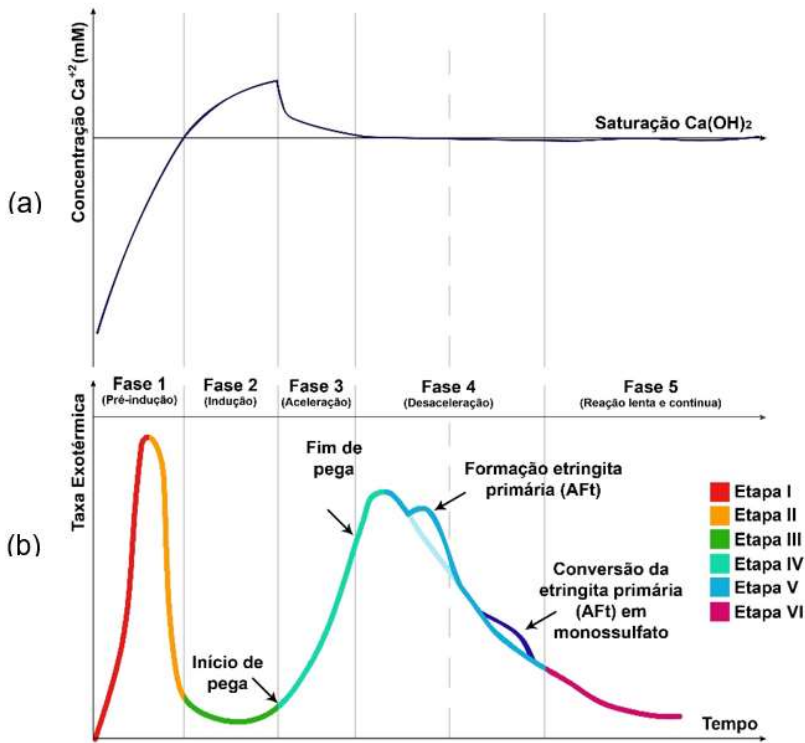
A Figura C 1 apresenta a cinética de hidratação do cimento Portland e suas 5 fases; a Figura C 2 mostra o diagrama de fluxo de calor em cada uma das fases. A Figura C 3 ilustra os mecanismos de influência da adição de MCS não reativos (a) e reativos (b) em uma pasta de cimento, como funciona para a cinza volante.

Figura C 1 – Diagrama esquemático de hidratação do cimento Portland



Fonte: Desenvolvido pelo autor com base em Scrivener (1989); Taylor (1992); Berodier (2015).

Figura C 2 – Diagrama representativo da cinética de hidratação do cimento Portland. a) Concentração de íons Ca^{+2} em solução; b) Taxa de liberação de calor



- | | |
|---|--|
| <p>I. Início do processo de dissolução</p> <p>II. Formação de etringita primária</p> <p>III. Constância da concentração de SO_4^{2-} e aumento da concentração de CH</p> <p>IV. Reações controladas pela nucleação. Aumento da taxa de hidratação do C_3A, desencadeando a formação do C - S - H, ocorrendo a precipitação do CH cristalinho</p> | <p>V. Total dissolução do CaSO_4, redução gradativa da taxa de SO_4^{2-} pela continuação da formação de AFt e adsorção no de C - S - H</p> <p>VI. Formação de novos hidratos pela reação entre os íons Al^{3+} e os íons Ca^{2+} remanescentes que adsorvem no do C - S - H</p> |
|---|--|

Fonte: Desenvolvido pelo autor com base em Taylor (1992); Gartner *et al.* (2001); Ramachandram *et al.* (2002).

A hidratação do cimento Portland é um processo complexo e dinâmico que é desencadeado pela combinação de cimento anidro em contato com a água. Isto causa a formação de produtos hidratados que resultam no endurecimento da pasta de cimento. Vários processos, que ocorrem simultaneamente, estão envolvidos na hidratação do cimento Portland, como a

dissolução, que é o destacamento de unidades moleculares da superfície das partículas de cimento (íons dissolvidos – soluto). As propriedades da interface solução-superfície da partícula sólida influenciam na dissolução, sendo a condição de saturação o fator limitante do processo, ou seja, a diferença entre a atividade iônica e a solubilidade da partícula em solução (JUILLAND *et al.*, 2010; NICOLEAU; NONAT; PERREY, 2013). A **difusão** é o transporte do soluto através da rede de poros entre as partículas cimentícias em suspensão (MILLS; LOBO, 2013). Na **complexação**, os íons dissolvidos são disponibilizados pela dissolução e colocados em contato pela difusão, resultando em íons complexos que permanecem em solução (MOREL; HERING, 1993). A **nucleação** é o aparecimento de pontos de precipitação de estruturas cristalinas ou amorfas, que podem ocorrer na solução saturada ou na superfície dos hidratos formados, pois sua superfície específica é maior que as partículas anidras (nucleação homogênea), ou na superfície do material não originados pelo processo de hidratação, como os MCS (nucleação heterogênea) (SCHERER; ZHANG; THOMAS, 2012). O **crescimento**: As unidades moleculares são incorporadas nas estruturas cristalinas e amorfas pré-existentes pela nucleação dos cristais nos pontos onde há precipitação de hidratos (BURTON; CABRERA; FRANK, 1951; GARTNER, 1997). E a **adsorção**: que é a ligação das unidades moleculares ou os íons em uma superfície sólida (WHALEN, 1983).

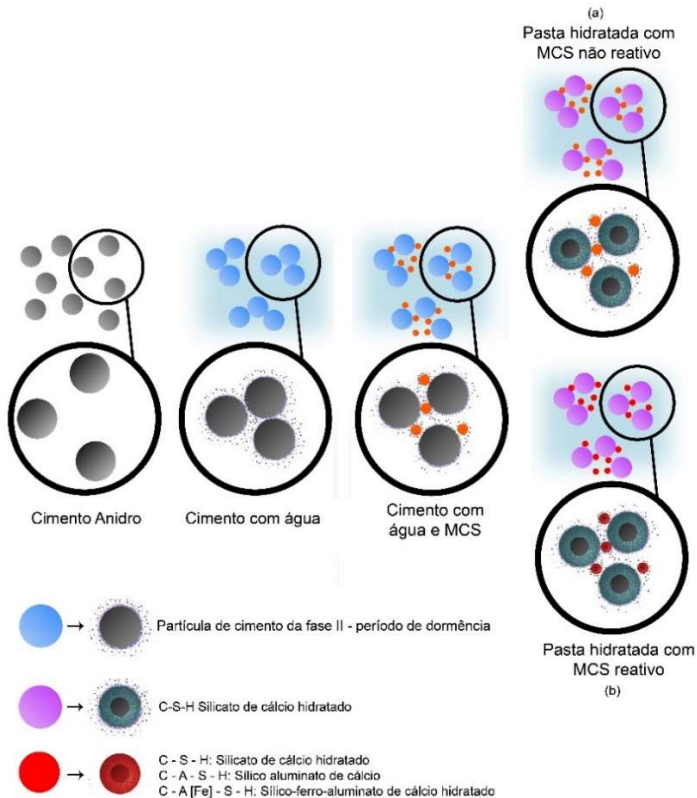
A teoria mais aceita atualmente para explicar a cinética de hidratação do cimento Portland constitui-se de dois mecanismos.

O 1º estágio (Figura C 1 b a f – Figura C 2 fases 1 a 4) é conhecido como *dissolução-precipitação geoquímica*, momento em que os compostos anidros se dissolvem em seus compostos iônicos em uma solução supersaturada, desencadeando a formação de hidratados que, devido à solubilidade baixa, são precipitados.

No 2º estágio (após Figura C 1 f – Figura C 2 fase 5), a reação chamada de *hidratação no estado endurecido* ocorre por difusão dos íons dissolvidos restantes através da solução de poros, pois

os em razão da densificação da pasta os espaços para nucleação e crescimento de novos cristais reduz expressivamente. Isto causa a queda da taxa de reação do sistema. Este processo também é conhecido como topoquímico (TAYLOR, 1992; RAMACHADRAN, *et al.*, 2002; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Figura C 3 – Efeitos dos sistemas cimento–MCS; a) Redução da tendência de floculação das partículas de cimento; b) Fenômeno da nucleação dos precipitados na fase 2 (Figura C 2) de hidratação das partículas de cimento



Fonte: Desenvolvido pelo autor com base em Lothenbach; Scrivener; Hooton, 2011; Berodier (2015).

A fim de facilitar o entendimento da hidratação do cimento Portland, foi desenvolvido um diagrama esquemático, com base em ilustrações, definições e conceitos consagrados, apresentados

por Scrivener (1989), Mehta e Monteiro (2014), e Scrivener, Juilland e Monteiro (2015).

A Figura C 1 é composta de 6 partes, de (a) a (f):

(a) Partícula de cimento anidro;

(b) A partícula anidra (fase 1 – Figura C 2) é posta em contato com a água, dando início ao processo de *dissolução ou pré-indução*, originando uma solução iônica. Nela, o Al^{3+} presente no (C_3A) e o C_3S , mais intensamente o C_3A , dissolvem, sendo liberados Ca^{+2} e OH^- , ocorrendo o pico térmico máximo da hidratação. Isto está relacionado ao equilíbrio das cargas presentes nas superfícies das partículas em suspensão, tanto reativas quanto não reativas. Ainda nesta etapa, o sulfato de cálcio (gesso) é dissolvido. Isto desencadeia a formação de monossulfoaluminato de cálcio hidratado (AFm), e em menor quantidade etringita (AFt) causando uma brusca redução da concentração de íons cálcio e sulfato de cálcio em solução. Minard *et al.* (2007), identificaram hidratos em forma de placas (AFm) e pequenas agulhas (AFt) incrustadas na superfície das partículas não dissolvidas. Isto foi observado em imagens obtidas por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) realizadas em pastas de cimento com apenas 5 minutos de hidratação. Neste mesmo período da hidratação do cimento, Garrault *et al.* (2005) identificaram a precipitação de C-S-H por nucleação após o pico de concentração de sílica em solução (Figura C 2 a). Nicoleau, Nonat e Perrey (2013) observaram, ainda no período de pré-indução, a formação inicial de entalhes (*etch pits*) na superfície da partícula anidra durante a dissolução do C_3S . Assim, não constância na taxa de hidratação, influenciando na intensidade da reação da hidratação do cimento.

(c) Esta fase, conhecida como período de indução ou período de dormência, (fase 2 – Figura C 2 b) é evidenciada pela diminuição considerável da taxa de hidratação. Nela, a baixa liberação de calor é assinalada, e perdura por algumas horas. A teoria mais aceita, recentemente, para elucidar este fenômeno é conhecida como *geoquímica*. A cinética da reação é explicada pela intensificação da reação, que ocorre somente quando a solução atinge certa concentração de Ca^{+2} . Esta concentração ocorre gradativamente pela dissolução dos íons cálcio e silicatos, estes últimos formam os pontos de nucleação cristalina. Além deste comportamento ser observado em outros minerais que também tem sua taxa de dissolução dependente da concentração

da saturação da solução, ela está em comum acordo com dados experimentais onde a cinética da reação é fortemente influenciada pelos defeitos de superfície das partículas em dissolução. (SCRIVENER; NONAT, 2011; BAZZONI; CANTONI; SCRIVENER, 2014; SCRIVENER; JULLAND; MONTEIRO, 2015).

Ainda no período de indução, a concentração de C-S-H é maior que a concentração de portlandita, que é constante neste período. O fim do período de indução é marcado pelo aumento da concentração de portlandita na solução (Figura C 2 (a) – fase 2). Isto contribui para insaturação da solução em relação ao C_3S , o que desencadeia a aceleração da hidratação. Na Figura C 2 (a) pode-se observar que o grau máximo de insaturação corresponde a máxima concentração de íon cálcio, o que coincide com o fim do período de indução. Quando o sistema é composto por cinza volante-cimento Portland, o SO_3^{-2} presente na CV torna-se fonte extra de sulfito, fazendo com que o período de dormência perdure por até uma hora a mais.

(d) A retomada da aceleração da hidratação marca esta fase (fase 3 – Figura C 2 b). Nesta fase ocorre a maior parte da precipitação e crescimento do C-S-H e da formação de CH, proporcionando, conseqüentemente, redução na concentração de Ca^{+2} na fase líquida. A taxa de hidratação do sistema é controlada pela nucleação e pelo crescimento dos produtos de hidratação, que por sua vez está relacionada a dissolução do C_3S . Durante o período de aceleração, a taxa da reação pode ser explicada como a derivada do grau de hidratação, dx/dt , com um gradiente de aumento de α^r , onde r varia no seguinte intervalo: $2/3 < r < 1$. Quando o sistema é composto somente de cimento puro, o C-S-H funciona como ponto de nucleação para a precipitação de novos hidratos. Já com a presença de MCS, reativos ou não, há modificações nos gradientes de hidratação, pois estas partículas influenciam na cinética de hidratação principalmente nas primeiras 24 horas pelos seguintes efeitos físicos: **Efeito de diluição:** A presença de MCS, em grande parte das situações, causa aumento relação água/aglomerante. Isto dificulta a supersaturação preponderante para a precipitação de novos hidratos. Além disso, ocorre a manifestação de maiores espaços entre as partículas, causando maior dificuldade na formação da rede de cristalina que proporciona o desenvolvimento da resistência da pasta. O **Efeito da distribuição granulométrica:** tem relação direta com a porosidade de empacotamento inicial do sistema, pois esta é

influenciada pela finura e pela quantidade de minerais disponíveis nas partículas. Assim, com uma maior densidade de empacotamento, as partículas ficam mais próximas, o que facilita a formação da rede de hidratos. O **Efeito da nucleação**: é dito como uma compensação do efeito de diluição, pois a hidratação do cimento é baseada no mecanismo de dissolução-precipitação. Como hipótese mais recente, aceita-se que o mecanismo da nucleação é regido pelas forças de cisalhamento entre as partículas que altera a distância interparticular, produzindo mais pontos de nucleação (LAWRENCE; CYR; RINGOT, 2003; MINARD et al., 2007; BENTZ; PELTZ; WINPIGLER, 2009; LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011; SCRIVENER; NONAT; 2011; NICOLEAU; NONAT; PERREY, 2013; BERODIER; SCRIVENER; 2014).

(e) Nesta fase (fase 4 – Figura C 2), conhecida como desaceleração, ocorre a total dissolução do sulfato de cálcio, e a concentração de íons diminui gradativamente, enquanto continua a formação de etringita, sendo o ponto de maior formação de AFt, além de o SO_4^{2-} ser adsorvido no escudo de C-S-H, sendo a hipótese mais aceita (MINARD et al., 2007). Marcado o pico de liberação de calor, ocorre a transformação de etringita (AFt) em monossulfato (AFm), pois, como a concentração de SO_4^{2-} reduz bruscamente até a sua extinção, a AFt reage com os íons Al^{3+} remanescentes, estabelecendo a fase de desaceleração. O AFm forma finas placas hexagonais cristalinas.

(f) Por fim (fase 5 – Figura C 2) a hidratação do cimento chega a sua última fase, conhecida como estágio final. Depois de boa parte do C_3S e C_3A hidratarem, a pasta de cimento se densifica a ponto de reduzir os espaços para nucleação e crescimento de novos cristais, o que causa a queda taxa de reação. Nesta fase o mecanismo predominante da cinética de hidratação do cimento é a difusão, deixando de ser a dissolução-precipitação, como era nas primeiras quatro fases. A velocidade de evolução da hidratação depende da capacidade dos reagentes de atravessarem a camada nano-porosa de hidratos que foi formada através das partículas anidras. Outro ponto a ser destacado é que apenas as partículas maiores estão disponíveis para reação de hidratação nesta fase, uma vez que as partículas menores que $3\mu\text{m}$ são consumidas até as 10 horas de reação e as partículas menores que $7\mu\text{m}$ reagem até 24 horas. A área específica é a característica responsável pela intensidade da

reação, sendo inversamente proporcional a velocidade de hidratação (KNUDSEN, 1980; HADLEY; DOLCH; DIAMOND, 2000; THOMAS *et al.*, 2011).

Como se observa no diagrama da Figura C 2, as reações de hidratação do cimento Portland iniciam após o contato das partículas de cimento com a água, passam por período de dormência, e reativam seu mecanismo, resultando em uma pasta rígida e, posteriormente, resistente e impermeável. A cinza volante pode iniciar sua influência na hidratação do cimento na fase 3 (Figura C 1 (d) e Figura C 2 b), onde a nucleação é preponderante no direcionamento da cinética de hidratação da pasta (Figura C 3 - b). Sua influência se mantém pelo efeito físico de redução da tendência natural da floculação das partículas de cimento (Figura C 3) que, por formarem flocos com partículas de cinza volante, onde anteriormente seria preenchido apenas por água, servem de ponto de nucleação heterogênea para aqueles produtos precipitados das partículas de cimento. Já a reação pozolânica da cinza volante inicia nas reações entre as fases (e) e (f) (Figura C 1). Para hidratar, as partículas de CV necessitam da saturação alcalina da solução para que ocorra a liberação da portlandita que, por sua vez, depende da hidratação do C_3S . A hidratação alita corresponde a aproximadamente 75% da hidratação de toda a massa de cimento. Desta forma, é possível que as reações do cimento e da cinza volante sejam investigadas isoladamente, desde que consideradas as influências mútuas dos dois processos (MASSAZZA, 2003). Entretanto, pesquisa mais recentes comentam que não é possível, em experimentos, separar a cinética da hidratação das partículas de cimento e de cinza volante em um sistema cimento Portland-cinza volante (LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011).

Em estágio mais evoluído, a superfície externa das partículas de cinza volante se altera, sendo recoberta por diversos compostos que, em seguida, formam agulhas de C-S-H (Figura C 3 a).

O C-S-H formado pela hidratação do sistema cal-cinza volante apresenta diferença apenas na quantidade, em relação àqueles formados na hidratação do cimento Portland (HOPPE FILHO, 2008).

A principal diferença entre a hidratação de sistemas cal-cinza volante e a do cimento Portland está na taxa em que os compostos são formados, e não em sua composição (TAYLOR,

1992; NEVILLE, 1997; RAMACHADRAN, *et al.*, 2002; MASSAZZA, 2003). Porém, Lothenbach, Scrivener e Hooton (2011) relatam que, a relação Ca/Si do C-S-H formado e sistemas de cimento Portland-cinza volante é menor que um sistema de cimento puro.

Cabe ressaltar, ainda, que a reação pozolânica em sistemas cimento Portland-cinza volante contribui, consideravelmente, para a durabilidade da pasta endurecida frente a meios ácidos. A razão para isso é que a portlandita residual, que é um cristal com alta solubilidade, é consumida, formando silicatos de cálcio hidratados em seu lugar. Além do uso da CV promover certo refinamento de poros da rede cristalina, pois os cristais de C-S-H, C-S-A-H e C-A[Fe]-S-H formados são menores que os cristais de portlandita.

A cinética de hidratação da cinza volante é diretamente influenciada por suas características físicas e químicas. A eficiência de suas reações é reduzida com o aumento da relação água/aglomerante, pois as partículas de cinza volante são afastadas das partículas de cimento Portland. Nesta situação, as partículas de CV não conseguem deflocular as partículas de cimento. Isto reflete no seu efeito físico, havendo pouca nucleação heterogênea. Como a concentração de Ca^{+2} reduz, há pouca formação portlandita (CH), o que interfere na cinética de hidratação da CV. O que retarda, expressivamente, a evolução da resistência da pasta (LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011).

A NBR 12653 (ABNT, 2015) classifica quimicamente, como pozolânicos, os materiais que apresentam teores de $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ maiores que 70%. Entretanto, como pode ser observado nos resultados obtidos nessa pesquisa e em outras pesquisas mencionadas, o teor de sílica não é o único, tão o pouco o principal indicador da pozolanicidade das CV investigadas. Os principais indicadores da taxa da reação pozolânica são o consumo do hidróxido de cálcio, em função da relação $Ca(OH)_2/CV$, e a quantidade de hidratos formada. Com isso, quando há interesse em investigar a influência de MCS em concreto deve-se avaliar sua capacidade de fixação do hidróxido de cálcio além de realizar estudos em argamassa para determinar a demanda de água e a taxa de evolução da resistência, conforme método proposto nesta dissertação.