



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA

COORDENAÇÃO DO CURSO SUPERIOR DE
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL



ALICE VITÓRIA SERAFIM BESERRA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE CONCRETO COM BAIXO TEOR DE
CIMENTO E ADIÇÃO DE BIOMASSA VEGETAL SUBMETIDO AO ATAQUE DE
ÍONS SULFATO**

Cajazeiras-PB
2019

ALICE VITÓRIA SERAFIM BESERRA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE CONCRETO COM BAIXO TEOR DE
CIMENTO E ADIÇÃO DE BIOMASSA VEGETAL SUBMETIDO AO ATAQUE DE
ÍONS SULFATO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba-
Campus Cajazeiras, como parte dos
requisitos para a obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Gastão Coelho de Aquino Filho
Coorientador: Robson Arruda dos Santos

Cajazeiras-PB
2019

IFPB / Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva
Catálogo na fonte: Daniel Andrade CRB-15/593

B554a

Beserra, Alice Vitória Serafim

Análise do comportamento de concreto com baixo teor de cimento e adição de biomassa vegetal submetido ao ataque de íons sulfato / Alice Vitória Serafim Beserra; orientador Gastão Coelho de Aquino Filho; coorientador Robson Arruda dos Santos.- Cajazeiras, 2019.-
92 f.: il.

Orientador: Gastão Coelho de Aquino Filho.

TCC (Bacharelado em Eng. Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2019.

1. Concreto 2. Empacotamento de partículas – Engenharia civil 3. Cinzas – Biomassa vegetal 4. Sulfato de sódio I. Título

691.32(0.067)

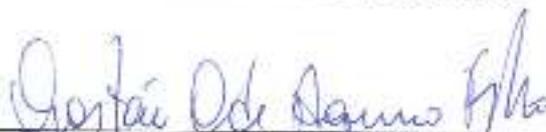
ALICE VITÓRIA SERAFIM BESERRA

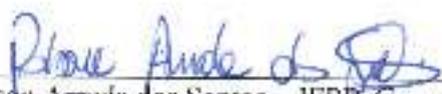
ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE CONCRETO COM BAIXO TEOR DE CIMENTO E ADIÇÃO DE BIOMASSA VEGETAL SUBMETIDO AO ATAQUE DE ÍONS SULFATO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Campus Cajazeiras como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 26 de setembro de 2019

BANCA EXAMINADORA


Gastão Coelho de Aquino Filho – IFPB-Campus Cajazeiras
Orientador


Robson Arruda dos Santos – IFPB-Campus Cajazeiras
Coorientador


José Lucas Pessoa de Oliveira – IFPB-Campus Cajazeiras
Examinador

Dedico este trabalho aos meus pais em especial, pela dedicação e apoio em todos os momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, grande arquiteto do universo, que me deu o dom da vida.

Aos meus pais, Franco e Mariquinha, por todo esforço, dedicação, conselhos e força para que pudesse me manter firme e com coragem para alcançar objetivos e sonhos. Aos meus irmãos, Clara e Augusto, que junto com eles me davam refúgio nas horas difíceis, estando do meu lado sempre.

Aos demais familiares, que sempre estiveram presentes, ajudando a completar essa caminhada.

À Heberton, pelo cuidado, paciência, força, palavras de consolo e superação, por deixar claro todos os dias o quanto eu era capaz.

Aos professores que fizeram parte da minha formação, tanto pessoal quanto acadêmica. Especialmente aos meus orientadores, Gastão Coelho de Aquino Filho e Robson Arruda dos Santos, que não mediram esforços em repassar todo conhecimento, pelo comprometimento e toda ajuda no desenrolar desse trabalho, me tranquilizando e me fazendo enxergar as decisões certas a serem tomadas para enriquecer o estudo.

Aos amigos e colegas do curso, em especial a sagrada família e agregados: Assis, André, Manu, Breno, Geovany, Landim, Alison, Leonardo e Vitor, que foram meu refúgio nos dias de saudade de casa, nos momentos mais difíceis e nos mais alegres também. Gostaria de abrir um parêntese para Leonardo, e agradecer mais uma vez, pois sem ele esse trabalho não estaria concluído, esteve comigo do início ao fim, me mostrando onde podia melhorar e me mantendo calma para conseguir a realização de um ótimo trabalho.

À Érica, Moacir, Mel e Ana Paula pela ajuda na execução dos ensaios nos laboratórios do *Campus*.

À banca examinadora pelas contribuições ao trabalho apresentado.

Ao IFPB – *Campus* Cajazeiras, pelas condições e estruturas disponibilizadas ao desenvolvimento dessa e de tantas outras pesquisas.

RESUMO

Diversos são os impactos negativos causados pela construção civil ao meio ambiente, motivados principalmente pela demanda e manuseio de recursos naturais. Nessa vertente, a indústria do cimento ganha destaque, este material apresenta-se como o segundo mais consumido pela construção civil, o qual, na sua fabricação, é responsável por cerca de 5% das emissões mundiais de CO₂. Alguns esforços e estratégias são tomados no intuito de reduzir essas emissões, entre eles têm-se os de cunho de produção, como o aumento da eficiência energética, melhoras no forno e utilização de combustíveis alternativos. Por outro lado, estudos e práticas da engenharia vêm explorando melhorias no desempenho do ligante a partir da redução do teor do mesmo na produção de compostos, como por exemplo, no concreto, através de métodos de dosagem como o empacotamento de partículas. Nesse sentido o presente estudo objetivou-se a avaliar o comportamento do concreto produzido com baixo teor de cimento, com adição de Cinza de Biomassa Vegetal (CBV) oriunda de olarias, exposto a um ambiente com alta concentração de sulfato de sódio. Para tanto, foi realizado um estudo experimental contando com uma caracterização dos materiais envolvidos, uma avaliação das alterações dimensionais de corpos de provas de argamassa e análise da fissuração das peças, testes físicos e mecânicos em concreto, submetidos a dois processos de cura, imersos em solução de sulfato de sódio ou em cura convencional, por até 80 dias. O traço de referência utilizado foi desenvolvido com o auxílio do software de empacotamento EMMA, onde reduziu-se o teor de cimento em 10, 15 e 20%, adicionando essa quantidade de CBV. O material de referência apresentou significativa redução na expansão ao ser exposto na solução de sulfato quando comparado às amostras submetidas à cura convencional. Quanto às misturas acrescidas de cinzas, essas apresentaram uma redução de resistência para a cura convencional e um melhor comportamento quando expostas ao meio agressivo de sulfato, tanto em resistência como em expansão para os traços de 10 e 15% de redução do cimento. Tornando a redução de até 15% do cimento e adição de CBV eficiente para meios agressivos.

Palavras-Chave: Concreto com baixo consumo de cimento; Empacotamento; Cinza de biomassa vegetal; Sulfato de sódio.

ABSTRACT

There are several negative effects caused by construction on the environment, mainly driven by the demand and handling of natural resources. In this regard, the cement industry is highlighted, or the material is the second most consumed by construction, which, in its manufacture, is responsible for about 5% of global emissions of CO₂. Some strategies and strategies are taken in order to reduce these restrictions, including production costs, such as increased energy efficiency, better furnaces and the use of alternative equipment. On the other hand, engineering studies and practices have been exploring performance improvements, from reducing the production content of compounds, such as concrete, through dosage methods or analysis packaging. In this sense, the present study aims to evaluate the behavior of concrete produced with low cement content, with addition of plant biomass ash (CBV) from pottery, exposed to an environment with high concentration of sodium sulfate. For this, an experimental study was carried out with a characterization of the involved materials, an evaluation of the dimensional changes of mortar specimens and analysis of cracking of parts, physical and mechanical tests in concrete, testing of two curing processes, immersed in solution. sulfate or conventional curing for up to 80 days. The reference method used was developed with the aid of EMMA packaging software, where it reduced the cement content by 10, 15 and 20%, adding this amount of CBV. The reference material showed significant reduction in expansion exposed sulfate solution when compared to samples subjected to conventional curing. As for the added ash mixtures, these conventional curing strength reductions and better behavior when exposed to aggressive sulfate media, both in strength and expansion for 10 and 15% cement reduction traits. Making cement reduction by up to 15% and the addition of CBV efficient for aggressive media.

Keywords: Concrete with low cement consumption; Packaging; Plant biomass ash; Sodium sulphate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Micrografia eletrônica de cristais hexagonais de monossulfato hidratado e cristais aciculares de etringita.	18
Figura 2: Classes de agressividade ambiental.	20
Figura 3: Causas físicas da deterioração do concreto.	20
Figura 4: Causas químicas da deterioração do concreto.	21
Figura 5: Produção nacional de cerâmica por região.	27
Figura 6: Esquema do processo produtivo do cimento.	29
Figura 7: Consumo per capita de cimento no ano de 2012 (em kg/hab).	30
Figura 8: Total bruto de emissões de dióxido de carbono no mundo em milhões de toneladas.	31
Figura 9: Resumo das etapas e procedimentos seguidos.	39
Figura 10: Faixas de agregado miúdo.	40
Figura 11: Ensaio de granulometria.	41
Figura 12: a) Molde de tronco de cone; b) Desmoronamento do agregado após retirada do molde.	41
Figura 13: Balança hidrostática adaptada.	42
Figura 14: Porcentagem retida do agregado.	43
Figura 15: Porcentagem passante do agregado.	44
Figura 16: Granulometria do cimento CP II F-32.	44
Figura 17: Ensaio tempo de início e fim de pega utilizando o aparelho de Vicat.	45
Figura 18: Granulometria da cinza de biomassa vegetal.	47
Figura 19: Determinação da massa específica da cinza de biomassa vegetal.	47
Figura 20: Criação de uma receita.	48
Figura 21: Criação de um novo material com inserção de características granulométricas e massa específica.	49
Figura 22: Seleção do modelo utilizado, coeficiente de distribuição e dimensões máximas e mínimas.	49
Figura 23: Quantidades ótimas de cada tipo de agregado.	50
Figura 24: Distribuição do tamanho das partículas.	50
Figura 25: Passos para dosagem do concreto e composição final do traço.	53
Figura 26: Sequência do processo de mistura em betoneira do concreto.	54

Figura 27: Corpos de prova traço de referência.	54
Figura 28: Corpos de prova do traço de referência desmoldados após 24 horas da moldagem.	55
Figura 29: Corpos de prova em tanque de cura.	55
Figura 30: Cura em solução de sulfato de sódio anidro.	56
Figura 31: a) Molde tronco-cônico; b) Mesa nivelada.	57
Figura 32: Misturador com copo adaptado.	57
Figura 33: Ensaio de consistência do tronco de cone- <i>slump test</i>	58
Figura 34: Resumo da quantidade de corpos de prova confeccionados.	59
Figura 35: Corpo de prova traço T10 retificado e rompido com tipo de ruptura E – cisalhada (NBR 5739, ABNT 2018).	60
Figura 36: Quantidade de corpos de prova confeccionados para cada traço.	60
Figura 37: Medição dos corpos de prova prismáticos com auxílio de paquímetro.	61
Figura 38: Corpos de prova prismáticos em solução de sulfato de sódio anidro.	61
Figura 39: Corpos de prova dos traços T0 e T10 após 72 horas em estufa.	62
Figura 40: Corpos de prova em recipiente para ebulição.	62
Figura 41: DRX da cinza de biomassa vegetal.	65
Figura 42: a) Aferição dos diâmetros perpendiculares da pasta; b) Desuniformidade dos diâmetros e exsudação da pasta.	67
Figura 43: Teor ótimo de aditivo plastificante.	67
Figura 44: Abatimento do tronco de cone para os traços analisados.	69
Figura 45: a) Slump T0; b) Slump T10; c) Slump T15; d) Slump T20.	70
Figura 46: Expansão média em porcentagem das argamassas devido ao ataque do sulfato. ...	71
Figura 47: Variação percentual dos traços T10, T15 e T20 em relação ao traço de referência T0.	71
Figura 48: a) Argamassa atacada pelo sulfato em comparação a b) argamassa curada em solução de água saturada com cal.	73
Figura 49: Absorção, índice de vazios e massa específica das amostras em solução de água saturada com cal.	74
Figura 50: Absorção, índice de vazios e massa específica das amostras em solução de sulfato de sódio anidro.	74
Figura 51: Visualização dos poros na superfície do concreto.	75

Figura 52: Resistência média a compressão dos traços estudados em cura normal e de solução saturada.....	76
Figura 53: Variação percentual dos traços com adição de CBV em relação ao traço de referência.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química do cimento Portland.	17
Tabela 2: Redução na permeabilidade com a evolução da hidratação em uma pasta de cimento de a/c igual a 0,7.	24
Tabela 3: Contribuição de emissão de gás carbônico de acordo com o combustível utilizado.	30
Tabela 4: Cálculo das emissões de CO ₂ por tonelada de clínquer a partir dos dados de WBCSD/IEA (2009).	32
Tabela 5: Massa específica agregado miúdo.	42
Tabela 6: Massa específica do agregado graúdo.	43
Tabela 7: Caracterização química do cimento CPIIF-32.	45
Tabela 8: Caracterização química da CBV.	46
Tabela 9: Proporções de agregados.	51
Tabela 10: Dados amostrais do ensaio de determinação do índice de vazios da mistura.	51
Tabela 11: Consumo de materiais por kg/m ³	52
Tabela 12: Abatimento do tronco de cone.	58
Tabela 13: Resistências médias aos 28 dias de argamassas com e sem adição de CBV.	64
Tabela 14: Dados representativos para composição final do traço.	68
Tabela 15: Traço final.	68
Tabela 16: Granulometria da areia 1.	87
Tabela 17: Granulometria da areia 2.	87
Tabela 18: Granulometria da areia 3.	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI COMMITTEE – American Concrete Institute

a/f – Relação água/finos

ANICER – Associação Nacional da Indústria da Cerâmica

CBV – Cinza de Biomassa Vegetal

CP – Corpo de Prova

CPFT – Porcentagem acumulada de partículas menores que o diâmetro da partícula em questão

CSI – The Cement Sustainability Initiative

EMMA – Elkem Material Mix Analyze

GNR – Getting the Numbers Right

IFPB – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba

MME – Ministério de Minas e Energia

SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

WBCSD/IEA – World Business Council for Sustainable Development/ International Energy Agency

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo geral.....	15
1.1.2	Objetivos específicos	15
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2.	REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1	CONCRETO E SUA MICROESTRUTURA.....	16
2.1.1	Durabilidade.....	19
2.1.1.1	Efeito dos íons sulfato no concreto	21
2.1.1.2	Absorção de água e permeabilidade.....	23
2.2	CONCRETO COM ADIÇÕES MINERAIS	24
2.2.1	Efeito das adições minerais no concreto.....	25
2.2.2	Cinza de biomassa vegetal	26
2.3	FABRICAÇÃO DO CIMENTO E SUA RELAÇÃO COM A PRODUÇÃO DE CO ₂ 27	
2.4	CONCRETO COM BAIXO CONSUMO DE CIMENTO.....	32
2.4.1	Formas de reduzir o consumo de cimento	33
2.5	EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS	34
2.5.1	Método de Furnas	36
2.5.2	Método de Andreasen & Andersen.....	37
2.5.3	Método de Alfred.....	38
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	40
3.1.1	Agregados	40
3.1.2	Cimento.....	44

3.1.3	Cinza de biomassa vegetal (CBV)	46
3.1.4	Aditivo	47
3.2	DOSAGEM DO CONCRETO	48
3.2.1	Empacotamento de partículas no software Emma	48
3.2.2	Determinação da relação a/c	50
3.2.3	Composição final do traço	51
3.3	PREPARO, CURA E MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA.....	53
3.4	ENSAIOS DESTRUTIVOS E NÃO DESTRUTIVOS	56
3.4.1	Ensaio de Kantro.....	56
3.4.2	Ensaio de Consistência (<i>Slump test</i>)	58
3.4.3	Ensaio de resistência – compressão axial	59
3.4.4	Expansão geométrica e volumétrica	60
3.4.5	Absorção de água e índice de vazios do concreto.....	62
4.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	64
4.1	AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DA CINZA	64
4.2	TRAÇO FINAL	66
4.3	CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO	69
4.4	EXPANSÃO GEOMÉTRICA	70
4.5	ABSORÇÃO E ÍNDICE DE VAZIOS.....	73
4.6	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	76
5.	CONCLUSÃO	79
	REFERÊNCIAS.....	80
	APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO.....	87
	APÊNDICE B – CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO.....	89

1. INTRODUÇÃO

O concreto, dentro da sua composição atual, passou historicamente por diversas transformações, desde alterações nos seus processos de produção, como também em seus constituintes. Essas modificações, associadas aos avanços tecnológicos e sociais, levaram a mistura a ser o produto mais utilizado dentro da construção civil e o segundo material mais consumido pela humanidade, sendo fabricadas no mundo anualmente cerca de 25 bilhões de toneladas de concreto, o que corresponde a aproximadamente 3,25 toneladas por pessoa (KLEE, 2009).

Essa acentuada utilização está diretamente relacionada à facilidade de produção, além das propriedades, tanto no estado fresco como endurecido, oferecidas pela mistura quando comparadas a outros sistemas construtivos, como é o caso das elevadas resistências à compressão, à água e ao fogo e a sua adaptabilidade e rapidez de construção, sendo moldado facilmente de diversas maneiras e geometrias (PEDROSO, 2009).

Segundo Ribeiro Júnior (2015), os agregados constituintes do concreto correspondem a três quartos do seu volume, sendo o restante equivalente à pasta formada pela reação entre o cimento e a água, a qual, envolve os agregados e apresenta grande responsabilidade sobre as propriedades da mistura, uma vez que tornam sua estrutura bastante heterogênea e complexa.

Dentre esses materiais, o cimento é considerado um elemento nobre para a mistura, formado basicamente pela combinação do clínquer com o sulfato de cálcio e adições, sendo as mais utilizadas o filer calcário, pozolanas e a escória. Ele é responsável por estabelecer as propriedades ligantes no concreto proporcionando rigidez e garantindo o bom desempenho no que diz respeito a resistência mecânica, além de ainda influenciar nas características reológicas da matriz (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI; 2011).

Sua produção está diretamente ligada ao uso do concreto, atingindo valores que ultrapassam o consumo em alimentação humana, aproximadamente 626 kg/per capita, equivalendo a 4,6 bilhões de toneladas de cimento produzidas no mundo, no ano de 2015 (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018). No Brasil, segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento-SNIC (2018), o consumo aparente no ano de 2018 ultrapassou a margem de 35 milhões de toneladas, deixando-o na posição de 5º maior consumidor de cimento do mundo. Tendo em vista esse consumo elevado e em consequência, a necessidade constante de intensa produção de cimento, atrelado ao crescimento da construção civil, é

notória a importância que a indústria cimenteira apresenta na economia mundial e consequentemente no Brasil.

No entanto, em contrapartida aos avanços proporcionados pelo setor da construção, bem como ao desenvolvimento econômico, vinculado direta ou indiretamente à indústria do cimento, têm-se os impactos ambientais causados na produção deste, principalmente no que diz respeito aos gases poluentes emitidos em quantidades excessivas na atmosfera, como o dióxido de enxofre (SO₂) e o dióxido de carbono (CO₂) (UWASU; HARA; YABAR, 2014).

Segundo Worrel et al. (2001), as emissões de dióxido de carbono na fabricação do cimento acontecem em dois momentos, devido à intensa energia utilizada na queima de combustíveis fósseis e pela calcinação da rocha calcária para a produção do clínquer nos fornos rotativos em temperaturas de até 1450°C. Sendo esse último responsável pela maior emissão de CO₂ na indústria do cimento, onde 44% do produto gerado corresponde a dióxido de carbono, logo para cada 1000 kg de carbonato de cálcio (CaCO₃) calcinado, 440 kg são de dióxido de carbono e 560 kg de óxido de cálcio.

As implicações ambientais causadas pela fabricação do cimento vêm se tornando uma grande preocupação nas indústrias e no meio acadêmico, em detrimento às exigências sociais e governamentais (COSTA et al., 2013). De modo a encontrar medidas que mitiguem esses impactos, alguns estudos vêm sendo desenvolvidos, como é o caso de Campos et al. (2018) que propôs a redução do teor de cimento na argamassa e no concreto, substituindo-o por adições de filer cerâmico e sílica ativa, encontrando valores de resistências semelhantes ao de referência; tem-se também a pesquisa realizada por Pereira (2010) avaliando a produção de concretos auto adensáveis de alta resistência, com baixa quantidade de cimento e adição de fibra de lã de rocha ou poliamida, apresentando resultados satisfatórios quanto a resistência a compressão e fissuração.

Embora existam várias pesquisas voltadas a analisar a redução do consumo de cimento na produção do concreto, muitas têm o seu foco direcionado a efeitos físicos e mecânicos, fazendo-se necessário uma avaliação mais ampla do comportamento dessa mistura de forma a possibilitar sua inserção no mercado. E nesse sentido, o presente estudo surge pela necessidade de avaliar o comportamento que esse tipo de concreto apresenta frente à ação de agentes agressivos, mais especificamente ao ataque do íon sulfato, encontrado normalmente diluído em água ou em solos pantanosos e de minas de sal, levando a degradação do concreto, ao produzir etringita pela reação com os aluminatos, silicatos e hidróxidos de cálcio da matriz cimentícia.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o comportamento do concreto quanto aos efeitos físicos, mecânicos e estéticos, quando produzido com biomassa vegetal em substituição parcial ao teor de cimento e submetido ao ataque do íon sulfato de sódio anidro.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Verificar o índice de pozolanicidade (IP) proporcionado pelas cinzas de biomassa vegetal;
- b) Utilizar a teoria do empacotamento de partículas na dosagem dos concretos;
- c) Analisar a influência da adição de biomassa vegetal em substituição ao cimento verificando quesitos de resistência;
- d) Analisar a variação dimensional e a fissuração de corpos de prova sujeitos a ambiente saturado em solução de sulfato de sódio anidro.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado e dividido em cinco capítulos. O primeiro destes é referente as considerações iniciais compostas de introdução e objetivos, gerais e específicos.

O segundo capítulo corresponde a revisão de literatura sendo abordados conteúdos relacionados a microestrutura do concreto, adições minerais, produção de CO₂ durante a fabricação do cimento e dosagem de concreto com baixo teor de cimento.

Os materiais e métodos empregados para a execução e detalhamento do estudo estão presentes no capítulo 3, constando todos os ensaios realizados e normas utilizadas.

O quarto capítulo traz a discussão dos resultados obtidos com o programa experimental. O quinto e último corresponde às considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CONCRETO E SUA MICROESTRUTURA

De acordo com Mehta e Monteiro (2014) a microestrutura corresponde a características como tipo, tamanho, distribuição e forma de todas as fases existentes em um sólido. Apesar do concreto ser um material em escala crescente de uso, o conhecimento sobre sua microestrutura ainda é escasso, demandando uma maior quantidade de estudos, visto sua complexidade e heterogeneidade. Logo, faz-se necessária a discussão sobre essa propriedade devido a sua influência em fatores importantes e determinantes no uso do concreto na engenharia, como resistência, retração, fissuração, fluência e durabilidade.

No concreto, as partículas de agregados são envolvidas por uma matriz porosa de pasta de cimento, com uma zona de transição entre tais componentes. Sendo assim, as particularidades da microestrutura do concreto podem ser estudadas fazendo uma conexão entre as suas três fases: fase agregado, pasta de cimento hidratada e a zona de transição na interface (LOPES, 2016).

A fase agregado representa cerca de 80 a 90% do volume do concreto e tem responsabilidade sobre propriedades como módulo de elasticidade, massa unitária e estabilidade dimensional do concreto. Estas estão diretamente ligadas às características físicas dos agregados, tais como volume, tamanho e distribuição dos poros, que associadas à porosidade e rugosidade, são responsáveis por alterações nas propriedades do concreto, influenciando na trabalhabilidade, relação água/aglomerante e no consumo de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Segundo Santiago (2011), a pasta de cimento hidratada é uma reunião relativamente heterogênea de partículas, filmes, microcristais e elementos sólidos, ligados por uma massa porosa contendo em seu estado primitivo porções com alguns vazios e soluções. Essa pasta é responsável pelo envolvimento dos agregados, o qual só é possível quando o cimento entra em contato com a água, provocando uma reação química denominada hidratação do cimento, que produz elementos relacionados à pega e endurecimento do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O processo de hidratação depende do tipo de cimento utilizado e seu módulo de finura, de adições minerais e químicas, da temperatura e da relação água/cimento (GONÇALVES; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, 2006). O tipo de cimento está diretamente ligado às fontes

de cálcio e aditivos utilizados na sua fabricação, sua composição determina suas propriedades como o calor de hidratação e o teor alcalino (WORRELL et al., 2001).

Os compostos de cálcio são os principais componentes dos cimentos Portland, no entanto, sua composição geralmente é expressa em óxidos dos elementos presentes ou compostos do clínquer, como mostra a Tabela 1 (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Tabela 1: Composição química do cimento Portland.

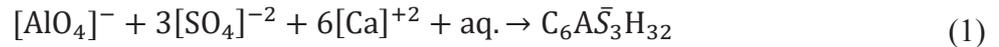
Óxido	Nome	Abreviação	Composto	Nome	Abreviação
CaO	Óxido de cálcio	C	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	Silicato tricálcico	C_3S
SiO ₂	Dióxido de silício- Sílica	S	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	Silicato dicálcico	C_2S
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio- Alumina	A	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	Aluminato tricálcico	C_3A
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro- Hematita	F	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	Ferroaluminato de cálcio	C_4AF
MgO	Óxido de Magnésio	M	$4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3$		$\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$
SO ₃	Anidrido sulfúrico	$\bar{\text{S}}$	$3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$		$\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$
H ₂ O	Água	H	$\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$		$\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_2$

Fonte: Adaptado Mehta e Monteiro (2014).

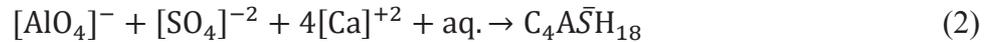
Sendo assim, o processo de hidratação consiste em reações simultâneas dos compostos anidros, constituintes do cimento, com a água. No instante em que estes entram em contato, o sulfato de cálcio e os compostos de cálcio começam a entrar em solução, transformando em uma velocidade muito rápida a fase então líquida em saturada, com a presença de vários tipos de íons. O resultado da interação entre cálcio, sulfato, aluminato e íons hidroxila, são cristais em formato de agulha de trissulfoaluminato de cálcio hidratado, também conhecido como etringita primária (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

As características da solução se alteram ao longo do tempo, aumentando a solubilidade dos aluminatos e a concentração destes se eleva novamente, após o sulfato ter sido consumido, em razão da renovação da hidratação do C_3A e do C_4AF . Esta nova concentração de íons pode tornar a etringita instável sendo convertida, em idades maiores, em monossulfoaluminato hidratado, tornando o concreto mais suscetível a danos causados pelo ataque de sulfato (GOMES, 2017). As reações químicas de formação desses elementos podem ser escritas da seguinte maneira:

- Etringita:

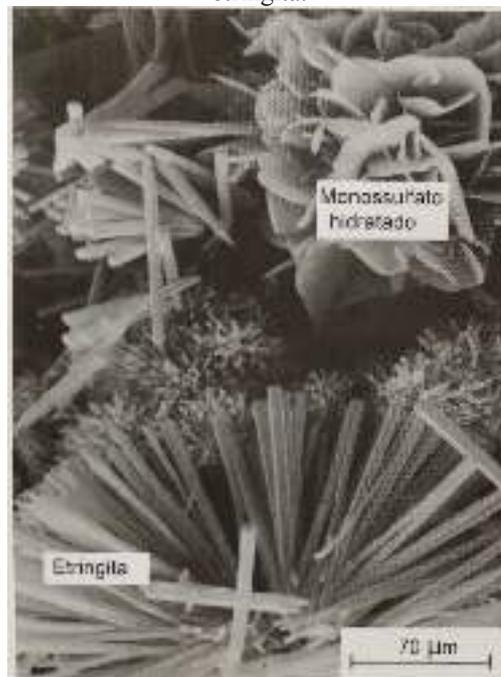


- Monossulfato:



A Figura 1 traz a micrografia dos cristais de monossulfato hidratado e de etringita formados durante a hidratação do cimento.

Figura 1: Micrografia eletrônica de cristais hexagonais de monossulfato hidratado e cristais aciculares de etringita.



Fonte: Metha e Monteiro, 2014.

Essas diversas partes na microestrutura da pasta de cimento hidratada não são uniformes, seja no tamanho, na distribuição ou na morfologia. Essa heterogeneidade pode desencadear efeitos negativos em propriedades mecânicas e reológicas do concreto. Além do que, essa pasta apresenta certa alcalinidade que pode ser desfavorável ao material quando exposto a águas ácidas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A última fase da microestrutura do concreto corresponde a zona de transição, que equivale a região de contato que se estende para fora da superfície do agregado ligando-se com a massa da microestrutura da pasta. Suas características microestruturais dependem da água de amassamento, do tipo de agregado, dos aditivos e adições, entre outros fatores e

influenciam diretamente em propriedades como a resistência mecânica. A zona de transição sendo porosa torna a matriz cimentícia fraca (SILVA, 2013).

A durabilidade das estruturas de concreto também é influenciada pela microestrutura da zona de transição. É comum observar rompimentos de elementos de concreto protendido e armado por corrosão de armadura, essa causa é variável da permeabilidade do concreto. E uma das razões para que o concreto se torne mais permeável que a pasta de cimento é a existência de microfissuras na zona de transição na interface com o aço e o agregado graúdo (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.1.1 Durabilidade

A NBR 6118 (ABNT, 2014) define durabilidade como “a capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto”. Sendo assim, uma estrutura durável pode então resistir a intemperismo, abrasão, ataque químico ou a qualquer outro modo de deterioração, mantendo sua forma original quando exposto a ambientes para os quais não foi projetado (ACI COMMITTEE 201, 2008).

Atualmente, tem-se dado maior importância aos quesitos de durabilidade pelos projetistas por esta está intimamente ligada a fatores econômicos e ambientais. Estima-se que, em países desenvolvidos industrialmente, 40% dos recursos das indústrias da construção são destinados ao reparo e manutenção de estruturas. Isso acarreta a constante procura por recursos naturais, portanto a utilização de materiais duradouros seria considerada uma atitude ecológica (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Fatores físicos e químicos relacionados ao ambiente em que a estrutura se encontra podem afetar sua durabilidade e vida útil, promovendo mudanças nas suas características. Um mesmo elemento se submetido a condições de agressividade ambiental variadas irá apresentar durabilidade diferenciada (REBMANN, 2011). A NBR 6118 (ABNT, 2014) classifica as classes de agressividade ambiental de acordo com a Figura 2.

Figura 2: Classes de agressividade ambiental.

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{1), 2)}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹⁾	Grande
		Industrial ^{1), 2)}	
IV	Muito forte	Industrial ^{1), 3)}	Elevado
		Respingos de marê	

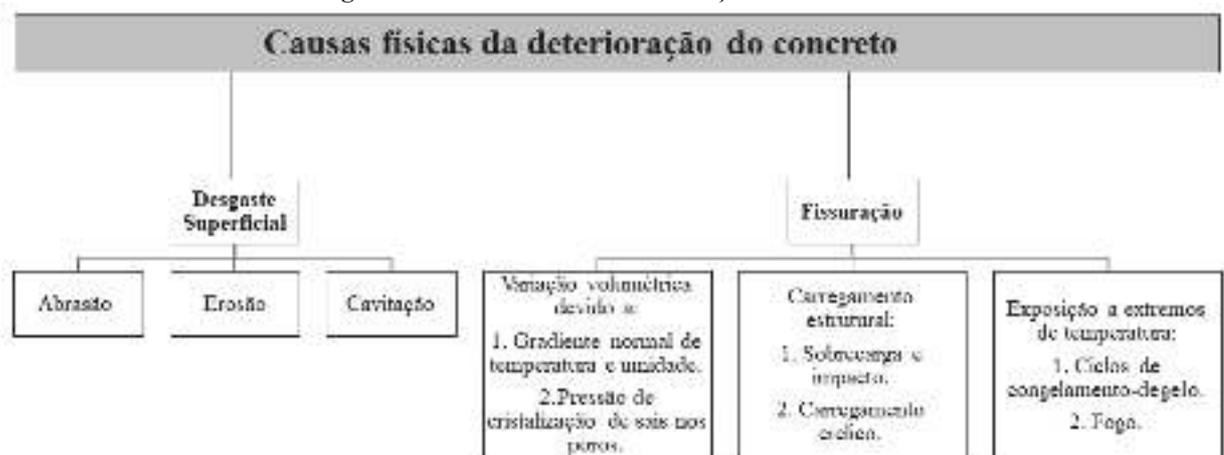
¹⁾ Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

²⁾ Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

³⁾ Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: ABNT NBR 6118, 2014.

Mehta e Monteiro (2014) dividiram as causas físicas em dois grupos, o primeiro correspondente ao desgaste superficial causado por fatores como abrasão e cavitação e o segundo diz respeito a fissuração, observada após variações de temperatura e umidade, carregamento estrutural, entre outros. A Figura 3 mostra as causas físicas e suas categorias de acordo com Mehta e Monteiro (2014).

Figura 3: Causas físicas da deterioração do concreto.

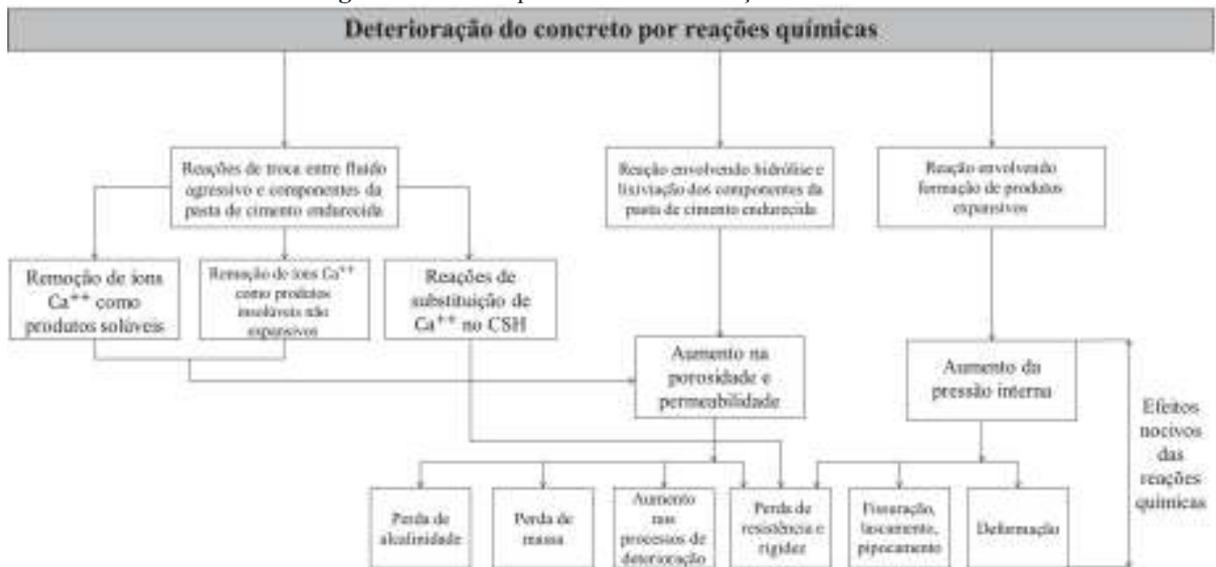
Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014).

As reações químicas não envolvem, precisamente, interações entre os agentes agressivos do ambiente e os componentes da pasta de concreto (Figura 4). Podem ocorrer entre minerais reativos dos agregados com álcalis presentes na pasta (reação álcali-agregado),

hidratação tardia do CaO e MgO cristalinos ou a formação de etringita tardia (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O produto dessas reações depende do tipo do agente agressor, no entanto as consequências são sempre as mesmas, englobando fissuras, descoramento e o destacamento do concreto, que em todos os casos virá acompanhado de perda de resistência (COSTA, 2004).

Figura 4: Causas químicas da deterioração do concreto.



Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014).

2.1.1.1 Efeito dos íons sulfato no concreto

Os fenômenos físico-químicos causadores de danos nas estruturas de concreto possuem inúmeras origens, se relacionam e reforçam mutuamente, tornando-se difícil separar causa e efeito. Os íons sulfatos, por exemplo, oriundos do meio, reagem com a portlandita formando subprodutos de caráter agressivo para matriz cimentícia (HOPPE FILHO et al., 2015).

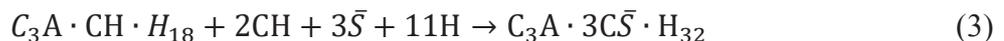
Não é difícil encontrar consideráveis concentrações de sulfato, pois é comum na maioria dos solos a presença do íon na forma de gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), em águas usadas em torres de resfriamento ou subterrâneas, poços de mineração e pântanos (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Esse íon é considerado um dos agentes mais agressivos de deterioração do concreto. Os meios mais conhecidos do seu ataque são: (1) reação com os produtos de hidratação do

cimento formando a etringita e (2) reação com o hidróxido de cálcio, tendo como produto o gesso. De acordo com o íon cátion que estiver ligado ao radical SO_4^+ , a intensidade do ataque pode variar, trazendo por ordem crescente de agressividade o sulfato de cálcio, seguido pelo de sódio e magnésio, terminando com o sulfato de amônia (COSTA, 2004).

Segundo Hoppe Filho et al. (2015), duas fases são observadas na degradação do concreto pelo ataque do sulfato, inicialmente ocorre um período de dormência, sendo caracterizado pela ação do material expansivo formado preenchendo os poros da estrutura e onde não é possível observar alterações significantes e, a segunda fase corresponde a uma considerável expansão, acarretando mudanças microestruturais, que traria como consequências perdas de resistência e fissuração.

Os componentes do cimento Portland, produtos da hidratação, que contém alumina ou hidróxido de cálcio são os mais vulneráveis aos íons sulfato, estes ao entrarem em contato se transformam na forma altamente sulfatada (etringita, $C_3A \cdot 3\overline{CS} \cdot H_{32}$), como mostra a equação 3.



Sabendo que a formação da etringita ocorre naturalmente como um processo da hidratação do cimento, ela vem a acarretar problemas quando é formada tardiamente pelo ataque dos sulfatos dos agregados, das fases minerais do clínquer que contém SO_3 , ou de forma externa pelos íons encontrados no meio como já mencionado (CENTURIONE, KIHARA, BATTAGIN, 2003).

As reações químicas de trocas de cátions também podem ter como produto a gipsita (sulfato de cálcio hidratado), esta agride o concreto reduzindo seu pH e causando perda de rigidez e resistência, seguidas consequentemente de expansões e fissurações (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

É possível observar que além da formação da gipsita, a reação do sulfato de sódio com o hidróxido de cálcio tem como produto o hidróxido de sódio, que consegue assegurar a alta alcalinidade do conjunto, mantendo a estabilidade do CSH (produto de hidratação). Embora essa estabilidade seja mantida, as consequências do ataque desse íon podem tomar grandes proporções, sendo assim a qualidade do concreto surge como a principal defesa, principalmente quando se trata da baixa permeabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Como a reação dos íons sulfatos ocorrem inicialmente com o aluminato de cálcio presente no cimento, Metha e Monteiro (2014) trazem que cimentos com teores menores que 5% de C_3A são suficientemente resistentes a sulfato.

2.1.1.2 Absorção de água e permeabilidade

Pode-se considerar a água como o principal agente para a maioria dos processos de deterioração do concreto, visto que esta serve de veículo para o transporte de íons agressivos pelo interior da estrutura. Além disso, tende a permanecer no estado líquido no interior dos materiais, devido ao seu alto ponto de ebulição, tornando o ambiente propício para a ocorrência de reações. Quando algumas dessas alterações resultam em volumes maiores do que os espaços vazios são capazes de suportar, novas tensões são geradas de intensidade suficiente para levar a ruptura ou deterioração da estrutura cristalina do elemento (SILVA FILHO, 1994).

Oldra (2015) define absorção de água como sendo o “processo físico pelo qual o concreto retém água nos poros e condutos capilares”. Esta depende diretamente da quantidade de poros que se comunicam com o exterior. Uma das características que definem esses poros é o volume de vazios ou quantidade de canais presentes no interior de um corpo, propriedade denominada porosidade. São esses canais que permitem a circulação da água e outros líquidos e gases e a troca de substâncias em solução que podem ser nocivas à estrutura. Apesar de não ser uma medida direta de qualidade do concreto, estudos comprovam que esta é dita boa, quando a absorção de água é inferior a 10% (REBMANN, 2011).

Nesse meio poroso, os fluidos podem se movimentar em função de uma diferença de pressão. A essa movimentação dá-se o nome de permeabilidade. A partir dela, pode-se medir o grau de facilidade da passagem de fluidos pelos canais do composto, o qual será determinante para a vulnerabilidade do concreto. Quanto maior a permeabilidade maior a facilidade de se ocorrer, por exemplo, corrosão, lixiviação e penetração de CO_2 (REBMANN, 2011).

O grau de hidratação e a porosidade inicial, que são função da relação a/c, são fatores que afetam diretamente a permeabilidade das pastas de cimento. No concreto, esta influi na interação pasta mais agregado, aqueles com maior empacotamento dos agregados apresentam menor permeabilidade, pois estes fecham o caminho de passagem da água (REBMANN, 2011).

Numericamente, a permeabilidade é apresentada pelo coeficiente de permeabilidade (K), dado pela expressão de Darcy (Equação 4):

$$\frac{dq}{dt} = K \frac{\Delta H A}{L \mu} \quad (4)$$

Onde:

$\frac{dq}{dt}$ = taxa de fluxo do fluido;

μ = viscosidade do fluido;

ΔH = gradiente de pressão;

A = área de superfície;

L = espessura do sólido.

No estado endurecido o coeficiente de permeabilidade será controlado pelo tamanho e continuidade dos poros. Com o progresso da hidratação, a porosidade capilar diminui, gerando como consequência uma redução no coeficiente (K) (Tabela 2).

Tabela 2: Redução na permeabilidade com a evolução da hidratação em uma pasta de cimento de a/c igual a 0,7.

Idade (dias)	Coeficiente de permeabilidade (cm/s x 10⁻¹¹)
Estado fresco	20000000
5	4000
6	1000
8	400
13	50
24	10
Final	6

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro, (2014).

A relação a/c é um fator que influencia consideravelmente na permeabilidade. Em geral quando esse valor é alto, atrelado a um baixo grau de hidratação, a pasta de cimento terá porosidade alta. A cura, o adensamento e o consumo de cimento adequados reduzirão a permeabilidade, visto que esses fatores contribuem para uma redução no volume dos vazios capilares da matriz cimentícia (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.2 CONCRETO COM ADIÇÕES MINERAIS

As adições minerais correspondem aos materiais que tem a função de somar ou mesmo substituir em proporções este aglomerante, podendo apresentar atividade (pozolanas)

ou apenas efeito físico (filer). O emprego destas adições reduz os gastos energéticos e o consumo de matéria prima.

Sua classificação se dá conforme a ação físico-química que desempenha no concreto, podendo variar entre três classes: materiais pozolânicos, material cimentante e filer (FONSECA, 2010). De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014), os materiais pozolânicos são materiais silicosos ou silicoaluminosos que possuem pouca característica ligante, porém quando divididos ou em contato com a água, reagem com o hidróxido de cálcio e formam compostos com propriedades cimentantes. Podem ser naturais, de origem vulcânica ou sedimentar, ou artificiais provenientes de tratamentos térmicos ou subprodutos industriais (cinzas volantes, sílica de casca de arroz, etc.).

A escória granulada de alto forno é um material cimentante capaz de formar produtos ligantes sem necessidade de reagir com o hidróxido de cálcio presente no cimento. O filer não apresenta atuação química, apenas física, atuando como efeito físico de empacotamento granulométrico (FONSECA, 2010).

2.2.1 Efeito das adições minerais no concreto

Ao utilizar uma adição mineral no concreto, dois efeitos são exercidos sobre ele. O primeiro, químico, diz respeito a produção de silicato de cálcio hidratado secundário (CSH secundário), através da reação pozolânica. O segundo, físico, corresponde a alterações na microestrutura da pasta de cimento, visto que as partículas sólidas das adições preenchem os vazios aumentando a compacidade da mistura. Com a redução dos vazios, a durabilidade do concreto irá aumentar, visto que haverá uma maior dificuldade para que os agentes agressivos penetrem na estrutura (DAL MOLIN, 2011, apud GOMES, 2017).

Segundo Mehta e Monteiro (2014) as adições minerais podem influenciar nas seguintes propriedades do concreto:

- a) Melhoria da trabalhabilidade: ao inserir partículas finamente divididas na massa de concreto fresco, que tem grande chance de exsudar ou segregar, os vazios são reduzidos em volume e tamanho, melhorando a sua trabalhabilidade. Nas misturas de concreto magro, a coesão e o acabamento tendem a melhorar. No entanto, apesar destas características serem melhoradas, nem todas as adições apresentam porte redutor de água, como por exemplo, a pedra pome e a cinza de casca de arroz demandam grande quantidade de água;

- b) Durabilidade à fissuração térmica: em condições normais, a temperatura máxima de um elemento de concreto é alcançada após três dias do lançamento do concreto. As adições minerais são capazes de reduzir essa temperatura em proporção direta à quantidade de cimento, pois estas não reagem consideravelmente durante muitos dias;
- c) Durabilidade ao ataque químico: a reação pozolânica em concretos com adições vem acompanhada de reduções na permeabilidade e no teor de hidróxido de cálcio do produto hidratado. Isso melhora a resistência da estrutura a agentes agressivos de natureza química, como a água ácida, água sulfatada e água marinha;
- d) Produção de concreto de alta resistência e alto desempenho: utilizando de aditivos redutores de água e adições minerais como cinza volante é possível produzir concreto de alta resistência e alto desempenho inicial.

2.2.2 Cinza de biomassa vegetal

Os processos industriais ou agroindustriais geram grande quantidade de resíduos que trazem ônus aos seus fabricantes, pelos custos com transporte, estocagem, tratamento ou destino final destes. As cinzas de biomassa vegetal são exemplos desses resíduos, gerados por processamento agroindustriais ou pela queima de outros resíduos. Por serem resultado de vários processos de geração de energia e secagem, atrelados a problemas de armazenamento e impactos ambientais apresentam lugar de destaque quando comparadas a outros resíduos industriais (LIMA, 2008).

A indústria de cerâmica vermelha é uma das responsáveis pela produção de cinzas. Essa indústria é produz materiais comumente utilizados na construção civil, como por exemplo, blocos, telhas e tijolos. Recebe a nomenclatura “vermelha” por possuir compostos ferrosos na sua composição (SEBRAE, 2015).

Segundo a Associação Nacional da Indústria Cerâmica – ANICER (2015) a produção estimada por ano é de 63,6 bilhões de peças, com aproximadamente 2 kg cada. Este valor faz com que a indústria cerâmica seja responsável por 90% das alvenarias construídas no Brasil. A Figura 5 mostra a produção nacional de cerâmica por região.

Figura 5: Produção nacional de cerâmica por região.

Fonte: SEBRAE, 2015.

Os processos de secagem e queima da indústria de cerâmica vermelha, representando 5% e 95% de toda energia consumida na fabricação de produtos cerâmicos, respectivamente, consomem grandes quantidades de combustível (SEBRAE, 2015).

O consumo de fontes energéticas para este tipo de cerâmica corresponde a: lenha, 48%, resíduos de madeira, 39%, outros combustíveis, 10% e eletricidade, 3% (MME, 2014). Sendo assim, a queima da lenha constitui o combustível mais empregado nas olarias e indústrias cerâmicas do Brasil e corresponde a geração de 3% de cinzas de olarias ou de biomassa vegetal (BORLINI et al., 2005). O termo biomassa pode ser usado para representar todas as plantas e derivados que podem ser usados como energia, como é o caso da madeira, por isso denomina-se cinza de biomassa vegetal (CAMPOS et al., 2014).

Segundo dados do Balanço Energético Nacional (EPE, 2016), 79,1 milhões de toneladas de lenha foram consumidas no país em 2016, o que equivale a cerca de 2,37 milhões de toneladas de cinza, quantidade considerável de resíduos sólidos.

Por apresentar riscos inerentes ao meio ambiente, como poluição de cursos de água, do solo e da atmosfera, as cinzas de biomassa vegetal vêm sendo utilizadas como adições minerais em concretos e argamassas de forma a minimizar as agressões ao ambiente, podendo resultar em melhorias no comportamento do cimento (CAMPOS et al., 2014).

2.3 FABRICAÇÃO DO CIMENTO E SUA RELAÇÃO COM A PRODUÇÃO DE CO₂

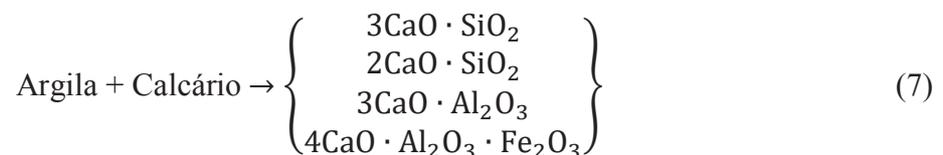
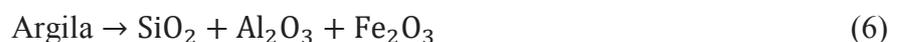
De acordo com Martinera e Scrivener (2015) existe um crescente aumento na indústria do cimento e conseqüentemente na fabricação de concreto. Esse se torna responsável por 6 a

8% das emissões de dióxido de carbono do mundo. A fabricação de cimento também é responsável por um consumo altamente intensivo em energia, consistindo em cerca de 2% do consumo de energia primária ou 5% do consumo total de energia industrial do mundo (WORRELL et. al, 2001).

O processo de fabricação pode ser por via úmida ou seca. No primeiro, a moagem e a homogeneização dos materiais utilizados são feitas na forma de uma lama formada de 30 a 40% de água. No entanto, atualmente, a indústria do cimento utiliza-se da via seca por apresentar maior eficiência energética (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Por via seca têm-se três etapas principais: preparação da matéria-prima, fabricação de clínquer no forno e fabricação do cimento (WORRELL et. al, 2001).

O calcário, gesso e a argila são as matérias-primas mais utilizadas na produção de cimento. Estas, após coletadas, são selecionadas e passam por operações de britagem, moagem e mistura, formando um composto chamado de farinha. Esse processo é necessário para garantir que se formem os compostos esperados para o clínquer de cimento Portland. Essa farinha moída é queimada a altas temperaturas, permitindo trocas de calor com os gases aquecidos, induzindo a calcinação dos materiais e, em seguida, a clinquerização para produção do clínquer (WORRELL et. al, 2001; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

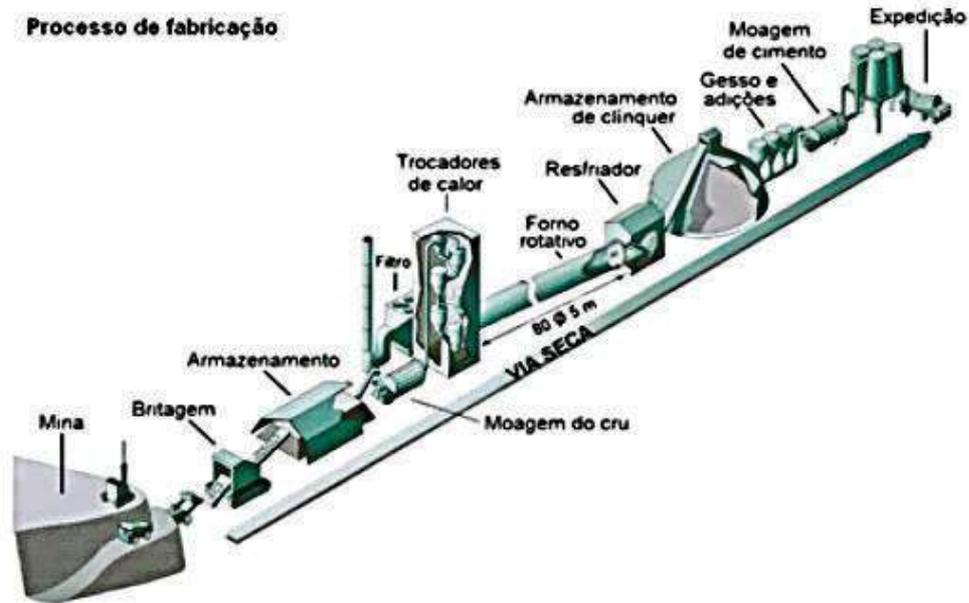
Na zona de calcinação dos fornos rotativos, de 1450°C a 1550°C, as reações químicas para a formação dos compostos do cimento Portland são completadas após a inserção de carvão pulverizado, óleo ou gás combustível na extremidade inferior da zona (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Essas reações podem ser expressas como mostradas a seguir:



A operação final acontece nos moinhos de bola onde ocorre a pulverização do clínquer em partículas entre 10 e 15µm. Para controlar as reações de pega e endurecimento do

cimento, são moídos juntos com o clínquer cerca de 5% de gipsita ou sulfato de cálcio (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Todo o processo encontra-se resumido na Figura 6.

Figura 6: Esquema do processo produtivo do cimento.

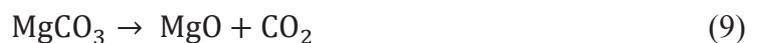


Fonte: ABCP, 2012.

A combustão dos combustíveis fósseis e a calcinação do calcário na mistura bruta são as principais etapas responsáveis pela emissão de dióxido de carbono. No entanto, uma pequena fonte de emissão é o consumo de energia, com intensidade significativamente menor do que os dois primeiros processos, visto que cada um destes é responsável por aproximadamente metade do CO_2 emitido. Os processos de calcinação e clínquerização estão descritos como nas equações 8 e 9. O óxido de cálcio (CaO) corresponde de 64 a 67% do clínquer, o restante corresponde a óxidos de silício, de ferro e de alumínio. Sendo assim as emissões de CO_2 na produção do clínquer são de cerca de 0,5 kg/kg (WORRELL et al, 2001). No entanto, vale salientar que o teor de clínquer varia de acordo com o tipo de cimento, acarretando em uma ampla variação nas emissões de dióxido de carbono (REBMANN, 2011).



$$1 \text{ kg} \rightarrow 0,56 \text{ kg} + 0,44 \text{ kg}$$



Segundo Worrell et al. (2001), a quantidade de dióxido de carbono emitida durante a queima de combustível nos fornos rotativos é influenciada diretamente pelo tipo de combustível que está sendo utilizado, podendo ser, por exemplo, carvão, gás natural, coque de petróleo ou combustíveis alternativos. Os combustíveis alternativos ainda são pouco usados, porém têm surgido nos últimos anos como prática para reduzir custos e a intensidade das emissões de gás carbônico. Por outro lado, em alguns países estes ainda não se encontram disponíveis ou existe uma certa dificuldade em se obter permissões para o uso. O Brasil, no ano de 2014, ainda tinha 85,6% dos seus combustíveis sendo os convencionais (CSI, 2016b). A Tabela 3 mostra a intensidade de carbono de acordo com os combustíveis utilizados.

Tabela 3: Contribuição de emissão de gás carbônico de acordo com o combustível utilizado.

Combustível	Intensidade de carbono emitido (kg CO₂/GJ)
Carvão	96
Óleo combustível	77,4
Gás	56,1
Papel	110
Pneus	85
Resíduos industriais misturados	83

Fonte: CSI, 2016b (adaptado).

Mundialmente, a Ásia apresenta-se como líder do consumo de cimento, este está diretamente ligado às atividades econômicas e de construção (Figura 7).

Figura 7: Consumo per capita de cimento no ano de 2012 (em kg/hab).

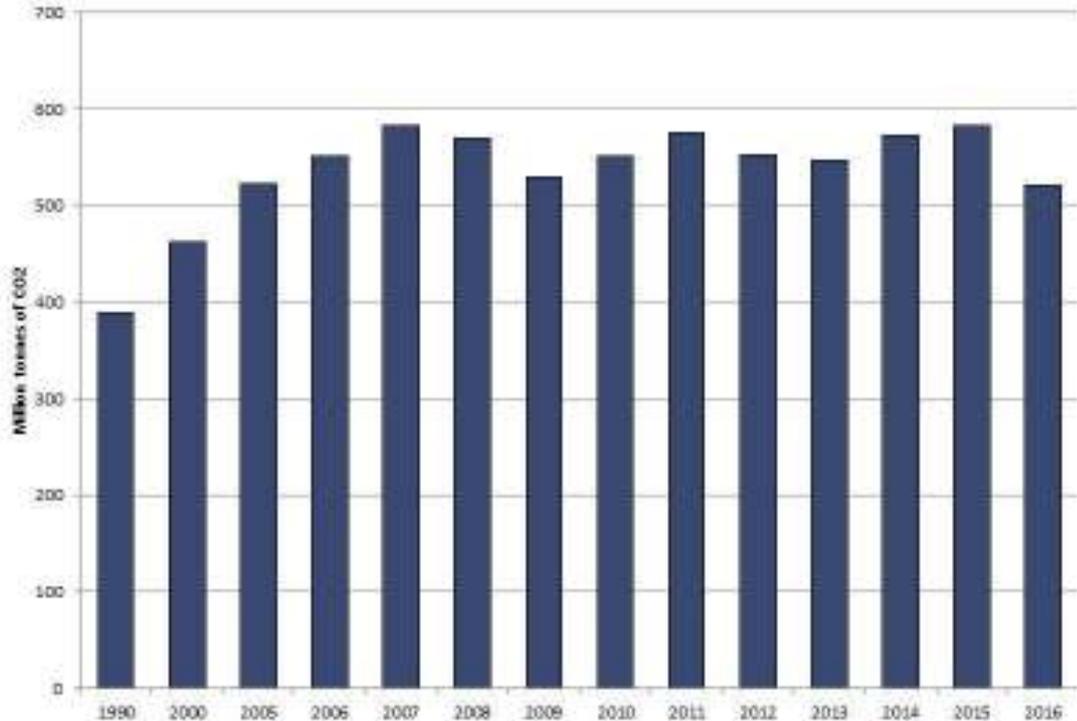


Fonte: SNIC, 2013.

A consequência desse consumo gera um impacto ambiental alarmante. Em cerca de 26 anos, foram emitidas mais de 7 bilhões de toneladas de CO₂ no mundo (Figura 8). Deste valor,

o Brasil foi responsável por aproximadamente 4,4%, o equivalente a 333 milhões de toneladas de dióxido de carbono emitidas (CSI, 2016a).

Figura 8: Total bruto de emissões de dióxido de carbono no mundo em milhões de toneladas.



Fonte: CSI, 2016.

Sendo responsável por 88,6% a 92,2% das emissões de CO₂ da indústria do concreto, a indústria cimenteira está instigada a procurar medidas que as reduzam. Uma das estratégias mais conhecidas é a redução do teor de clínquer no cimento, sendo substituído por adições minerais na fabricação (OLIVEIRA et al., 2014). Uma segunda alternativa seria um menor consumo de concreto nas estruturas ou ainda reduzir o próprio consumo de cimento (METHA; MERYMAN, 2009). Caso estas três ações fossem aliadas e concretizadas em conjunto poderia haver uma redução de 40 a 50% no consumo de clínquer, cuja fabricação é a principal etapa de emissão de CO₂ (REBMANN, 2011).

Segundo a WBCSD/IEA (2009), a produção global de cimento deve crescer de 12 a 23% até 2050. Isso acarretaria um crescimento considerável nas emissões de CO₂, no entanto, a indústria de cimento está migrando para sistemas mais eficientes de produção, em 2011 mais de 68% já ocorria por via seca. Considerando um cenário de melhorias na fabricação seria possível reduzir em 40% até 2050 as emissões de dióxido de carbono em relação ao ano de 2012 (Tabela 4).

Tabela 4: Cálculo das emissões de CO₂ por tonelada de clínquer a partir dos dados de WBCSD/IEA (2009).

Ano	2012	2015	2020	2025	2030	2050
Teor de clínquer	0,77	0,76	0,74	0,735	0,73	0,71
kg CO ₂ /t cimento	750	660	620	590	560	420
kg CO ₂ /t clínquer	974,03	868,42	837,84	802,72	767,12	591,55

Fonte: Adaptado de Daminieli, 2013.

2.4 CONCRETO COM BAIXO CONSUMO DE CIMENTO

Segundo Rebmann (2016) é possível observar um enorme potencial no controle ou mitigação do impacto ambiental causado pela produção de cimento, reduzindo o consumo do mesmo. Essa redução que vai além das questões ambientais, técnicas e econômicas, diz respeito à sustentabilidade e viabilidade do negócio do cimento. Uma vez que, se a fabricação deste cresce, proporcionalmente, haverá um maior consumo energético que pode ser restringido pelo mercado de energia, que depende diretamente da economia internacional e de questões ambientais (REBMANN, 2011).

Portanto, as vantagens de se produzir um concreto com reduzido consumo de cimento não estão apenas na garantia de longevidade das jazidas de matérias primas ou no controle das emissões de CO₂, do ponto de vista técnico também pode ser agente mitigador de patologias que possuem origem na utilização de um alto consumo de cimento (REBMANN, 2011).

Segundo Rebmann (2011), a retração é um dos fenômenos de estabilidade dimensional do concreto que são influenciados pelo consumo de cimento e pode ser subdividida nas etapas antes e após o endurecimento. Quando o concreto ainda se encontra fresco, esse processo pode acontecer devido ao assentamento plástico ou à retração plástica. Sendo o primeiro fruto dos fenômenos de sedimentação e exsudação, dessa forma traços com baixo consumo de cimento apresentarão maior tendência a estes fenômenos. No entanto, ajustando a granulometria dos agregados e adicionando finos para formar um esqueleto granular compacto, é possível reduzir essa tendência.

Ainda segundo o autor, a retração plástica diz respeito a contração de Le Chatelier e a retração autógena. Esta contração é mais comum e de maior intensidade à medida que se aumenta o consumo de cimento, a relação a/c e a proporção de finos no concreto.

A eliminação de água da estrutura é a causa para a retração no estado endurecido do concreto. Logo, com um reduzido teor de pasta de cimento, ocorrerá uma retração com menor intensidade, visto que é apenas a pasta que sofre esse fenômeno. As reduções de retração no

concreto também podem ser aplicadas para a fluência, o que acarreta vantagens para o uso em estruturas protendidas (REBMANN, 2011).

A durabilidade do concreto também é favorecida devido a um sistema de poros com maior tortuosidade, fruto de um esqueleto granular bem empacotado e de uma microestrutura hidratada refinada (REBMANN, 2016).

2.4.1 Formas de reduzir o consumo de cimento

Com a associação de diversos fatores é possível produzir um concreto com baixo consumo de cimento sem comprometer suas propriedades, sejam elas no estado fresco ou endurecido (REBMANN, 2016). Esses fatores devem passar por:

- a) Dispersão de partículas: devido a uma massa reduzida e alta área superficial, as partículas finas apresentam grande tendência a permanecer juntas, fazendo com que as forças de superfície sejam maiores que as gravitacionais. Como não ocorre o equilíbrio entre essas forças, são gerados esforços de atração maiores que de repulsão. Sendo assim, esses aglomerados funcionam como partículas menores o que leva a uma modificação na granulometria do material, a dificuldade de mobilidade das linhas de fluxo (ocorre um aumento de viscosidade), a uma geração de vazios aumentando o consumo de água e a redução da eficiência dos ligantes (DAMINELI, 2013). Sendo assim, dispersar os grãos é medida importante para fazer o empacotamento funcionar. Isso pode ser obtido utilizando-se de aditivos dispersantes, que apresentem compatibilidade com o tipo de cimento utilizado (REBMANN, 2016);
- b) Empacotamento de partículas: utilizando de uma melhoria no arranjo granulométrico das partículas, que reduz o volume de vazios, o empacotamento de partículas aumenta a compactação do conjunto, beneficiando suas propriedades reológicas durante a mistura enquanto o concreto permanecer no estado plástico (LIMA et al., 2016);
- c) Uso de finos inertes: aqueles que apresentam a mesma granulometria que o aglomerante, podem atuar como uma substituição. Quando com granulometria mais fina atuam como uma adição aprimorando o empacotamento da pasta de cimento (REBMANN, 2016);
- d) Uso de materiais pozzolânicos: adicionando estes materiais no concreto pode-se ter como resultado uma melhora na interface da pasta com os agregados, além dela como

- um todo, o que diminui consideravelmente o tamanho e a quantidades de poros, tornando o concreto mais resistente com menor porosidade (REBMAN, 2011);
- e) Escolha adequada dos finos e agregados: é preciso conhecer a morfologia dos grãos para que ao inserir finos na mistura, estes contribuam na granulometria das partículas e não venha a causar um aumento na utilização de água (REBMANN, 2016). Essa contribuição também é esperada pelos agregados, pois com escolhas certas se pode reduzir o consumo de pasta que é fundamental para garantir a mobilidade dos grãos (WALLEVIK; WALLEVIK, 2011);
 - f) Mistura adequada: segundo Wallevik e Wallevik (2011), o tipo e proporção do aparelho misturador e a sequência da mistura podem afetar a reologia do concreto no seu estado fresco. Opções que tendem a garantir a homogeneidade e dispersão de partículas, além do momento mais apropriado para o lançamento do aditivo, podem afetar a trabalhabilidade ou precisarem de um menor consumo de água, o que levaria a uma redução no cimento (CASTRO, 2007);
 - g) Uso de técnicas de caracterização reológica: Rebmann (2016) afirma que as técnicas de caracterização reológica podem ser utilizadas nas etapas iniciais ou finais da produção de concreto, envolvendo medidas que estabeleçam as proporções dos materiais e o consumo de aditivo durante a dosagem, assim como na fiscalização da qualidade do concreto posteriormente;
 - h) Tipos de cimento: cada tipo de cimento apresenta uma composição química e física que influem diretamente em propriedades do concreto como cinética de hidratação, trabalhabilidade e resistência.

2.5 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

Desde meados do século XX, pesquisadores vêm estudando os efeitos da distribuição granulométrica dos agregados sobre o empacotamento das partículas, de forma a encontrar uma curva granulométrica considerada ideal para se utilizar em concretos (LONDERO et al., 2017). No entanto, ultimamente, o empacotamento vem se tornando alvo de interesse em diferentes áreas da engenharia, devido a utilização diária de materiais naturais ou industriais formados por partículas de diferentes formas e tamanhos (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

Castro e Pandolfelli (2009) definem o empacotamento de partículas como sendo a procura por partículas de tamanho e proporções adequados, de modo que os vazios maiores sejam preenchidos por fragmentos menores e assim sucessivamente.

Essa busca por um esqueleto granular compacto, com máxima densidade de empacotamento, compõe uma forma de reduzir o consumo de cimento. Esta densidade é influenciada pelas características dos agregados utilizados, podendo citar morfologia das partículas e distribuição granulométrica (LONDERO et al., 2017).

Entretanto, além da procura por uma densidade máxima de empacotamento é preciso obter trabalhabilidade adequada a fim de que se viabilize o manuseio e adensamento. O aparecimento de poros na mistura pode ser consequência da quantidade de água utilizada para conseguir trabalhabilidade do material e permitir as reações químicas, porém esses poros podem diminuir consideravelmente a densidade. Sendo assim, teoricamente, o empacotamento perfeito, 100% de densidade, seria aquele que não faria uso de água na mistura (VANDERLEI, 2004).

De acordo com Vanderlei (2004), conseguir um empacotamento perfeito atrelado a uma boa trabalhabilidade é um paradoxo, visto que as partículas se movem uma em relação a outra, separadas por um líquido e, sem ele agindo como um lubrificante, se torna contraditório o empacotamento perfeito e a boa trabalhabilidade. Por isso intensificou-se a procura pela redução de água e aumento de densidade no desenvolvimento tecnológico de materiais compostos basicamente de cimento.

Reginato (2011) divide o empacotamento de partículas em basicamente dois grupos: o real e o teórico. Para este autor, o primeiro é aquele que acontece da fração granulométrica maior para a menor, ou seja, os espaços que as partículas maiores vão deixando, vão sendo preenchidos por grãos menores, no entanto é aconselhável sua utilização para agregados com diâmetros superiores a 2 mm. Quando as dimensões se apresentarem menores que 1 mm, torna-se difícil a realização de uma mistura real, recorrendo assim ao empacotamento teórico de partículas.

Segundo Vanderlei (2004): “o estudo do empacotamento é bastante amplo e existem alguns métodos já desenvolvidos”. Estes modelos utilizam de equações matemáticas para prescrever como partículas de diferentes tamanhos interagem geometricamente. Calculando a densidade de empacotamento teórica da mistura, através da distribuição granulométrica e densidade de um dado sistema de partículas (OLIVEIRA et al., 2018).

Sarkar (2016), afirma que muitos pesquisadores já trabalham na distribuição do tamanho de partículas para concretos, porém os modelos mais bem aceitos na indústria do concreto devido as suas abordagens são os modelos de Furnas, Andreasen, Dinger & Funk e Alfred.

2.5.1 Método de Furnas

Este modelo apresenta uma abordagem discreta, o que significa que avalia cada integrante da mistura individualmente. O método procura obter alta compactação com fluidez das partículas, utilizando de proporções dos vários tamanhos de fragmentos da composição granulométrica, porém considerando diâmetros infinitos, o que tornaria o método impossível de ser utilizado na prática (SARKAR, 2016).

A equação do método de Furnas (Equação 10) representa o cálculo do volume aparente de misturas simples com apenas dois componentes, também chamadas de misturas binárias e outras mais complexas, denominadas multicomponentes (HENCHE; MAZER, 2010 apud REGINATO, 2011).

$$CPFT (\%) = 100 \left(\frac{D_p^{\log r} - D_s^{\log r}}{D_L^{\log r} - D_s^{\log r}} \right) \quad (10)$$

Onde:

CPFT – Porcentagem acumulada de partículas menores que D_p ;

D_p – Diâmetro da partícula em questão em mm;

D_s – Diâmetro da menor partícula em mm;

D_L – Diâmetro da maior partícula em mm;

r – Quociente entre o volume retido em uma malha e na imediatamente inferior.

Para Silva, Segadães e Devezas (2004), “a distribuição de monotamanhos de Furnas para empacotamento máximo não é natural, além de ser economicamente inviável e originar misturas de fraco desempenho”. Sendo assim, ainda para o mesmo autor o modelo de Furnas é o que gera os piores resultados.

2.5.2 Método de Andreasen & Andersen

De acordo com Vanderlei (2004), o modelo de Andreasen e Andersen é fácil de ser aplicado, entretanto sua natureza é semi-empírica. Apresenta a vantagem de não exigir o fator de forma das partículas, é necessário apenas que elas apresentem formas semelhantes. O modelo considerava uma distribuição contínua do tamanho das partículas isto quer dizer que em um material existiam porções de todos os tamanhos de partículas. Sendo assim em alternativa ao modelo de Furnas, Andreasen propôs uma equação (Equação 11) que diz que a condição do empacotamento perfeito deve ser expressa por uma lei de potência (SILVA; SEGADÃES; DEVEZAS, 2004; LIMA, 2007).

$$CPFT = \left(\frac{D}{D_L}\right)^q \cdot 100 \quad (11)$$

Onde:

CPFT – Percentual acumulado de finos menor que “D” em volume;

q – Constante designada por módulo de distribuição granulométrica;

D – Tamanho da partícula;

D_L – Maior tamanho de partícula de distribuição.

Dinger e Funk (1993) apud Vanderlei (2004), utilizando de simulações computacionais observaram a influência que o coeficiente “q” tinha sobre o empacotamento. Eles chegaram à conclusão que se o valor da constante for igual ou menor a 0,37, garantiria 100% de empacotamento para uma distribuição infinita, enquanto que para valores acima disso sempre existiria porosidade na mistura.

Para atingir maior fluidez o valor de “q” não deve ultrapassar 0,3. Quando se utiliza valores próximos a isso obtém-se uma mistura que precisa de vibração para garantir melhora no seu adensamento, se este número for menor que 0,25 a mistura torna-se auto adensável (VANDERLEI, 2004).

Segundo Vanderlei (2004), “o efeito de reduzir o valor de ‘q’ é um aumento na quantidade de finos que influencia na interação entre partículas, formando um líquido viscoso quando misturado com água”.

A Equação 11 não abrange um limite mínimo para o diâmetro da partícula e, no limite, esse mínimo é zero. Este fato irá levar a um erro significativo no momento em que se desejar encontrar a média do número de partículas ou a área superficial, visto que a contribuição das partículas menores é consideravelmente grande, pois o número de partículas é inversamente proporcional ao cubo do seu tamanho, enquanto que a área é ao quadrado do tamanho das partículas, sendo assim ao dividir pelo tamanho mínimo que é zero, esses parâmetros irão tender ao infinito, o que não se verifica na prática (SILVA; SEGADÃES; DEVEZAS, 2004).

2.5.3 Método de Alfred

Dinger e Funk (1992) apud Vanderlei (2004) observaram que no modelo de Furnas forma-se uma progressão geométrica a partir da quantidade de partículas finas de diâmetros diferentes e que para se trabalhar no modelo de Andreasen era preciso definir um tamanho mínimo das partículas. Os autores, então, concluíram após a análise de cada modelo que estes convergiam matematicamente para uma equação que considerasse o diâmetro da menor partícula da mistura (Equação 12). Este modelo ficou conhecido como modelo de Alfred ou Andreasen modificado (VANDERLEI, 2004).

$$\text{CPFT (\%)} = 100 \left(\frac{D_P^q - D_S^q}{D_L^q - D_S^q} \right) \quad (12)$$

Onde:

CPFT – Porcentagem acumulada de partículas menores que D_p ;

q – Constante designada por módulo de distribuição granulométrica;

D_p – Diâmetro da partícula em questão em mm;

D_S – Diâmetro da menor partícula em mm;

D_L – Diâmetro da maior partícula em mm;

3. MATERIAIS E MÉTODOS

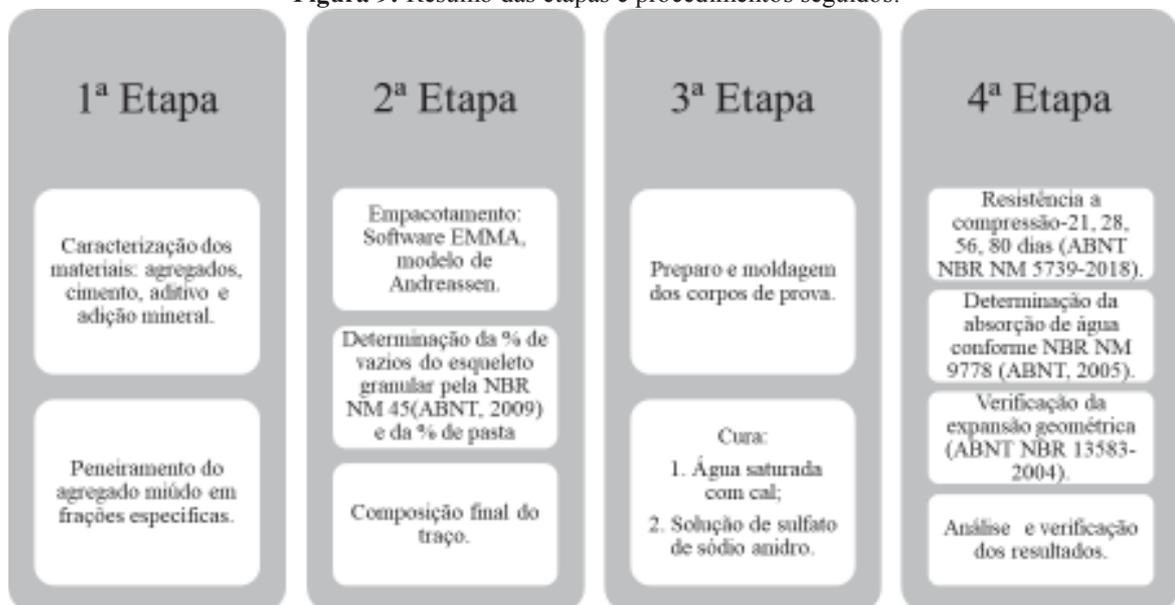
De acordo com os objetivos do presente trabalho e em concordância com a fundamentação teórica citada, apresenta-se o programa experimental de abordagem quantitativa, dividido em quatro etapas, de modo a abranger todos os objetivos propostos:

- a) 1ª Etapa: caracterização dos materiais;
- b) 2ª Etapa: dosagem do concreto;
- c) 3ª Etapa: preparo, moldagem e cura do concreto;
- d) 4ª Etapa: ensaios destrutivos e não destrutivos.

Os ensaios de caracterização dos agregados, aglomerantes e adições minerais foram executados no Laboratório de Geotecnia, e os demais: preparo do concreto, moldagem de corpos de prova e ensaios de resistência à compressão axial no Laboratório de Materiais e Técnicas Construtivas, ambos localizados no Instituto Federal de Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB) - *Campus* Cajazeiras.

A Figura 9 resume as etapas com os procedimentos experimentais executados e algumas das normas que os regem.

Figura 9: Resumo das etapas e procedimentos seguidos.



Fonte: Autor, 2019.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para o desenvolvimento de qualquer programa experimental é preciso inicialmente avaliar e caracterizar os materiais utilizados, características físicas e químicas, qualidade e aspectos econômicos, principalmente no que diz respeito ao fornecimento. Desta forma para o presente estudo optou-se por utilizar agregados da região, além de cimento comercializado no mercado municipal e aditivo disponível em nível regional. Sendo assim os materiais foram caracterizados em ensaios laboratoriais e por dados fornecidos pelos fabricantes.

3.1.1 Agregados

De modo a conseguir as três faixas de areia de classificação granulométrica (grossa, média e fina) para compor o traço determinado pelo empacotamento das partículas foi realizada uma separação por peneiramento com aberturas de 4,8 mm; 1,2 mm; 0,6 mm, de maneira que garantisse uma aproximação da areia normal utilizada para ensaio de resistência do cimento, sabendo que esta é constituída de 4 frações. Sendo assim denominou-se de Areia 1 a correspondente a fração mais grossa passante pela peneira 4,8 mm e retida na 1,2 mm, a Areia 2 equivale a de dimensão média passante pela 1,2 mm e retida na 0,6 mm. Já a porção mais fina foi chamada de Areia 3 sendo aquela que passa da peneira 0,6 mm. As frações de areia que compõem o traço podem ser verificadas na Figura 10.

Figura 10: Faixas de agregado miúdo.



Fonte: Autor, 2019.

Para determinar a composição granulométrica de cada faixa a ser utilizada na dosagem do concreto, aplicou-se a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Vale ressaltar que para conseguir uma caracterização mais detalhada dos diâmetros das partículas de cada fração de areia foram introduzidas peneiras da série intermediária na série normal (Figura 11).

Figura 11: Ensaio de granulometria.



Fonte: Autor, 2019.

Também foi determinada sua massa específica em conformidade com a NBR NM 52 (ABNT, 2009), utilizou-se de molde de tronco de cone, para encontrar o momento que o agregado se apresentasse na condição de saturado superfície seca e desmoronasse após retirada do molde, como mostrado na Figura 12.

Figura 12: a) Molde de tronco de cone; b) Desmoronamento do agregado após retirada do molde.



Fonte: Autor, 2019.

Na Tabela 5 encontram-se os valores de massa específica encontrados para cada fração de areia, verifica-se que há uma proporcionalidade entre a dimensão da partícula e o resultado

encontrado, visto que à medida que esta diminui a massa específica também apresentou uma redução.

Tabela 5: Massa específica agregado miúdo.

	Areia 1	Areia 2	Areia 3
Massa da amostra (g)	500,10	500,00	500,02
Massa do conjunto-frasco e amostra (g)	647,08	651,02	652,42
Massa do conjunto após repouso (g)	932,58	929,85	917,14
Massa do agregado seco (g)	492,30	497,29	498,86
Massa específica do agregado seco (g/cm ³)	2,295	2,248	2,120
Massa específica do agregado saturado superfície seca (g/cm ³)	2,331	2,261	2,125
Massa específica (g/cm³)	2,382	2,276	2,131

Fonte: Autor, 2019.

Para composição do traço foram utilizadas duas faixas de brita, a brita 0 ou pedrisco, de dimensão reduzida, variando de 4,8 mm a 9,5 mm, e a brita número 1, de dimensões entre 9,5 e 19 mm. A partir do ensaio de peneiramento, regido pela NBR NM 248 (ABNT, 2003), obteve-se a caracterização granulométrica do agregado graúdo. Em concordância com a NBR NM 53 (ABNT, 2009), determinou-se a massa específica do agregado na condição saturado superfície seca, massa específica aparente, massa específica do agregado seco, além da absorção de água. Para realização desse ensaio utilizou-se de balança hidrostática adaptada, como segue na Figura 13.

Figura 13: Balança hidrostática adaptada.



Fonte: Autor, 2019.

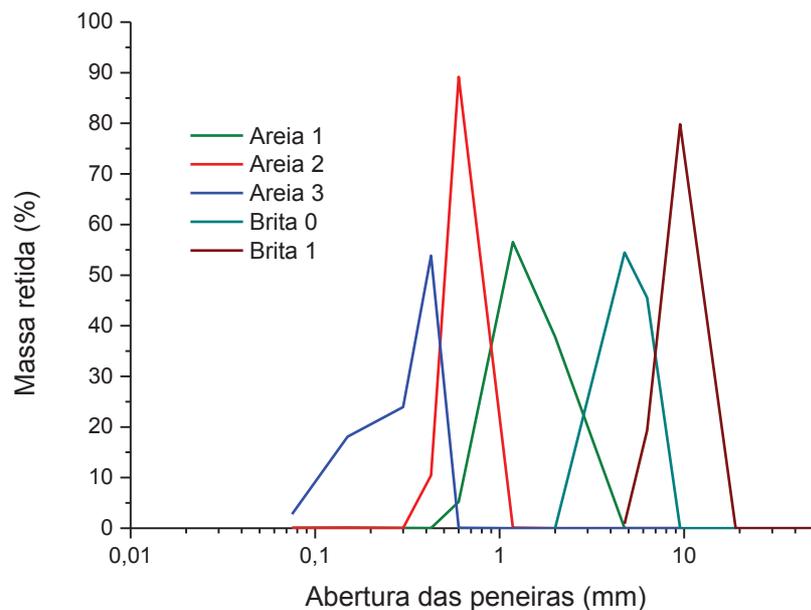
De modo a tornar os resultados mais representativos e garantir o bom funcionamento do equipamento adaptado, as amostras de 3 kg foram divididas em duas frações de 1,5 kg. Os dados do ensaio para os dois tipos de brita estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Massa específica do agregado graúdo.

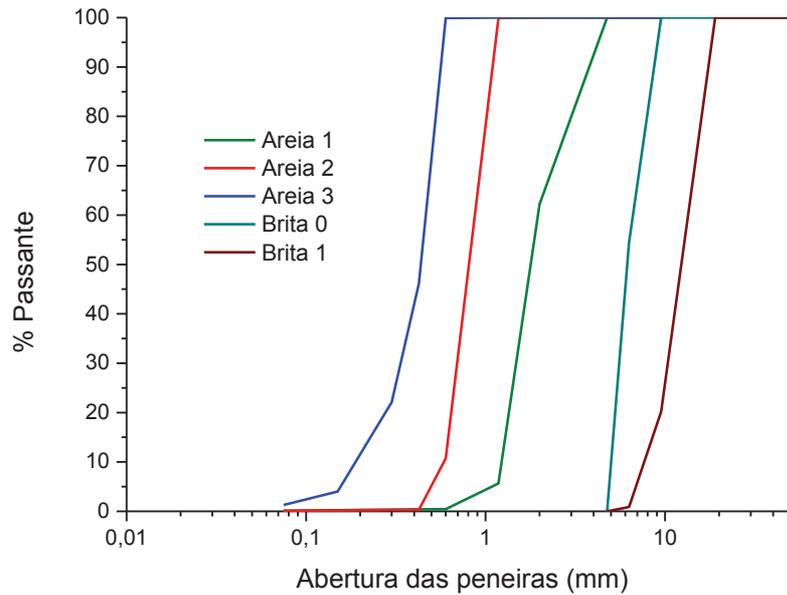
	Brita 0			Brita 1		
	M1	M2	Média	M1	M2	Média
Massa inicial (g)	1500,1	1500,2	-	1500,4	1501,6	-
Massa saturada (g)	1535,4	1526,2	-	1513,4	1518,3	-
Massa submersa (g)	906,0	915,1	-	950,6	952,0	-
Massa seca (g)	1441,6	1453,1	-	1499,6	1500,7	-
Massa específica agregado seco (g/cm ³)	2,692	2,701	2,696	2,732	2,735	2,733
Massa específica agregado saturado superfície seca (g/cm ³)	2,439	2,497	2,468	2,689	2,681	2,685
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,290	2,378	2,334	2,665	2,660	2,657
Absorção de água (%)	6,5	5,03	5,77	0,92	1,17	1,05

Fonte: Autor, 2019.

Durante a realização dos ensaios observou-se uma grande quantidade de pó presente na brita de número 0, o que foi comprovado com os resultados dos ensaios que apresentaram índices de absorção de água elevados em relação ao da brita 1. De forma a não prejudicar o preparo do concreto com alteração na relação a/c a ser utilizada encontrou-se como solução peneirar a brita antes de sua utilização a fim de reduzir a quantidade de material pulverulento presente na massa de agregado graúdo. As Figuras 14 e 15 trazem as curvas das massas retidas e passantes dos agregados utilizados no traço e nos Apêndices A e B encontram-se as massas retidas e passantes em tabelas.

Figura 14: Porcentagem retida do agregado.

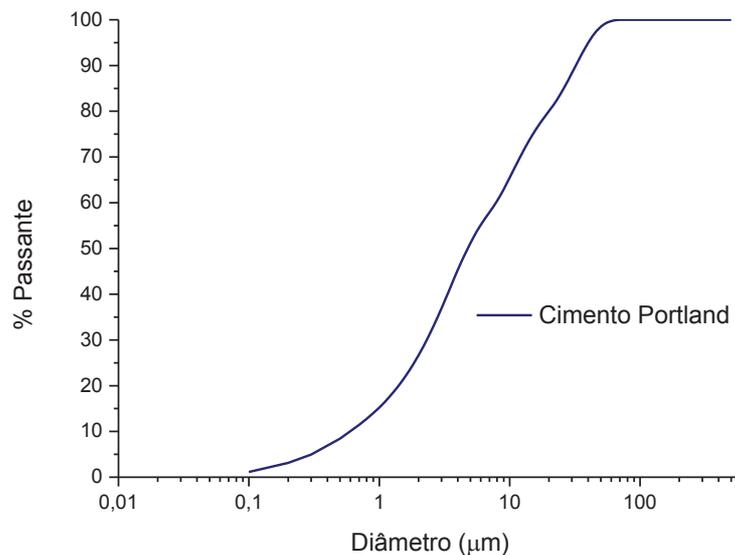
Fonte: Autor, 2019.

Figura 15: Porcentagem acumulada do agregado.

Fonte: Autor, 2019.

3.1.2 Cimento

O cimento utilizado foi o CP II F-32, caracterizado através da técnica de espectrometria de fluorescência de raios X para análise química e granulometria à laser, em que foi utilizado um granulômetro da marca CILAS modelo 1090, Figura 16, ensaios desenvolvidos no Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFPB-Campus João Pessoa.

Figura 16: Granulometria do cimento CP II F-32.

Fonte: Autor, 2019.

A Tabela 7 traz a análise química do cimento estudado, observando a alta concentração de óxido de cálcio.

Tabela 7: Caracterização química do cimento CPIIF-32.

Composto	Porcentagem presente (%)
CaO	79,191
SiO ₂	11,769
Fe ₂ O ₃	3,799
SO ₃	3,048
K ₂ O	1,473
TiO ₂	0,432
SrO	0,096
V ₂ O ₅	0,046
ZnO	0,039
CuO	0,034
MnO	0,033
ZrO ₂	0,028
RbO ₂	0,009
Y ₂ O ₃	0,005

Fonte: Autor, 2019.

Utilizando o aparelho de Vicat, em conformidade com a NBR 65 (ABNT, 2002) – Cimento Portland – Determinação do tempo de pega, determinou-se o tempo de início e de fim de pega do cimento CP II F-32 (Figura 17). O momento do começo da cristalização se deu após duas horas e quarenta e oito minutos após o primeiro minuto do ensaio, correspondendo ao início da pega do aglomerante, o fim se deu em três horas e vinte e oito minutos quando a agulha já não deixava mais marcas na amostra, caracterizando o endurecimento da pasta.

Figura 17: Ensaio tempo de início e fim de pega utilizando o aparelho de Vicat.



Fonte: Autor, 2019.

Para realização do ensaio de tempo de pega do cimento, inicialmente foi calculada a quantidade de água que seria necessária para a obtenção da consistência normal da pasta de cimento, para tal foi utilizada a NBR 16606 (ABNT, 2018), encontrando um valor de 0,3%. A partir deste foi executado o ensaio de pega do cimento descrito acima.

A massa específica foi determinada a partir do regimento da NBR 16605 (ABNT, 2017), sendo encontrado um valor de 2,948 g/cm³.

3.1.3 Cinza de biomassa vegetal (CBV)

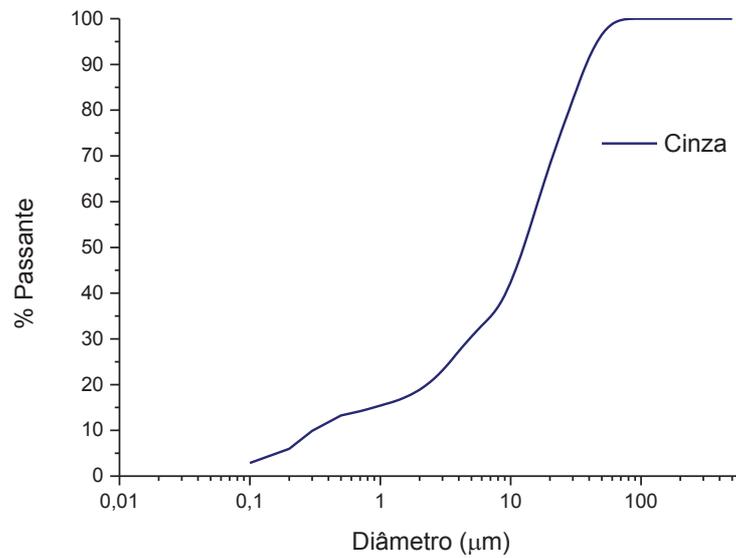
A adição mineral utilizada foi a cinza de biomassa vegetal (CBV), disponibilizada pela empresa Irmãos Rolim Cerâmica, localizada no município de São João do Rio do Peixe-PB. Por se tratar de um material pulverulento também foi realizado, como para o cimento, o ensaio de fluorescência de raios X, para análise química (Tabela 8) e granulometria à laser (Figura 18).

Tabela 8: Caracterização química da CBV.

Composto	Porcentagem presente (%)
CaO	84,649
K ₂ O	6,611
SiO ₂	3,807
SO ₃	1,502
SrO	1,399
TiO ₂	0,775
Fe ₂ O ₃	0,743
MnO	0,151
P ₂ O ₅	0,139
Lu ₂ O ₃	0,069
CuO	0,066
V ₂ O ₅	0,037
ZnO	0,02
Rb ₂ O	0,017
Br	0,014

Fonte: Autor, 2019.

Figura 18: Granulometria da cinza de biomassa vegetal.



Fonte: Autor, 2019.

A massa específica foi determinada por meio da NBR 16605 (ABNT, 2017), como mostra a Figura 19, encontrando um valor de $2,686 \text{ g/cm}^3$.

Figura 19: Determinação da massa específica da cinza de biomassa vegetal.



Fonte: Autor, 2019.

3.1.4 Aditivo

No intuito de reduzir a quantidade de água, de modo a permanecer com a proporção água/cimento fez-se uso do aditivo plastificante CEMIX 2000- VEDACIT. O qual, segundo informações do fabricante, apresenta composição básica de naftaleno sulfonado, massa

específica equivalente a $1,19 \text{ g/cm}^3$ e consumo recomendado de 0,3 a 1,5% sobre a massa de cimento.

3.2 DOSAGEM DO CONCRETO

3.2.1 Empacotamento de partículas no software Emma

A fim de encontrar uma distribuição granulométrica virtual que se aproximasse do sistema real, porém de maneira otimizada, foi utilizado o modelo teórico de Alfred, desenvolvido pelos pesquisadores Dinger e Funk, também conhecido como Andreassen modificado. A princípio foi feita a caracterização dos agregados quanto às suas granulometrias e massas específicas, descritas nas Figuras 13 e 14. Os diâmetros máximos e mínimos dos agregados ensaiados foram respectivamente 9,5 mm e 0,075 mm. De posse desses valores utilizou-se do software *Elkem Material Mix Analyzer-EMMA* para dosagem do concreto, de forma a encontrar a melhor distribuição de partículas que garantisse o mínimo de vazios possível.

Para o modelo de Andreassen modificado é preciso a utilização de um coeficiente de distribuição (q). Segundo Silva, Segadães e Devezas (2004), o empacotamento perfeito de partículas esféricas se daria com “ q ” igual a 0,37, contudo para encontrar uma distribuição mais próxima do real optou-se pela adoção do valor 0,35, visto que Arruda et al. (2019) verificaram menores volumes de vazios em misturas (areias e britas) com valores de “ q ” na faixa de 0,3 a 0,35. Primeiramente criou-se no programa uma receita para inserção das características dos materiais utilizados (Figura 20).

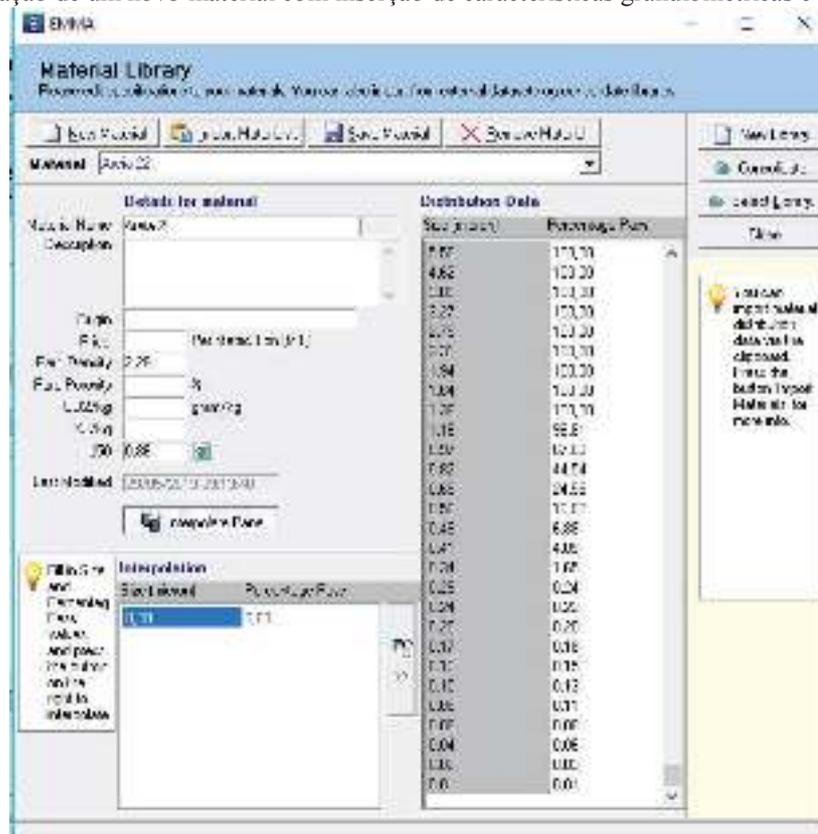
Figura 20: Criação de uma receita.



Fonte: Autor, 2019.

Logo em seguida foram inseridos na biblioteca um material representando cada agregado utilizado na composição do traço, com suas respectivas características correspondentes a granulometria e massa específica, como mostra a Figura 21.

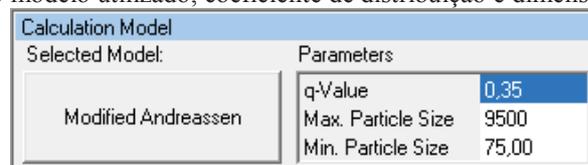
Figura 21: Criação de um novo material com inserção de características granulométricas e massa específica.



Fonte: Autor, 2019.

O programa realiza uma interpolação a partir dos diâmetros fornecidos a fim de encontrar porcentagens em dimensões intermediárias. Posteriormente foi inserido o valor do coeficiente de distribuição (q) do modelo de Andreassen modificado e as dimensões máximas e mínimas das partículas em μm , apresentados na Figura 22.

Figura 22: Seleção do modelo utilizado, coeficiente de distribuição e dimensões máximas e mínimas.



Fonte: Autor, 2019.

Após incluir todas as propriedades das três faixas de areia e dos dois tipos de brita utilizados no traço, o programa verifica as quantidades inseridas de cada material a fim de se encontrar uma curva de empacotamento similar a distribuição real dos agregados. Essas quantidades podem ser alteradas para garantir maior proximidade entre as curvas. A Figura 23 apresenta os valores encontrados para cada agregado. Na Figura 24 é demonstrada a

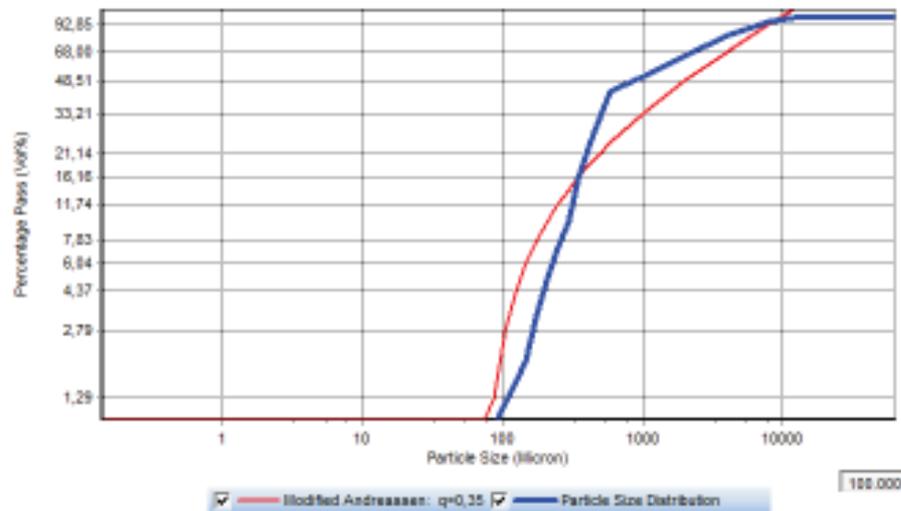
comparação da distribuição granulométrica dos agregados utilizados e a distribuição do empacotamento.

Figura 23: Quantidades ótimas de cada tipo de agregado.

Materials in Composition							
Material Name	Density	Quantity	Vol. %	Pics	Version	CO2/kg	KJ/kg
AREIA 1	2,38	25,43	38,24			0,00	0,00
AREIA 2	2,38	8,06	8,42			0,00	0,00
AREIA 3	2,13	38,23	28,42			0,00	0,00
BRITA 0	2,70	26,41	23,29			0,00	0,00
BRITA 1	2,73	1,87	1,63			0,00	0,00

Fonte: Autor, 2019.

Figura 24: Distribuição do tamanho das partículas.



Fonte: Autor, 2019.

3.2.2 Determinação da relação a/c

Segundo Mehta e Monteiro (2014) uma das formas de se alcançar um concreto com alto desempenho, com consumo de cimento reduzido diz respeito a utilização de valores de relação a/c de 0,4 ou menos, de forma a encontrar pouca ou nenhuma permeabilidade, pois esta é uma propriedade procurada para garantir longa durabilidade, principalmente quando se tratar de estruturas expostas a ambientes agressivos.

No entanto é preciso encontrar o teor ideal de água que garanta uma maior densidade dos sólidos da mistura e conseqüentemente uma melhor trabalhabilidade. Tendo em vista essas imposições foram realizados testes com as proporções de agregados calculadas e a utilização de cimento, variando o consumo de água, entre os valores de 0,4 a 0,5, considerando a interação água/finos (a/f), sendo essa correspondente a razão entre a massa do líquido e a soma do composto cimentício com a cinza de biomassa vegetal.

3.2.3 Composição final do traço

De posse das proporções dos agregados empacotados e fazendo uso da NBR NM 45 (ABNT, 2006) encontrou-se o número de vazios da mistura. Sabendo que o teor ideal de pasta no concreto seria aquele que preenchesse todos os espaços livres, favorecendo o fechamento granulométrico do composto, tem-se que o volume de pasta será determinado de acordo com o volume de vazios do esqueleto granular. As proporções utilizadas dos agregados estão indicadas na Tabela 9.

Tabela 9: Proporções de agregados.

Material	Massa específica (g/cm³)	Proporção (%)
Areia 1	2,382	25,43
Areia 2	2,276	8,06
Areia 3	2,131	38,23
Brita 0	2,696	26,41
Brita 1	2,733	1,87

Fonte: Autor, 2019.

Na Tabela 10 encontram-se os resultados do ensaio de determinação do índice de vazios da mistura.

Tabela 10: Dados amostrais do ensaio de determinação do índice de vazios da mistura.

Massa unitária dos agregados (ρ_{ap})	1,667
Massa específica relativa do agregado seco (g/cm ³)*	2,367
Volume de vazios (%)	29,41

(*) A massa específica do agregado seco corresponde a média ponderada das massas de cada tipo de agregado, encontrada e demonstrada em item anteriores a partir da NBR NM 52 (ABNT, 2009).

Fonte: Autor, 2019.

O volume de vazios do esqueleto granular é preenchido pelo volume de pasta. Com a proporção em volume de agregados e a massa ponderada das faixas de areias e britas estudadas foi possível encontrar a massa de sólidos (em proporção) correspondente ao volume de sólidos, dada pela Equação 13.

$$M_{sólidos} = V_s \cdot \rho \quad (13)$$

O consumo de sólidos (Equação 14) então é dado pelo produto entre a massa de sólidos calculada acima e a proporção de cada agregado. Sendo assim tem-se que:

$$\text{Consumo} = M_{\text{sólidos}} \cdot p\% \quad (14)$$

Já para o consumo do cimento utilizou-se a proporção de pasta calculada anteriormente, massa específica do cimento e a relação a/finos escolhida para o estudo, sendo, portanto, dada pela Equação 15.

$$\text{Consumo} = \frac{p\%}{\left(\frac{1}{\rho_{\text{cimento}}} + a/\text{finos}\right)} \quad (15)$$

A Tabela 11 apresenta o resumo dos consumos de cada material em kg para cada m³ de concreto e seu respectivo volume, calculados conforme equações acima.

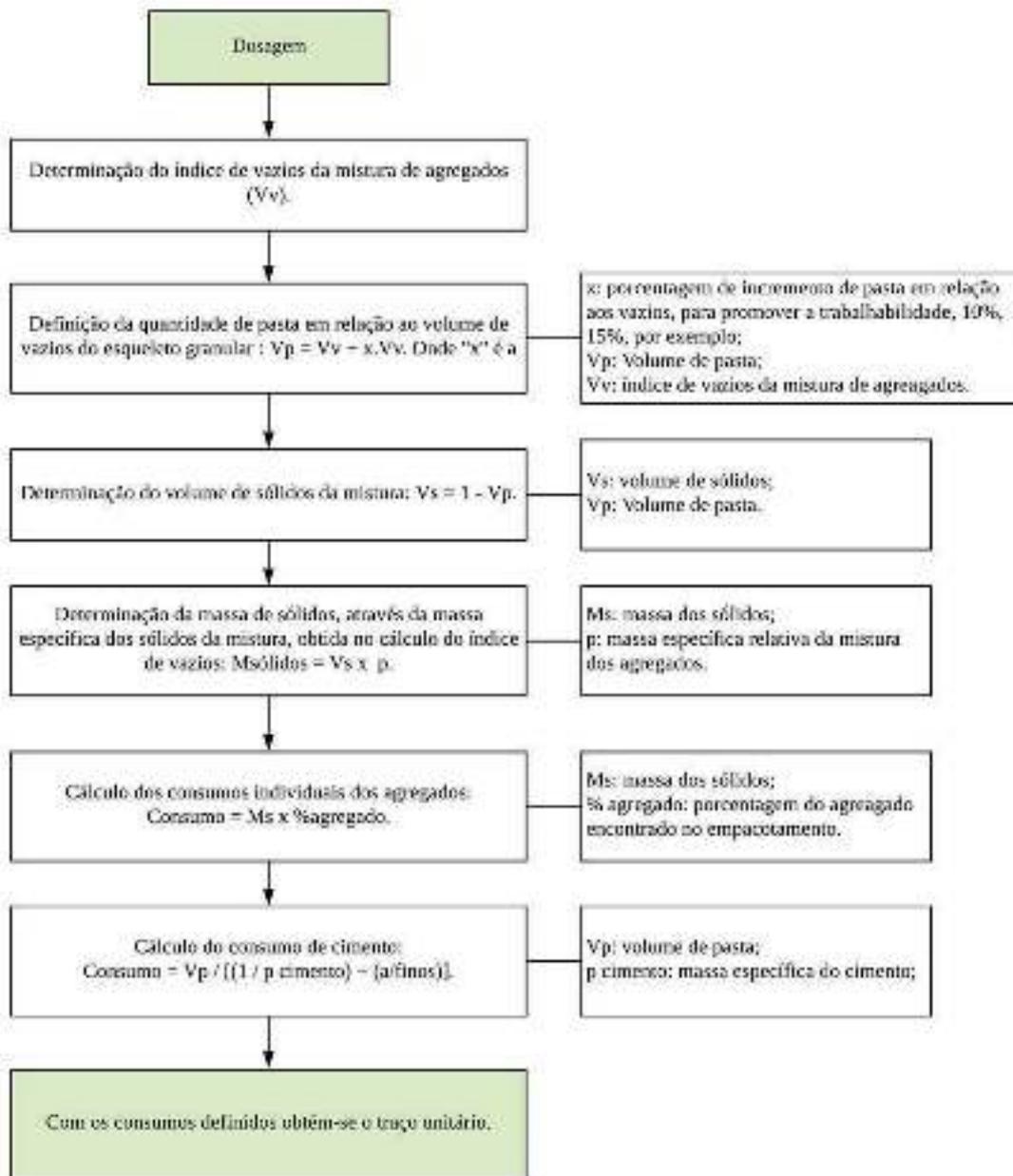
Tabela 11: Consumo de materiais por kg/m³.

Material	Consumo (kg/m³)	Volume (m³)
Areia 1	398,41	167,3994
Areia 2	126,28	55,38405
Areia 3	598,95	281,196
Brita 0	413,76	153,246
Brita 1	29,30	10,73158
Cimento	413,56	139,7172

Fonte: Autor, 2019.

De forma esquematizada, tem-se que a dosagem dos concretos seguiu o fluxograma exposto na Figura 25.

Figura 25: Passos para dosagem do concreto e composição final do traço.



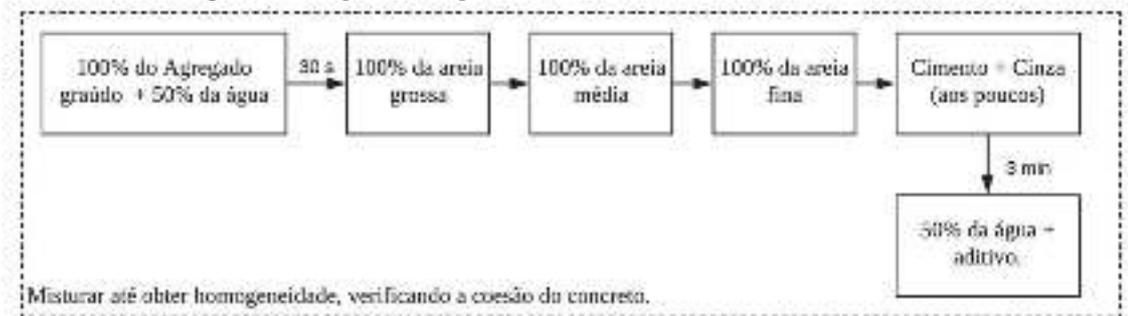
Fonte: Autor, 2019.

3.3 PREPARO, CURA E MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA

A mistura mecânica foi realizada em uma betoneira com capacidade de 150 litros. Inicialmente foram feitos testes pilotos a fim de encontrar qual a melhor ordem do processo de inserção de materiais. Em uma das tentativas verificou-se que ao colocar o aglomerante antes do agregado miúdo, formavam pontos de nucleação macros, não envolvendo os grãos dos agregados, deixando o concreto com aspecto seco. Portanto encontrou-se que a melhor sequência correspondia a depositar no fundo da betoneira o agregado graúdo e metade da

água, após cerca de 30 segundos de mistura foram sendo adicionadas as faixas de areia, da mais grossa para a mais fina, em seguida o cimento e a cinza de biomassa vegetal, esperando a homogeneização da mistura para inserir o restante da água com o aditivo plastificante. A betoneira permaneceu ligada entre 3 e 4 minutos, esperando o concreto tomar aspecto homogêneo. O processo da mistura está representado na Figura 26.

Figura 26: Sequência do processo de mistura em betoneira do concreto.



Fonte: Autor, 2019.

Devido a disponibilidade da cinza e verificação da redução da trabalhabilidade do concreto, optou-se por reduzir o cimento em 10, 15 e 20%, cada traço sendo identificado por T10, T15 e T20, respectivamente, além do traço de referência denominado T0.

Após a mistura ser finalizada foram moldados 26 corpos de provas cilíndricos (10 x 20) cm para cada traço, em conformidade com a NBR 5738 (ABNT, 2016), realizando o adensamento manual para todos (Figura 27).

Figura 27: Corpos de prova traço de referência.



Fonte: Autor, 2019.

Decorridas 24 horas da moldagem estes foram desmoldados e identificados, para posterior processo de cura. Na Figura 28 apresentam-se os corpos de prova do traço de referência após desmolde.

Figura 28: Corpos de prova do traço de referência desmoldados após 24 horas da moldagem.



Fonte: Autor, 2019.

No total foram moldados 104 corpos de prova cilíndricos, 26 para cada traço, onde 2 eram destinados para o ensaio de absorção. Metade deste total foi submersa em tanque de água saturada com cal. A Figura 29 apresenta os corpos de prova no tanque de cura.

Figura 29: Corpos de prova em tanque de cura.



Fonte: Autor, 2019.

O restante dos corpos de prova (52) foi colocado em tanque adaptado (Figura 30) contendo solução de sulfato de sódio, preparada no dia anterior a imersão dos corpos de prova. A solução foi preparada de acordo com as etapas indicadas na NBR 13583 (ABNT, 2014), trocada a cada 20 dias e mantida fechada de forma a manter a concentração de sulfato constante.

Figura 30: Cura em solução de sulfato de sódio anidro.



Fonte: Autor, 2019.

Para a verificação da expansão geométrica foram moldados corpos de provas prismáticos de argamassa (4 x 4 x 16) cm, seguindo as recomendações da NBR 13583 (ABNT, 2014) e utilizando do traço definido e relação água/finos definidos para o concreto, retirando apenas o agregado graúdo. Assim como os de concreto, os corpos de prova de argamassa eram desmoldados um dia após a moldagem e submetidos a cura em solução de cal saturada. Após 14 dias de cura foram divididos em duas classes, sendo uma exposta a solução agressiva de íon sulfato e a outra permanecendo na solução de cal saturada (TIHAN; COHEN, 2000). Para cada traço foram moldados 6 corpos de prova, totalizando 24, destinando 3 para cada tipo de solução.

3.4 ENSAIOS DESTRUTIVOS E NÃO DESTRUTIVOS

3.4.1 Ensaio de Kantro

A compatibilidade do aditivo com o cimento foi verificada utilizando o ensaio do mini abatimento descrito por Kantro (1980). Existe uma grande semelhança entre o ensaio de Kantro e o de abatimento do concreto, visto que as proporções das dimensões do molde tronco-cônico são as mesmas (MONTE; FIGUEIREDO, 2008).

O molde do tronco de cone foi confeccionado em impressora 3D e apresentou as dimensões padrões determinadas por Kantro (1980), diâmetro superior, inferior e altura de 19

mm, 38 mm e 57 mm respectivamente. Além deste utilizou-se de uma mesa nivelada com uma folha de papel milimetrado apoiada sob a placa de vidro (Figura 31).

Figura 31: a) Molde tronco-cônico; b) Mesa nivelada.



Fonte: Autor, 2019.

Preparou-se uma pasta de cimento para dosagens diferentes do aditivo, respeitando os limites propostos pelo fabricante. Foi utilizado para cada pasta cerca de 200 g de cimento, com relação água/aglomerante já definida, como a quantidade de pasta era pequena adaptou-se o misturador com copo para realizar a mistura (Figura 32). Esta permaneceu em regime entre 2 e 3 min de mistura (KANTRO, 1980).

Figura 32: Misturador com copo adaptado.



Fonte: Autor, 2019.

Após a preparação da pasta, esta foi inserida no molde preenchendo-o, em seguida este foi removido esperando a estabilização da pasta. Com o auxílio de um paquímetro foram

medidos dois diâmetros perpendiculares, calculando o valor médio que representa o espalhamento da pasta ensaiada.

Foram preparadas pastas com adição de cinza de biomassa vegetal e testadas para cada porcentagem de aditivo analisada, que consistiram em 0, 1%, 1,2%, 1,5% e 2%, sabendo que o recomendado pelo fabricante é não ultrapassar a faixa de 1,5%.

3.4.2 Ensaio de Consistência (*Slump test*)

De acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998) foi realizado o ensaio do abatimento de tronco de cone, mais conhecido como *slump test*, a fim de conhecer a consistência do concreto. Ao término do preparo de cada um dos quatro traços, era executado o ensaio conforme mostrado na Figura 33, realizando o preenchimento do tronco de cone em 3 camadas, adensadas manualmente através de 25 golpes.

Figura 33: Ensaio de consistência do tronco de cone-*slump test*.



Fonte: Autor, 2019.

Mediu-se com a ajuda de uma trena o abatimento ao fim de cada ensaio, cujos resultados se encontram na Tabela 12.

Tabela 12: Abatimento do tronco de cone.

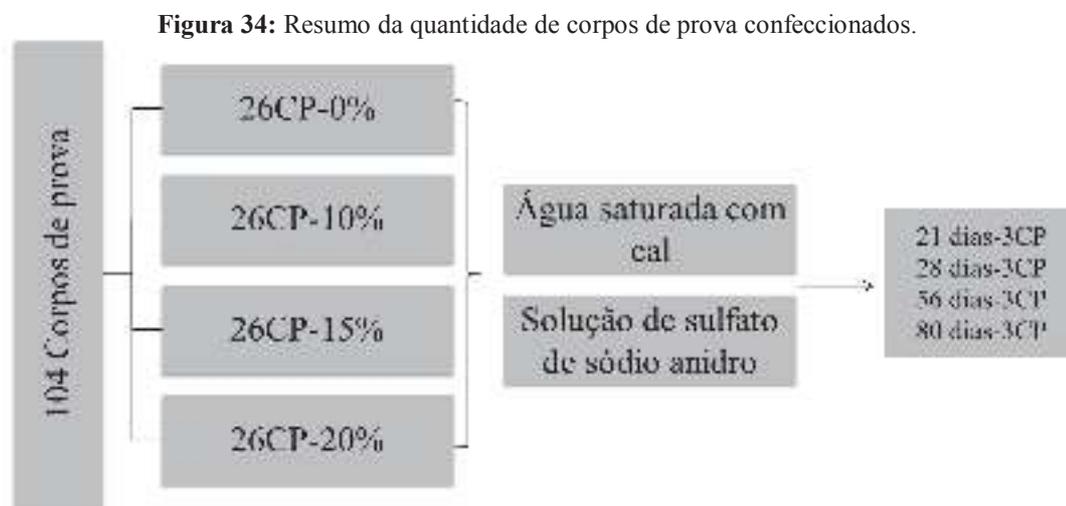
Traço	Abatimento (mm)
T0	180
T10	55
T15	25
T20	15

Fonte: Autor, 2019.

3.4.3 Ensaio de resistência – compressão axial

A fim de conhecer as variações de resistência resultantes da redução do cimento e substituição por cinza de biomassa vegetal, foi realizado o ensaio de compressão axial dos corpos de prova cilíndricos, em conformidade com a NBR 5739 (ABNT, 2018).

Foram confeccionados 26 corpos de prova para cada traço, 24 foram destinados ao ensaio de compressão axial, sendo 12 curados em água saturada com cal e 12 em solução de sulfato de sódio. Rompendo para cada idade 3 corpos de cada classe, a Figura 34 traz o resumo das quantidades para o ensaio de ruptura.



Fonte: Autor, 2019.

Antes de submeter os corpos de prova à compressão axial, estes eram retificados em máquina retifica a fim de regularizar sua base. A Figura 35 apresenta o corpo de prova do traço com 10% de adição de cinza de biomassa vegetal após retificação e rompimento. Para isso utilizou-se de prensa hidráulica presente no laboratório de materiais de construção civil do IFPB-Campus Cajazeiras.

Figura 35: Corpo de prova traço T10 retificado e rompido com tipo de ruptura E – cisalhada (NBR 5739, ABNT 2018).

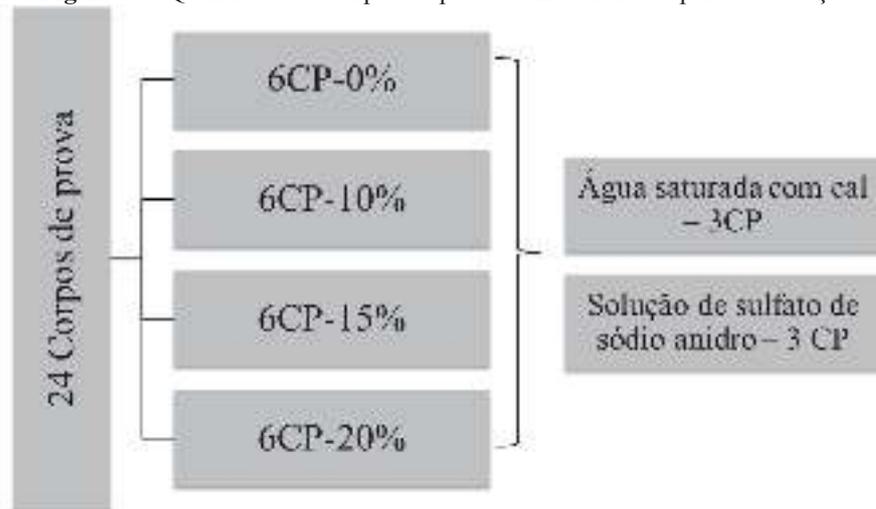


Fonte: Autor, 2019.

3.4.4 Expansão geométrica e volumétrica

De forma a investigar a ação do sulfato no concreto com redução de cimento foram confeccionados 24 corpos de prova prismáticos, 6 para cada traço, onde 3 eram submetidos a cura normal e o restante, na solução de sulfato de sódio anidro (Figura 36).

Figura 36: Quantidade de corpos de prova confeccionados para cada traço.



Fonte: Autor, 2019.

A geometria das peças prismáticas foi verificada aos 14, 28 e 42 dias após a exposição a condição de cura final. Utilizando-se de um paquímetro verificou-se a variação nas

dimensões do corpo de prova, sempre posicionados no mesmo ponto, nas idades indicadas (Figura 37). Estes eram retirados da solução exposta, colocados sobre bancada e deixados por aproximadamente 10 minutos para estabilização da temperatura.

Figura 37: Medição dos corpos de prova prismáticos com auxílio de paquímetro.



Fonte: Autor, 2019.

Terminado o processo, eles eram recolocados nas soluções de cura, as quais eram verificadas de forma a manter o volume constante. A Figura 38 traz os corpos de prova em solução de sulfato de sódio anidro. Para execução deste ensaio foi utilizada como base a NBR 13583 (ABNT, 2014).

Figura 38: Corpos de prova prismáticos em solução de sulfato de sódio anidro.



Fonte: Autor, 2019.

O resultado se dá pelo aumento ou diminuição da expansão da argamassa devido ao ataque do sulfato de sódio, em relação à expansão da argamassa submetida a cura normal, expresso em porcentagem, segundo a NBR 13583 (ABNT, 2014), e corresponde a diferença entre a expansão média das barras curadas em solução agressiva de sulfato de sódio pela das barras curadas em solução de água saturada com cal.

3.4.5 Absorção de água e índice de vazios do concreto

Para determinar a capacidade de absorção de água e a quantidade de vazios do concreto no estado endurecido, utilizou-se a NBR 9778 (ABNT, 2005). Conforme mencionado, foram moldados 2 corpos de prova de cada traço para execução deste ensaio, o qual consistiu inicialmente na secagem destes na estufa por 72 horas (Figura 39).

Figura 39: Corpos de prova dos traços T0 e T10 após 72 horas em estufa.



Fonte: Autor, 2019.

Depois de retirados foram mantidos imersos em água por mais 72 horas. Em seguida colocados em recipiente com água em ebulição e volume constante por 5 horas (Figura 40). Passado esse tempo permaneceram no recipiente até esfriarem e tiveram as massas determinadas em balança hidrostática. Por fim, retirado o excesso de água com uma toalha, novamente tiveram suas massas determinadas.

Figura 40: Corpos de prova em recipiente para ebulição.



Fonte: Autor, 2019.

A cada etapa realizada registrou-se a massa do elemento sendo possível, de posse do uso das equações da NBR 9778 (ABNT, 2005), calcular os valores de absorção de água e índice de vazios do concreto estudado.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DA CINZA

O conhecimento sobre a atividade do material é de fundamental importância para análise do comportamento mecânico e sua durabilidade. Assim, avaliou-se a CBV através do índice de atividade pozolânica com o cimento Portland, constituição química (FRX) e a cristalinidade da sua estrutura (DRX).

Por meio do ensaio de resistência a compressão simples desenvolvido em concordância com a NBR 5752 (ABNT, 2014), foi possível determinar o índice de desempenho de corpos de prova de argamassa contendo adição de cinza a fim de a caracterizar como, ou não, um material pozolânico. Na Tabela 13 encontram-se os resultados da resistência a compressão da argamassa A, apenas com cimento Portland e a argamassa B com adição de CBV.

Tabela 13: Resistências médias aos 28 dias de argamassas com e sem adição de CBV.

Idade (dias)	Corpo de prova	Argamassa A Resistência a compressão (MPa)	Argamassa B Resistência a compressão (MPa)
28	CP1	32,39	22,95
	CP2	33,43	20,77
	CP3	32,18	21,18
	CP4	33,33	21,40
	CP5	30,94	20,35
	CP6	35,92	20,77
	Resistência média	33,04	21,23

Fonte: Autor, 2019.

A NBR 5752 (ABNT, 2014) indica a Equação 13 para o cálculo do índice de desempenho do cimento Portland aos 28 dias.

$$I = \frac{f_c B}{f_c A} \cdot 100$$

Onde: $f_c B$: resistência média dos corpos de prova moldados com 25% do material pozolânico que está sendo testado;

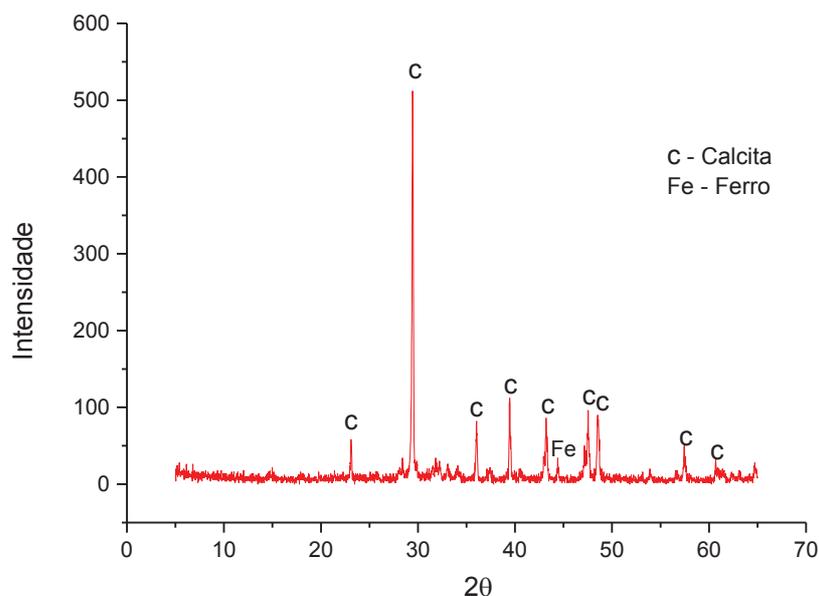
$f_c A$: resistência média dos corpos de prova moldados apenas com o cimento CP II F-32.

Ao substituir os valores conhecidos o índice de desempenho encontrado equivale a 64,27%. No entanto a NBR 12653 (ABNT, 2014) diz que para ser considerado um material com atividade pozolânica, o índice de desempenho aos 28 dias deve apresentar um valor superior a 90%. Sendo assim, a amostra com CBV não atingiu o limite mínimo, o que não a caracteriza como material pozolânico. Porém, estudos realizados por Costa (2015) dizem que embora a cinza não atinja a resistência mínima aos 28 dias, o índice de atividade pozolânica aumenta, chegando a 83,5% aos 63 dias.

Quanto a composição química, a NBR 12653 (ABNT, 2014) estabelece requisitos para verificação da atividade pozolânica dos materiais: a soma dos óxidos de silício, alumínio e ferro ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) deve ser maior que 70% e teor de óxido de enxofre (SO_3) menor que 5%. De acordo com a Tabela 8, apresentada na caracterização do material, a soma dos óxidos está muito abaixo do estabelecido pela norma, 4,55%. Assim, por este critério, não se espera que esta adição contribua ativamente.

Por fim, a análise de DRX (Figura 41) apresenta picos bem definidos de calcita, e outros menos expressivos de ferro e óxido de cálcio. Ressalta-se a grande cristalinidade da estrutura, o que corrobora com os resultados da argamassa de cimento Portland e da análise química.

Figura 41: DRX da cinza de biomassa vegetal.



Fonte: Autor, 2019.

4.2 TRAÇO FINAL

Para composição final do traço foram associados os resultados do arranjo granular dos agregados e dos demais finos a partir do índice de vazios, além da composição da pasta, verificando a compatibilidade aditivo/finos por meio do ensaio de Kantro e o consumo de água, tomando como base valores de testes pilotos do ensaio de abatimento.

De posse do esqueleto granular obtido através do software EMMA, foram determinadas as proporções necessárias para execução de um traço, como já apresentado anteriormente na Tabela 10. A partir dessas proporções preparou-se uma mistura, na qual foi verificado o volume de vazios da mesma, equivalente a 29,41%, o qual corresponde ao valor a ser preenchido por pasta de cimento.

Londero (2016) desenvolveu dois tipos de traço, o primeiro com a porcentagem de pasta igual a de vazios e um segundo com ausência de pasta para preencher os espaços livres, observando que aquele com a quantidade exata apresentava melhor eficiência e comportamento mecânico, no entanto dificuldades na trabalhabilidade. Nesse sentido, de forma a encontrar o traço que garantisse boa trabalhabilidade e pela escassez de trabalhos que tenham estudado acréscimos ideais, foram testados os volumes de pasta como sendo o volume de vazios acrescidos de 10% e 15%.

Para verificação da quantidade ideal a ser acrescida tomou-se como base os resultados obtidos nos testes pilotos de abatimento do tronco de cone dado pela NBR NM 67 (ABNT, 1998). Esse também auxiliou na verificação da relação final água/finos estabelecidos a partir do teste de compatibilidade e fixação da proporção de aditivo obtida por Kantro.

Dentro da faixa pré-estabelecida de 0,4 a 0,5 da relação água/finos, foram utilizados três intervalos, correspondentes a 0,4, 0,45 e 0,5, variando o teor de aditivo. Na verificação dessas relações observou-se que para 0,5 de a/f, independente da porcentagem de aditivo a pasta apresentava exsudação e desuniformidade nos diâmetros (Figura 42), tornando esse valor inapto dentro dos critérios de aceitabilidade do ensaio. Logo para maior representatividade optou-se por analisar um valor intermediário entre 0,45 e 0,5, no qual foi adotado 0,48.

Figura 42: a) Aferição dos diâmetros perpendiculares da pasta; b) Desuniformidade dos diâmetros e exsudação da pasta.

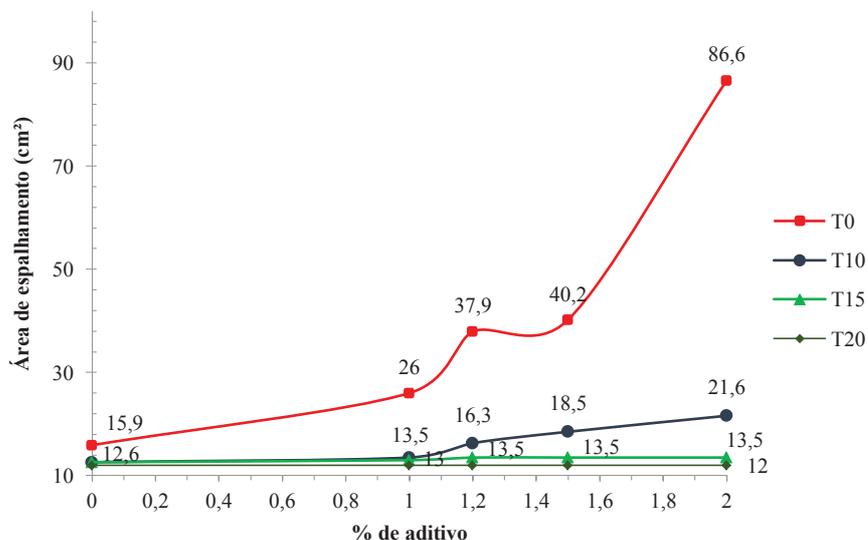


Fonte: Autor, 2019.

Se tratando das relações de 0,4 e 0,45 de a/f somente a partir do emprego do aditivo na porcentagem de 2% é que foi possível observar um espalhamento razoável da pasta, no entanto esse valor foge do sugerido pelo fabricante, o qual limita a utilização até 1,5%. Levando a atribuição do valor ideal de relação a/f para o ensaio de Kantro de 0,48.

Com esse valor foi possível verificar que o traço de referência e o T10, a partir do valor de 1,2%, apresentavam crescimento na área de espalhamento, a qual aumentava de forma irregular e ocorria a exsudação da pasta (Figura 42b), o que para Monte e Figueiredo (2008) caracteriza uma das vantagens do método. No que diz respeito aos traços T15 e T20, o valor da área permaneceu constante para adições maiores que 1,2%, no entanto não se observou nenhuma incompatibilidade da cinza com o aditivo (Figura 43).

Figura 43: Teor ótimo de aditivo plastificante.



Fonte: Autor, 2019.

Adotando o valor de 0,48 encontrado em Kantro para a relação a/f foram realizadas misturas variando a porcentagem do aditivo em 1% e 1,2%, e a porcentagem de pasta de 10% e 15% do volume de vazios, como citado anteriormente. Através dessas foi possível observar maior eficiência no traço executado com 1,2% de aditivo e o volume de pasta correspondente a 15%, encontrando maiores valores de abatimento e melhor trabalhabilidade. Na Tabela 14 encontram-se os dados representativos utilizados na composição final do traço.

Tabela 14: Dados representativos para composição final do traço.

Dados	Valor	%
Volume de vazios	0,2941	29,4111
Coefficiente	0,15	15
Relação a/c	0,48	-
Aditivo	0,012	1,2
Volume de pasta	0,3382	33,8227
Volume agregados calculado	0,6618	66,1773
Massa específica ponderada dos sólidos	2,3674	--
Massa de sólidos correspondente ao volume de agregados calculado (proporção)	1,5667	--

Fonte: Autor, 2019.

Reunindo os valores dos consumos de cada material utilizado, efetuou-se um quociente entre o consumo do cimento e cada elemento que iria compor o traço, como exemplificado na Tabela 15 para a produção de um metro cúbico de concreto, resultando no traço final de 1:0,96:0,31:1,45:1:0,07 e relação a/f de 0,48.

Tabela 15: Traço final.

Material	Consumo (kg/m³)	Traço Final
Areia 1	398,41	0,96
Areia 2	126,28	0,31
Areia 3	598,95	1,45
Brita 0	413,76	1,00
Brita 1	29,30	0,07
Cimento	413,56	1,00

Fonte: Autor, 2019.

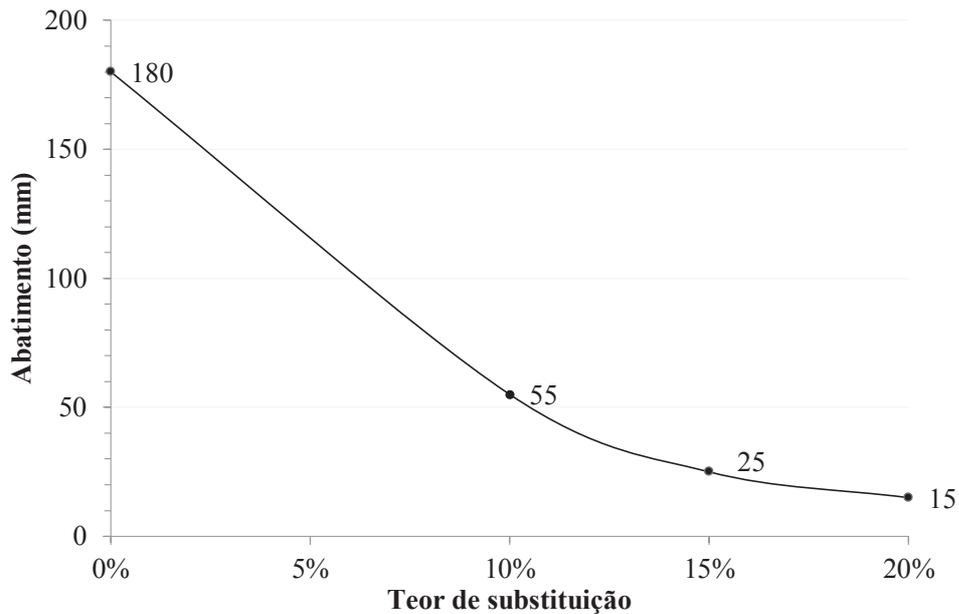
Wassermann, Katz e Bentur (2009) produziram concretos avaliando a demanda de água, o uso de aditivo e a redução do volume de pasta, de modo consequente a redução do volume de cimento, para diversas estruturas e parâmetros de durabilidade, bons resultados foram encontrados em concretos com consumos variando entre 230 a 450 kg/m³ e relação

água/cimento de 0,45 a 0,7, observando então que o traço final utilizado encontra-se entre os parâmetros indicados pelos autores.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

Na verificação das características do concreto no seu estado fresco o principal parâmetro observado corresponde a consistência do mesmo por meio do abatimento do tronco de cone, analisando conseqüentemente a sua trabalhabilidade. Esse realizado conforme NBR NM 67 (ABNT, 1998) em que a Figura 44 apresenta os resultados obtidos para cada teor de substituição analisado. Vale ressaltar que para todas as misturas manteve-se o mesmo percentual de aditivo, como também a mesma relação a/f.

Figura 44: Abatimento do tronco de cone para os traços analisados.



Fonte: Autor, 2019.

Observa-se que houve uma acentuada interferência da cinza no abatimento do concreto, reduzindo 69,44%, 86,11% e 91,66%, para os traços T10, T15 e T20, respectivamente, em comparação ao traço de referência, evidenciando que estas incorporações influenciam diretamente na plasticidade do concreto. Na Figura 45 estão representados todos os abatimentos dos traços ensaiados.

Figura 45: a) Slump T0; b) Slump T10; c) Slump T15; d) Slump T20.



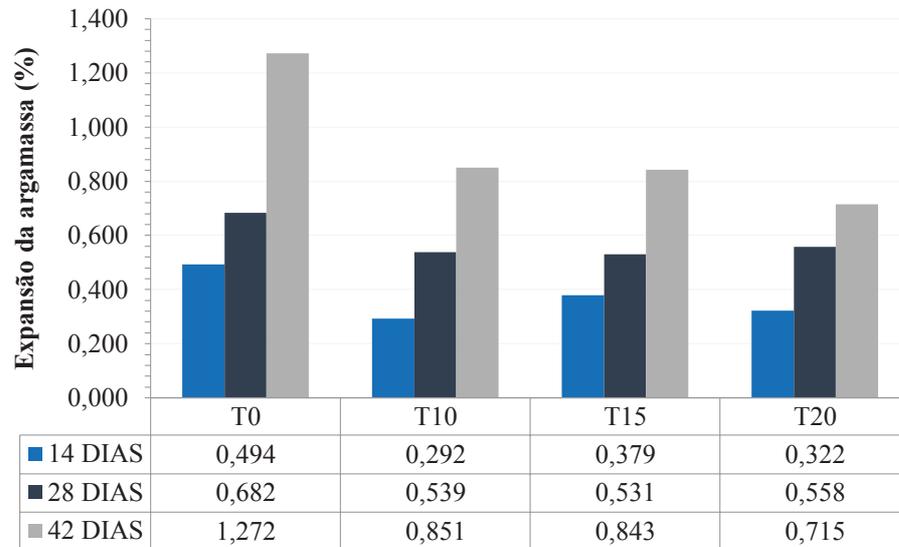
Fonte: Autor, 2019.

Segundo Sampaio (2013), essa tendência a redução na trabalhabilidade pode ser justificada pela combustão incompleta das cinzas, consequência da existência de teores de matéria orgânica na sua composição. O autor ainda relata que a inconstância nas temperaturas de queima faz a cinza absorver mais água que é necessária para manter a consistência do concreto, consequentemente o tornando mais seco e com menor trabalhabilidade.

A composição granulométrica da cinza (pequenos grãos), também se relaciona a uma maior tendência de reter água devido a impregnação desta na superfície dos grãos (FERNANDES et. al., 2015).

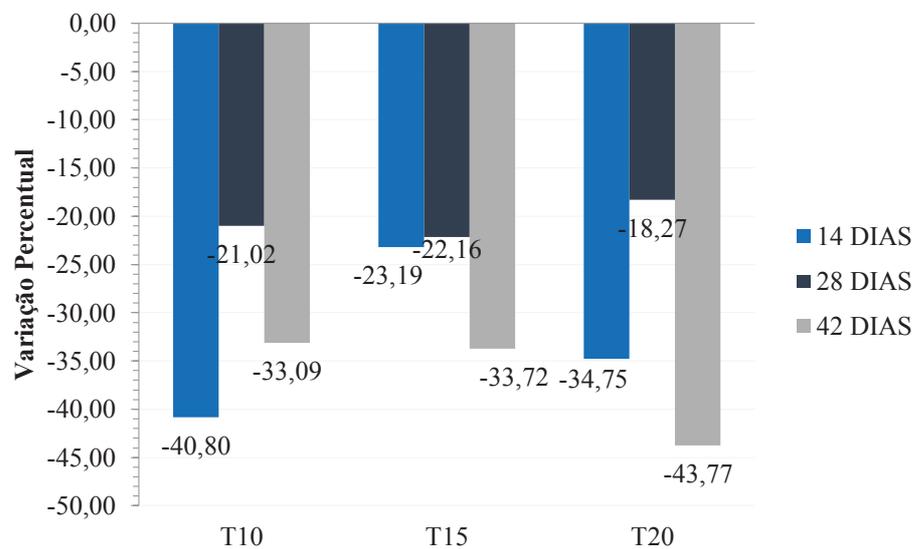
4.4 EXPANSÃO GEOMÉTRICA

A expansão geométrica foi verificada em corpos de prova de argamassa moldados com as mesmas proporções do traço do concreto, retirando-se o agregado graúdo, mantendo as relações a/f e porcentagem de aditivo. Foram feitas leituras nas idades de 14, 28, 42 dias, após 12 dias de cura em tanque de água saturada com cal. Os resultados correspondentes a diferença das expansões médias de cura normal e em sulfato para cada período e mistura podem ser vistos na Figura 46.

Figura 46: Expansão média em porcentagem das argamassas devido ao ataque do sulfato.

Fonte: Autor, 2019.

Inicialmente é possível perceber que existe um aumento na expansão geométrica das amostras à medida que as idades avançam, comportando-se de maneira inversa quando comparados os valores para os traços com adição de cinza e o de referência, sendo essa variação percentual apresentada na Figura 47.

Figura 47: Variação percentual dos traços T10, T15 e T20 em relação ao traço de referência T0.

Fonte: Autor, 2019.

A partir das variações percentuais apresentadas na Figura 47 e dentro das três idades analisadas constata-se que inicialmente o traço T10 foi o que exibiu menor expansão, apresentando o maior valor absoluto de variação percentual, no entanto não houve um padrão

para as demais misturas na idade de 14 dias, visto um decréscimo e posterior crescimento nas amostras T15 e T20, respectivamente. Diferentemente do que aconteceu aos 28 dias, em que todas as proporções apresentaram uma proximidade nos valores obtidos, sendo somente aos 42 dias observado um padrão regular de expansão inversamente proporcional ao aumento de adição de CBV.

Existem fatores físico-químicos que influenciam na dinâmica do ataque ao sulfato levando ao comprometimento da integridade de argamassas ou concretos. Dentro das dimensões físicas predomina o processo de caminhamento da solução sulfatada para o interior do compósito. Já no que se trata dos processos químicos, esses possuem maior complexidade, dando destaque às reações ligadas a presença de íons sulfato (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Nessa perspectiva química dos fatores que contribuem para a baixa expansão geométrica da argamassa pode-se mencionar a redução da disponibilidade de C_3A nas misturas acrescidas de CBV, sendo essas T10, T15 e T20. Esse composto é parte integrante das fases anidras do cimento, desencadeando diversos produtos durante o processo de hidratação, sendo os mais importantes o silicato de cálcio hidratado, hidróxido de cálcio, a etringita e o monossulfato (LINS, 2017).

O C_3A reage junto com o sulfato formando cristais aciculares denominados de trissulfoaluminato de cálcio ou etringita, cujo crescimento irá promover um aumento nas tensões internas do corpo provocando a expansão da pasta, tendo como consequência o aparecimento de fissuras na mesma (LINS, 2017).

No que diz respeito ao padrão de estabilização verificado aos 28 dias de exposição, Viscadi e Silva (2014) correlacionam esse fato ao preenchimento dos poros do concreto, que levam a não renovação do sulfato e conseqüentemente dificultam a propagação de novas reações químicas. Situação essa que pode ser reafirmada quando ainda é observado um aumento da expansão após a segunda leitura, em que ocorreu a substituição da solução sulfatada, renovando os íons do meio, facilitando a penetração dos poros restantes.

À medida que as amostras são expostas a solução agressiva de sulfato de sódio, percebeu-se alterações visuais nas superfícies das mesmas, desde mudanças na coloração, associados a um destacamento nas faces dos corpos de prova, até o aparecimento de microfissuras, como apresentado na Figura 45 (COSTA, 2004).

Figura 48: a) Argamassa atacada pelo sulfato em comparação a b) argamassa curada em solução de água saturada com cal.

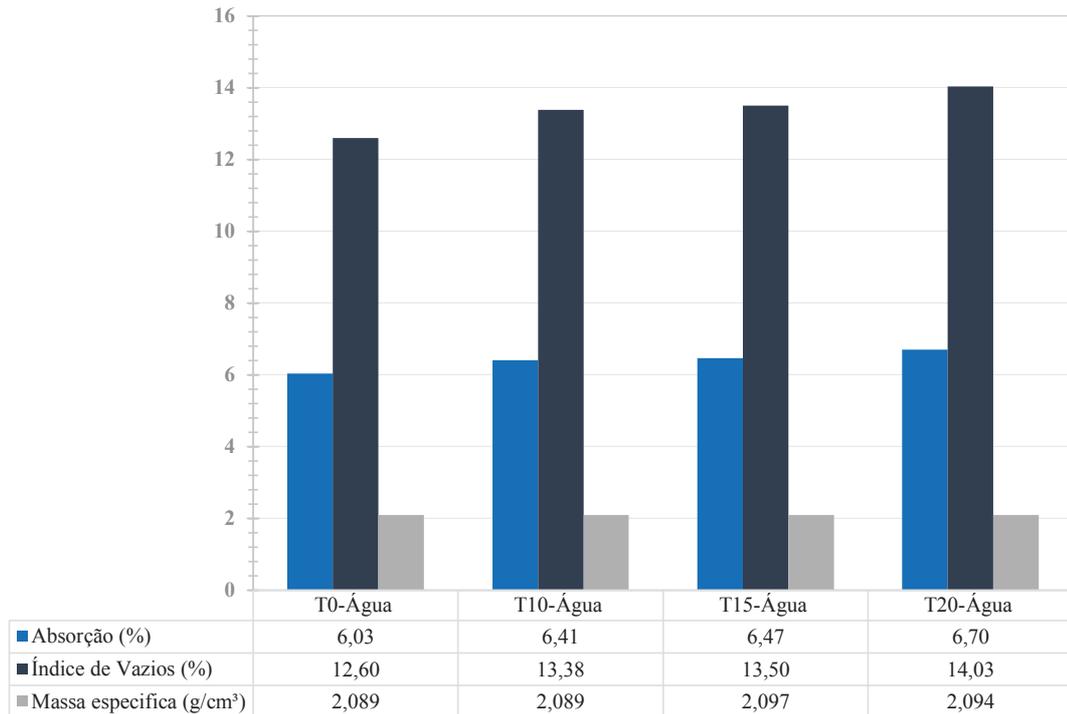


Fonte: Autor, 2019.

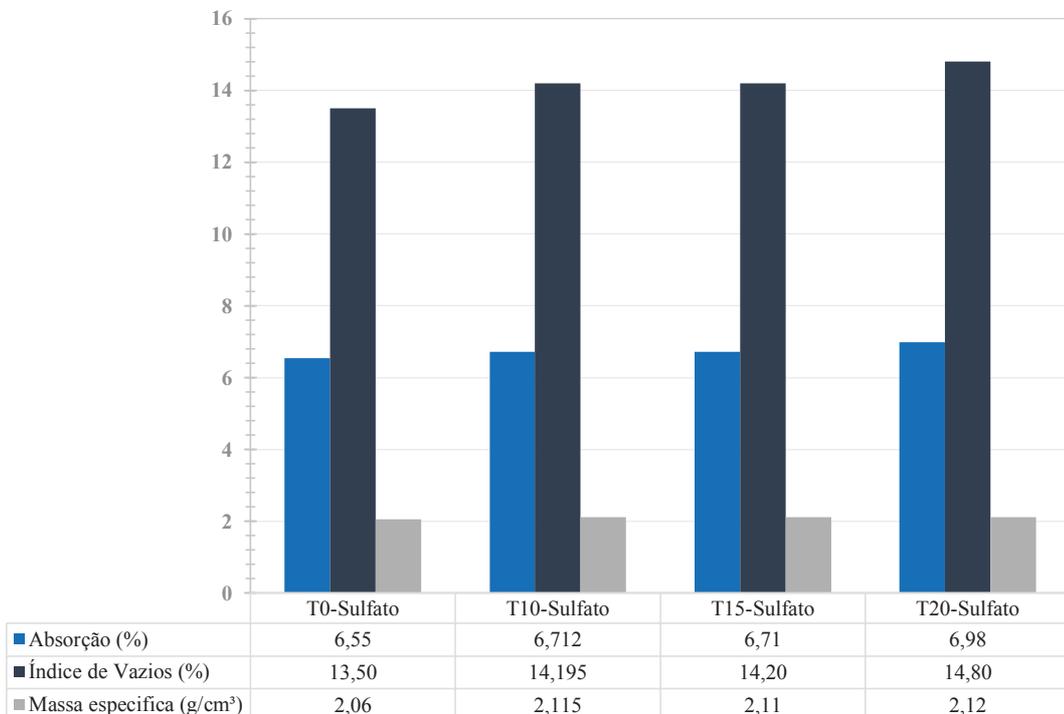
Essa deterioração provocada pelo ataque de sulfatos, como afirma Batista (2013), está diretamente relacionada a neoformações, consequência da interação entre os íons sulfato e as fases de hidratação, que possuem maior volume molecular, menor coesão, que minimizam a integridade física do material.

4.5 ABSORÇÃO E ÍNDICE DE VAZIOS

Através do ensaio de absorção de água por imersão pode-se medir o volume de vazios do concreto, tendo assim, uma análise da porosidade do mesmo. Os resultados obtidos no ensaio, executado de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2005), encontram-se representados na Figura 49 para concreto em cura saturada com hidróxido de cálcio e na Figura 50 para os corpos submersos em solução de sulfato de sódio anidro.

Figura 49: Absorção, índice de vazios e massa específica das amostras em solução de água saturada com cal.

Fonte: Autor, 2019.

Figura 50: Absorção, índice de vazios e massa específica das amostras em solução de sulfato de sódio anidro.

Fonte: Autor, 2019.

É possível observar que a CBV provocou no concreto uma variação insignificante de massa específica, apresentando-se aproximadamente na faixa de 2,10 g/cm³, corroborando

com os estudos realizados por Paula (2006) que não encontrou variações significativas em adições de até 30% de cinzas.

Tratando-se da absorção, os traços com adição de CBV, apresentaram um crescimento sutil, em relação ao T0, sendo esse proporcional ao aumento do teor de cinza, em ambos os processos de cura. Observando-se também, que para as amostras expostas ao sulfato além do aumento já referido foi constatada uma variação crescente em relação ao valor da absorção dessas e suas correspondentes em cura convencional. Esse comportamento vai de encontro a afirmativa apresentada por Cordeiro (2006) e Mercado e Tommaselli (2018) em que concretos com adições tendem a apresentar uma maior absorção em comparação aos valores de referência. Em se tratando de cinzas, esse fato é justificado pela presença de matéria orgânica na sua composição, na forma de carbono livre que em geral pode ser proveniente de uma combustão ineficiente.

No que diz respeito ao volume de vazios das misturas, esses apresentam-se de forma similar para os ambos processos de cura, com valores proporcionais ao aumento da absorção. Segundo Hoppe Filho et. al. (2015) argamassas e concretos acrescidos de cinzas propendem a ser mais porosos, característica provocada pelas alterações microestruturais causadas pelas adições na matriz hidratada, levando também a modificação das dimensões dos poros e suas interconectividades, como observado na Figura 51, influenciando a penetração da solução para o interior do material.

Figura 51: Visualização dos poros na superfície do concreto.



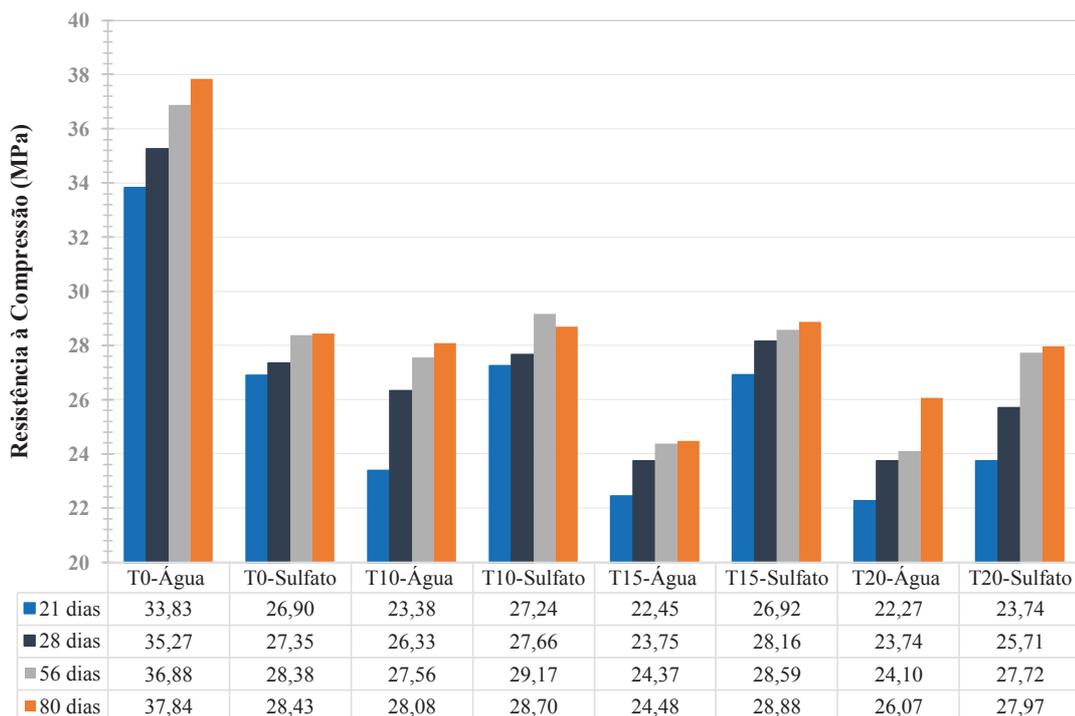
Fonte: Autor, 2019.

Correlacionando os dados de expansão e índice de vazios pode-se perceber que ambos possuem relação inversa, à medida que a expansão diminui o índice de vazios aumenta. Uma das possíveis causas que leva a esse acontecimento é apresentada por Silva Filho (1994), o qual afirma que uma maior quantidade de poros pode acomodar etringitas formadas, reduzindo a possibilidade de expansões e fissurações, diferente do que ocorre em uma matriz compacta e pouco porosa.

4.6 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A Figura 52 sumariza os resultados para o ensaio de compressão axial obtidos para os traços T0, T10, T15 e T20, nos dois tipos de cura estudados, nas idades de 21, 28, 56 e 80 dias.

Figura 52: Resistência média a compressão dos traços estudados em cura normal e de solução saturada.

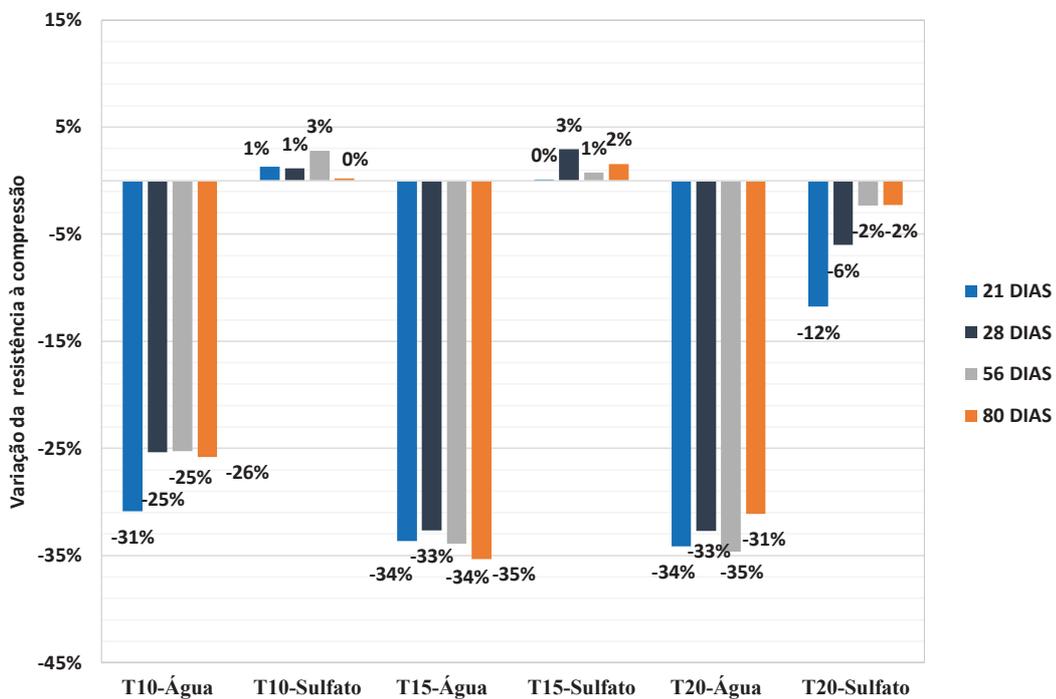


Fonte: Autor, 2019.

Pode-se constatar inicialmente que os traços desenvolvidos pelo empacotamento das partículas resultaram em resistências iniciais e características aceitáveis dentro dos limites estabelecidos pela NBR 12655 (ABNT, 2015), considerando uma classe de agressividade ambiental I. Essa exige um valor superior a 20 MPa, alcançados em todos os casos.

Na Figura 53 é observada a variação percentual de resistência dos traços elaborados com CBV em comparação ao traço de referência, em que é perceptível um decréscimo uniforme significativo na resistência daqueles providos de adição que foram submetidos à cura normal. Reagindo de maneira contrária, as amostras submetidas à solução sulfatada apresentam um acréscimo de resistência, salvo a mistura executada com 20% de adição de cinzas, que não manteve um comportamento similar aos demais traços, apresentando redução de resistência em ambos os processos de cura.

Figura 53: Variação percentual dos traços com adição de CBV em relação ao traço de referência.



Fonte: Autor, 2019.

Uma das possíveis motivações para perda de resistência, mantida a relação a/f, diz respeito ao consumo de cimento utilizado para cada traço, já que a sua redução acarretará no baixo volume dos produtos de hidratação. Uma vez que alterações nas quantidades dos compostos que formam a fase anidra do cimento provocam modificações significativas no comportamento mecânico da matriz (SILVA FILHO, 1994).

Adições com alto teor de sílica, por exemplo, ao entrarem em contato com a matriz e reagirem com o hidróxido de cálcio presente na pasta formam uma quantidade extra de Ca(OH)_2 . O produto dessa reação é o silicato de cálcio hidratado que corresponde ao principal responsável pela resistência à compressão de uma matriz cimentícia (GRAUPMANN et. al., 2019). O baixo teor desse componente é observado na adição

estudada, que apresenta proporções de sílica na faixa de 3,807%, como anteriormente apresentado na composição química do material presente na Tabela 8, podendo ser uma das razões que levaram a redução da resistência para os traços T10, T15 e T20 quando submetidos à cura convencional.

No que se refere ao comportamento do desempenho mecânico para os traços T10 e T15, que apresentaram um aumento nas resistências quando submetidas ao sulfato, essa pode ser justificada pelas proporções de aluminatos presentes na pasta, levadas pela redução do teor de cimento. O contato do concreto com esse componente acarretará em modificações da química do sistema, onde ocorrerá a formação do monossulfoaluminato, com uma expansão insignificante, além do refinamento da estrutura dos poros, dificultando a difusibilidade iônica. Logo o baixo teor de C_3A e a baixa liberação de $Ca(OH)_2$ durante o processo de hidratação, melhoram a resistência ao sulfato do concreto, visto que são componentes essenciais para reagir com o íon e formar a etringita expansiva (CENTURIONE; KIHARA; BATTAGIN, 2003).

Além do refinamento das estruturas dos poros, a formação de etringitas nessa região provocará a densificação da matriz assim como é afirmado por Silva Filho (1994), fato esse que pode ser evidenciado quando se compara os valores de expansão, resistência e porosidade dos concretos e argamassas com adição submetidos a sulfato de sódio.

Nenhuma das misturas com adição de CBV apresentou valores altos de expansão, guiados pela hipótese de que mesmo com a formação de etringita, essa não se dava de forma suficiente a provocar expansões significativas (SILVA FILHO, 1994). Além disso, como já mencionado, o crescimento no consumo de CBV induz a um aumento da porosidade e uma acomodação dessas etringitas formadas, que pode ter levado os traços T10 e T15, que possuem um menor índice de vazios quando comparados ao T20, apresentarem uma maior densificação e conseqüentemente um melhor desempenho mecânico.

5. CONCLUSÃO

De posse dos resultados presentes neste trabalho pode-se concluir que o método de dosagem pelo empacotamento das partículas apresenta-se eficiente, com um consumo de cimento que atende requisitos mínimos de dosagem dados por norma. Apresenta-se viável a sua utilização na prática, pois são utilizados métodos simples para composição final do traço, necessitando apenas de uma maior seleção dos agregados, com relação a granulometria.

Os traços elaborados com cinza, mesmo essa não apresentando pozolanicidade, apresentaram bom comportamento físico e mecânico, até o teor de 15%, quando submetidos à cura em solução sulfatada, podendo ser aplicados em ambientes marítimos ou próximos a esgotos. Esse teor de 15% reduz o consumo de cimento em até 60 kg por metro cúbico de concreto, contribuindo para uma menor fabricação e conseqüentemente menor emissão de dióxido de carbono.

Vale ressaltar que as cinzas se mostraram eficientes quando analisadas as expansões médias das amostras em sulfato de sódio, comparadas aos traços de referência, mesmo essas absorvendo mais água e tornando o compósito mais poroso.

Os resultados obtidos para o traço de 20% de adição de CBV, apresentaram-se positivos em relação a expansão geométrica dos corpos de prova, mas não se comportaram de maneira eficiente mecanicamente, podendo ser utilizado desde que não seja exigida uma resistência igual a encontrada nos corpos e prova contendo 100% de cimento.

Sendo assim, de modo a aprofundar os conhecimentos sobre concretos com baixo teor de cimento e adição de cinza, sugere-se para trabalhos futuros:

- A verificação da presença de etringita no compósito por meio de ensaios refinados;
- Substituição da cinza de biomassa vegetal por algum outro tipo que apresente pozolanicidade segundo normativas;
- Verificação da permeabilidade dos compostos produzidos com cinza;
- Utilização de um superplastificante a fim de conseguir reduzir a relação a/f;
- Realizar a análise de resistência e expansão em idades mais avançadas;
- Comparação do comportamento em outro meio agressivo, na presença de um íon diferente, como o sulfato de magnésio ou o ácido sulfúrico.

REFERÊNCIAS

ACI COMMITTEE 201 – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Guide to durable concrete, 2008.

ARRUDA, R.; MEIRA, G.; BRAGA, F.; FERREIRA, K.; ALVES, A. Use of numerical method for optimization og granulometric curves in eco-efficient concrete. **In:** CONSEC. Porto Alegre, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. Indústria brasileira do cimento: Base para a construção do desenvolvimento. Brasília, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro. 2003.

_____. **NBR NM 45:** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro. 2006.

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

_____. **NBR NM 53:** Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro. 2003.

_____. **NBR NM 65:** Cimento Portland – Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro. 2002.

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

_____. **NBR 5738:** Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro. 2015.

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

_____. **NBR 5752:** Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro. 2014.

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

_____. **NBR 12653:** Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro. 2014.

_____. **NBR 12655:** Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro. 2015.

_____. **NBR 13583:** Cimento Portland - Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio. Rio de Janeiro. 2014.

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

_____. **NBR 16606:** Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro. 2018.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA - ANICER. Relatório Anual 2015, 2015.

BATISTA, D. G. **Investigação da deterioração de concretos de UHEs por reações com os agregados.** Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013

BORLINI, M. C.; SALES, H. F.; VIEIRA, C. M. F.; CONTE, R. A.; PINATTI, D. G.; MONTEIRO, S. N. Cinza da lenha para aplicação em cerâmica vermelha Parte 1: características da cinza. **Cerâmica**, São Paulo, v. 51, p. 192-196, 2005.

CAMPOS, M. A.; PASSOS, L.; FERRÃO, A. M. A.; MORENO JÚNIOR, A. L. Argamassa e concreto com baixo teor de cimento: utilização de filer cerâmico e filer ativo. In: **Congresso Técnico Científico de Engenharia e da Agronomia**, 2018, Maceió.

CAMPOS, R.N.; SILVA, R.B.; FONTES, C.M.A.; LIMA, P.R.L. Avaliação da RAA em argamassas produzidas com cinza de biomassa com alto teor de álcalis. In: Encontro Luso-Brasileiro de Degradação em Estruturas de Concreto Armado, 1, 2014, Salvador.

CASTRO, A. L.; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. A influência do tipo de cimento no desempenho de concretos avançados formulados a partir do método de dosagem computacional. **Cerâmica**, São Paulo, v. 57, n. 341, p. 10-21, 2011.

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

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

CENTURIONE, S. L.; KIHARA, Y.; BATTAGIN, A. F. Durabilidade de concreto submetido a ataques de íons sulfato. In: Anais do 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2003, João Pessoa.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

COSTA, A. B. **Potencial pozolânico da cinza volante como material de substituição parcial de cimento**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 2015.

COSTA, E. B.; NOBRE, T. R. S.; GUERREIRO, A. Q.; MANCIO, M.; KIRCHHEIM, A. P. Clínquer Portland com reduzido impacto ambiental. **Ambiente construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p. 75-86, abr./jun. 2013.

COSTA, R. M. **Análise de propriedades mecânicas do concreto deteriorado pela ação de sulfato mediante utilização do UPV**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

CSI, The Cement Sustainability Initiative. Cement Industry Energy and CO2 Performance - Getting the Numbers Right (GNR). 2016a. Disponível em: <https://docs.wbcsd.org/2016/12/GNR.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2019.

CSI, The Cement Sustainability Initiative. Getting the Numbers Right (GNR). 2016b. Disponível em: https://www.wbcsdcement.org/GNR-2016/world/GNR-Indicator_59cTGW-world.html. Acesso em: 29 jul. 2019.

DAMINELLI, B. L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas**. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Balanço Energético Nacional 2016: Ano base 2015. Rio de Janeiro: EPE, 2016. 296p.

FERNANDES, S. E. et. al. Cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) como adição mineral em concretos para verificação de sua durabilidade. **Revista Matéria**, v.20, n.04, pp. 909-923, 2015.

FONSECA, G. C. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

GOMES, T. **Estudo da hidratação e microestrutura de pastas de cimento Portland com adição de cinza de casca de arroz de baixo teor de carbono grafítico e sílica ativa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

GONÇALVES, J. P.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Estudo da hidratação de pastas de cimento Portland contendo resíduo cerâmico por meio de análise térmica. **Ambiente construído**, Porto Alegre, v. 6, n. 4, p. 83-94, out./dez. 2006.

- GRAUPMANN, O.; MARTINS, M. A.; CONSUL, M.; CECHIN, L. Análise da resistência à compressão de concretos com adição de cinza de aterro sanitário. **Revista Matéria**, Santa Catarina, v.24, n.2, abril, 2019.
- 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**, São Paulo, v. 61, p. 168-177, 2015.
- KANTRO, D. L. Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste - A Miniature Slump Test. **Cement, Concrete, and Aggregates, CCAGDP**, v. 2, n. 2, pp. 95-102, 1980.
- KLEE H. The cement sustainability initiative. In: World business council for sustainable development (WBCSD). Washington, 2009.
- LIMA, A. B. M. **Desenvolvimento de eletrodo FGM a base Ni-Zircônia para célula a combustível de óxido sólido**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.
- LIMA, S. A. **Análise da viabilidade do uso de cinzas agroindustriais em matrizes cimentícias: Estudo de caso da cinza da castanha do caju**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- LIMA, S. F. S.; GOMES, S. C.; OLIVEIRA, W. G.; QUINTANILHA, L. C.; MENDES, A. S.; TOCHTROP, H. Estudo da influência do método do empacotamento do agregado miúdo na resistência do concreto convencional. **In: Anais do 58º Congresso Brasileiro do Concreto - IBRACON**, Belo Horizonte, 2016.
- LINS, D. N. **Análise da resistência à compressão do cimento LC³ e a influência das adições minerais em seu desempenho**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2017.
- LOPES, T. B. **Comparação da microestrutura do concreto auto adensável com o concreto convencional**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) - Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2016.
- LONDERO, C. **Dosagem de concreto ecológico com base em empacotamento de partículas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.
- LONDERO, C.; LENZ, L. A.; SANTOS, Í. M. R.; KLEIN, N. S. Determinação da densidade de empacotamento de sistemas granulares compostos a partir da areia normal do IPT: comparação entre modelos de otimização de distribuição granulométrica e composições aleatórias. **Cerâmica**, São Paulo, v. 63, p. 22-23, 2017.
- MARTIRENA, J.F.; SCRIVENER K.L., **Development and introduction of a low clinker, low carbon, ternary blend cement in Cuba**. *Advances in cement research*, 2015, p.323-329.

MEHTA, P. K.; MERYMAN, H. Tool for reducing carbon emissions due to cement consumption. **Structure magazine**, 2009. Disponível em: <https://www.structuremag.org/?p=5274>. Acesso em: 29 jul. 2019.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto - microestrutura, propriedades e materiais**. 2ª edição. São Paulo: Instituto Brasileiro de Concreto IBRACON. 782p, 2014.

MERCADO, L. H. B.; TOMMASELLI, M. A. G. Absorção de concretos produzidos com RCD de concreto e cinza residual. **In: 23º CBECIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, Foz do Iguaçu, 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. Anuário Estatístico: Setor de Transformação de Não metálicos. Brasília: MME, 2014.

MONTE, R.; FIGUEIREDO, A. D. **Avaliação de métodos de ensaio de fluidez em pasta de cimento com aditivos superplastificantes**. São Paulo: EPUSP, 2008.

OLDRA, G. **Avaliação da durabilidade de concretos fabricados com baixos teores de sílica de casca de arroz imersos em solução de sulfato de magnésio**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2015.

OLIVEIRA, V. C. H. C.; DAMINELI, B. L.; AGOPYAN, V. M.; JOHN, V. M. Estratégias para a minimização da emissão de CO₂ de concretos. **Ambiente construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 167-181, out./dez. 2014.

OLIVEIRA, C. O.; MACIEL, G.F.; CASTRO, A. L.; BARBOSA, M. P.; CAMPOS, R. S. Impacto do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos de alto desempenho. **Revista Matéria**, Ilha Solteira, v. 23, n. 1, 2018.

PAULA, M. O. **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland**. Dissertação (Magister Scientiae) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

PEDROSO, Fábio Luís. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Concreto e Construções**, Mar. de 2009. Disponível em: http://www.ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/Revista_Concreto_53.pdf. Acesso em: 1 maio. 2019.

PEREIRA, T. A. C. **Concreto auto-adensável, de alta resistência, com baixo consumo de cimento Portland e com adições de fibras de lã de rocha ou poliamida**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

REBMANN, M. S. **Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

REBMANN, M. S. **Robustez de concretos com baixo consumo de cimento Portland: desvios no proporcionamento e variabilidade granulométrica e morfológica dos**

agregados. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

REGINATO, L. A. **Emprego do modelo teórico de empacotamento de partículas para dosagens de concreto de pós reativos e análise das propriedades mecânicas.** Estágio supervisionado – Universidade do oeste de Santa Catarina, Joaçaba, 2011.

RIBEIRO JÚNIOR, E. Propriedades dos materiais constituintes do concreto. **Revista Especialize On-line**, IPOG, ed. 10, v. 01/2015, dez. 2015.

SAMPAIO, Z. L. M. **Análise do comportamento mecânico de concretos produzidos com incorporação de cinza do bagaço da cana-de-açúcar de variedades SP911049, RB92579 e SP816949.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

SANTIAGO, W. C. **Estudo da (não-) conformidade de concretos produzidos no Brasil e sua influência na confiabilidade estrutural.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2011.

SARKAR, R. Particle size distribution for refractory castables: a review. **Interceram: International ceramic review**, v. 65, n. 3, 2016.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, Amsterdã, 2018.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS - SEBRAE. **Cerâmica Vermelha: Panorama do mercado no Brasil**, 2015.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC. **A indústria do cimento no cenário das mudanças climáticas.** 2018. Disponível em: <http://snic.org.br>. Acesso em: 01 mai. 2019.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC. **Relatório técnico.** 2013. Disponível em: <http://snic.org.br>. Acesso em: 01 mai. 2019.

SILVA, A. P.; SEGADÃES, A. M.; DEVEZAS, T. C. Aplicação de métodos estatísticos na otimização da densidade de empacotamento de distribuições de pós de alumina. **Cerâmica**, São Paulo, v. 50, p. 345-354, 2004.

SILVA FILHO, L. C. P. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos:** Análise do efeito da permeação de água e da adição de microsilica. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

SILVA, J. S. **Estudo de concretos de diferentes resistências à compressão quando submetidos a altas temperaturas sem e com incorporação de fibras de politereftalato de etileno (PET).** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

TIAN, B.; COHEN, M. D. Does gypsum formation sulfate attack on concrete lead to expansion? **Cement and concrete research**, USA, v.30, pp. 117-123, 2000.

UWASU, M.; HARA, K.; YABAR, H. World cement production and environmental implications. **Environmental Development**, Amsterdã, pp. 36-47, 2014.

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

VISCALDI, D. Z.; SILVA, B. V. Análise do concreto submetido a ataque por sulfato de ferro em áreas degradadas pela mineração do carvão. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2014.

WASSERMANN, R.; KATZ, A.; BENTUR, A. Minimum cement content requirements: a must or a myth? **Materials and Structures**. n. 42, p. 973-982. 2009.

WALLEVIK, O. H.; WALLEVIK, J. E. Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes. **Cement and Concrete Research**, v. 41, p. 1279-1288, 2011.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD)/INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Cement Technology: Roadmap 2009 – Carbon emissions reduction up to 2050**, 2009.

WORRELL et al. Carbon Dioxide Emissions From the Global Cement Industry. **Annual Review Energy and the Environment**, v. 26, n. 1, p. 303-29, 2001.

APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO

Tabela 16: Granulometria da areia 1.

		Areia 1					
Peneira Nº	Abertura (mm)	AMOSTRA 1		AMOSTRA 2		% retida média	%retida acumulada
		Massa retida (g)	% retida	Massa retida (g)	% retida		
3/8”	9,5	0	0,00	0	0,00	0,000	0,000
¼”	6,3	0	0,00	0	0,00	0,000	0,000
4	4,75	0	0,00	0	0,00	0,000	0,000
8	2	211,7	42,39	165,7	33,23	37,809	37,809
16	1,18	259,4	51,94	304,8	61,12	56,531	94,339
30	0,6	25,1	5,03	27	5,41	5,220	99,559
40	0,425	0,3	0,06	0,1	0,02	0,040	99,599
50	0,3	0,4	0,08	0,1	0,02	0,050	99,649
100	0,15	0,8	0,16	0,3	0,06	0,110	99,760
200	0,075	0,7	0,14	0,3	0,06	0,100	99,860
	Prato	0,6	0,12	0,7	0,14	0,130	99,990
	Final	499	99,92	499	100,06	99,9	

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 17: Granulometria da areia 2.

		Areia 2					
Peneira Nº	Abertura (mm)	AMOSTRA 1		AMOSTRA 2		% retida média	%retida acumulada
		Massa retida (g)	% retida	Massa retida (g)	% retida		
3/8”	9,5	0	0,00	0	0,00	0,000	0,0
¼”	6,3	0	0,00	0	0,00	0,000	0,0
4	4,75	0	0,00	0	0,00	0,000	0,0
8	2	0	0,00	0	0,00	0,000	0,0
16	1,18	1,1	0,22	0,1	0,02	0,120	0,1
30	0,6	451,6	90,43	438,3	87,89	89,159	89,3
40	0,425	45,3	9,07	59	11,83	10,451	99,7
50	0,3	0,1	0,02	0,1	0,02	0,020	99,7
100	0,15	0,4	0,08	0,4	0,08	0,080	99,8
200	0,075	0,2	0,04	0,4	0,08	0,060	99,9
	fundo	0,6	0,12	0,8	0,16	0,140	100,0
	Final	499,3	99,98	499,1	100,1	100,0	

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 18: Granulometria da areia 3.

Areia 3							
Peneira N°	Abertura (mm)	AMOSTRA 1		AMOSTRA 2		% retida média	%retida acumulada
		Massa retida (g)	% retida	Massa retida (g)	% retida		
3/8"	9,5	0	0,00	0	0,00	0,000	0,0
1/4"	6,3	0	0,00	0	0,00	0,000	0,0
4	4,75	0	0,00	0	0,00	0,000	0,0
8	2	0	0,00	0	0,00	0,000	0,0
16	1,18	0	0,00	0	0,00	0,000	0,0
30	0,6	0,1	0,02	0,8	0,16	0,090	0,1
40	0,425	253,3	50,72	284,2	56,99	53,855	53,9
50	0,3	121,9	24,41	117,1	23,48	23,945	77,9
100	0,15	99,1	19,84	81,4	16,32	18,083	96,0
200	0,075	17,1	3,42	10,6	2,13	2,775	98,7
	Fundo	7,7	1,54	5	1,00	1,272	100,0
	Final	499,2	99,96	499,1	100,08	100,02	

Fonte: Autor, 2019.

APÊNDICE B – CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO

Brita 0							
Peneira N°	Abertura (mm)	AMOSTRA 1		AMOSTRA 2		% retida média	%retida acumulada
		Massa retida (g)	% retida	Massa retida (g)	% retida		
2"	50	0	0,00	0	0,00	0,000	0,000
1"	25	0	0,00	0	0,00	0,000	0,000
¾"	19	0	0,00	0	0,00	0,000	0,000
3/8"	9,5	0	0,00	0	0,00	0,000	0,000
¼"	6,3	162,5	32,50	148,4	29,68	31,090	31,090
N°4	4,75	184,3	36,86	187,1	37,42	37,140	68,230
	Fundo	152,2	30,44	164,3	32,86	31,650	99,880
	Final	499	99,8	499,8	99,96	99,85	

Brita 1							
Peneira N°	Abertura (mm)	AMOSTRA 1		AMOSTRA 2		% retida média	%retida acumulada
		Massa retida (g)	% retida	Massa retida (g)	% retida		
2"	50	0	0,00	0	0,00	0,000	0,000
1"	25	0	0,00	0	0,00	0,000	0,000
¾"	19	0	0,00	0	0,00	0,000	0,000
3/8"	9,5	380,9	76,18	402,2	80,44	78,310	78,310
¼"	6,3	103,7	20,74	85,8	17,16	18,950	97,260
N°4	4,75	4,2	0,84	4,5	0,90	0,870	98,130
	Fundo	11,2	2,24	7,5	1,50	1,870	100,000
	Final	500	100	500			