

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Juliano Romanzini Pedreira

**ALTERAÇÕES NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO CIMENTO
COM A SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DAS FRAÇÕES DE AREIA POR BIOCHAR
PROVENIENTE DA GASEIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

Itajubá - MG

Julho, 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Juliano Romanzini Pedreira

**ALTERAÇÕES NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO CIMENTO
COM A SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DAS FRAÇÕES DE AREIA POR BIOCHAR
PROVENIENTE DA GASEIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em **ENGENHARIA DE ENERGIA**.

Área de Concentração: ENERGIA E MEIO AMBIENTE

Orientadora: Regina Mambeli Barros

Itajubá - MG

Julho de 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Juliano Romanzini Pedreira

ALTERAÇÕES NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO CIMENTO COM A SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DAS FRAÇÕES DE AREIA POR BIOCHAR PROVENIENTE DA GASEIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação do Mestrado Profissional de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Itajubá, sob orientação da Profa. Dr^a. Regina Mambeli Barros e co-orientação do Prof. Dr. Gilbert Silva, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia.

Banca Examinadora:

Prof. Ivan Felipe Silva dos Santos

Profa. Katia Sakihama Ventura

Prof. Rubenildo Vieira Andrade

Itajubá - MG

Junho de 2019

Aos meus pais.
Aos meus familiares.
Aos meus amigos e professores.

AGRADECIMENTOS

Á todos que me apoiaram, com uma palavra, um gesto de incentivo e motivação nos momentos bons e ruins, para que eu seguisse o difícil e misterioso caminho da ciência.

A Deus, Senhor de todas as coisas e divino protetor que me dá forças, disposição, coragem e ânimo para caminhar em busca da concretização dos meus objetivos.

A Universidade Federal de Itajubá pela oportunidade de concluir o curso nesta prestigiada instituição.

Aos mestres da Universidade Federal de Itajubá, em especial, a minha orientadora e Professora Doutora Regina Mambeli Barros e também ao meu Co-orientador Professor Doutor Gilbert Silva que me orientaram, apoiaram e conduziram no caminho certo para o desenvolvimento desta dissertação.

Ao Professor Doutor Sandro José de Andrade, e a amiga e Professora Nathália Vieira Barbosa pelo valioso apoio e suporte na realização dos experimentos nos Laboratórios de Química.

A todos os Professores do programa de mestrado que contribuíram para o meu crescimento pessoal e científico e ainda, ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas pelo apoio para conclusão deste trabalho.

E por fim, a todos os meus colegas de sala que estiveram junto a mim, compartilhando momentos de tensão nas horas de estudos, provas e trabalhos, sendo valioso apoio nas horas difíceis das diversas avaliações a que fomos submetidos.

“A alegria está na luta, na tentativa, no sofrimento envolvido e não na vitória propriamente dita”.

Mahatma Ghandi

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Adições Minerais	45
Figura 2 - Processo de fabricação do cimento	51
Figura 3 – Coprocessamento	57
Figura 4 – Esquema gaseificador em reator de leito fixo concorrente	72
Figura 5- Faixas de potência térmica características dos diferentes tipos de gaseificadores	73
Figura 6 – Fluxograma da pesquisa aplicada e etapas do trabalho	76
Figura 7 – Gaseificador de leito fixo instalado na UNIFEI	77
Figura 8 – Briquetes utilizados na gaseificação	79
Figura 9 – Espectrofotômetro de absorção atômica por chama	82
Figura 10 – MEV/EDS e Difratorômetro de Raios X	83
Figura 10 – Curva “S” do Biochar de RSU	83
Figura 11 – Distribuição granulométrica do biochar de RSU	86
Figura 12 – Curva “S” – Biochar de RSU	87
Figura 13 – Distribuição das zonas do módulo de finura	87
Figura 14 – Aspecto ferruginoso do corpo de prova	93
Figura 15 – Foto micrografia do Ponto 0 (a) e Ponto 2 (b)	94
Figura 16 – MEV/EDS do Biochar de RSU	95
Figura 17 - EDS do Ponto 0 – Espectro por dispersão de Energia com tabela de discriminação dos elementos identificados.	95
Figura 18 - EDS do Ponto 2 – Espectro por dispersão de Energia com tabela de discriminação dos elementos identificados.	96
Figura 19 – Difratorograma da argamassa endurecida com a adição dos diversos teores de biochar	100
Figura 20 – Difratorograma do biochar de RSU	103
Figura 21 – CP’s durante a moldagem e após a desmoldagem	103
Figura 22 – Resistência a compressão	104

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1-	Aplicação do biochar de RSU	44
Tabela 2-	Limites Máximos de Emissão	60
Tabela 3-	Séries Normal e Intermediária	80
Tabela 4-	Traços utilizados no estudo	81
Tabela 5-	Resultados do ensaio da granulometria do biochar de RSU	84
Tabela 6-	Massa inicial, M.F. e D.M.C do RSU	86
Tabela 7-	Traço preconizado pela NBR 7215	88
Tabela 8-	Caracterização física dos cimentos Cauê e Holcim	90
Tabela 9-	Análise química dos cimentos obtidos por fluorescência de Raios X	91
Tabela 10-	Concentração de metais identificados no biochar de RSU	93
Tabela 11-	Porcentagens em peso - Ponto 0	96
Tabela 12-	Porcentagens em peso - Ponto 2	97
Tabela 13-	Amostras analisadas por DRX	99
Tabela 14 -	Resistência a compressão	104

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A	-	Aceleradores de Pega
ABCP	-	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	-	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CONAMA	-	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPAM	-	Conselho Estadual de Política Ambiental
CP's	-	Corpo(s) de Prova
DMC	-	Dimensão Máxima Característica
DRX	-	Difração de Raios-X
EDS	-	Espectroscopia por Energia Dispersiva
EUA	-	Estados Unidos da América
FEAM	-	Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais
IAR	-	Incorporadores de Ar
MEV	-	Microscópio Eletrônico de Varredura
Mpa	-	Megapascal
MF	-	Módulo de finura
NBR	-	Norma Brasileira Registrada
P	-	Plastificantes
PA	-	Plastificantes Aceleradores
PNRS	-	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PR	-	Plastificantes Retardadores
R	-	Retardadores de Pega
RSU	-	Resíduo Sólido Urbano
SP	-	Superplastificantes
SPA	-	Superplastificantes Aceleradores
UNIFEI	-	Universidade Federal de Itajubá
a/c	-	Relação água/cimento

RESUMO

A sociedade moderna vive uma época em que o consumo é cada vez mais acelerado. Como resultado, a produção de resíduos, principalmente os gerados nas cidades, cresceu sobremaneira e ultrapassou um bilhão de toneladas geradas no mundo no ano de 2016. Nesse contexto, é urgente a implementação de soluções para reutilizar, reciclar ou reaproveitar esses resíduos. Dentre as várias propostas, a gaseificação tem sido estudada por diversos pesquisadores, pois é uma maneira eficiente de gestão e destinação dos efluentes gasosos e demais resíduos sólidos urbanos. Neste sentido, o presente estudo apresenta uma investigação a respeito das alterações nas propriedades físicas e mecânicas do cimento com a substituição parcial das frações de areia descritas na Norma ABNT NBR 7215, por biochar proveniente da gaseificação de resíduos sólidos urbanos, com o objetivo de verificar a influência desse novo agregado na resistência do cimento. O biochar utilizado foi coletado na cidade de Itajubá, Minas Gerais, Brasil, na sede da UNIFEI. Os resultados alcançados permitiram evidenciar que ao se adicionar biochar, este prejudicou a trabalhabilidade da argamassa fresca. Nos testes de compressão, constatou-se uma grande redução em sua resistência mecânica, o que inviabiliza seu uso para fins estruturais. Nos testes químicos, verificou-se que o biochar apresentou em sua composição metais reativos quimicamente e bioacumulativos, os quais, o organismo humano não é capaz de eliminar, podendo gerar passivos ambientais se não forem devidamente manipulados. Foi concluído ser possível seu uso para concretos e argamassas não armadas e não estruturais em teores não superiores em 5% do total de agregado miúdo da mistura.

Palavras-chave: Cimento. Gaseificação. Biochar. Admixture. Propriedades físicas. Propriedades mecânicas. Resíduos Sólidos Urbanos.

ABSTRACT

The modern world is characterized by societies with increasing consumption rates resulting in increasing waste production, especially in cities. Levels have grown significantly and generated waste has surpassed one billion tons worldwide in 2016. Given this reality it is necessary to implement solutions to reuse or recycle waste. Gasification has been studied by several researchers, and is one of various options, representing an efficient way of managing and disposing of gaseous effluents and other urban solid waste. This study presents an investigation into the changes in the physical and mechanical properties of cement by partially replacing sand fractions with biochar derived from gasifying urban solid waste, according to standards established in the ABNT NBR 7215 standard. This study seeks to test the effects of this aggregate on the overall cement strength. Biochar used was collected in the city of Itajubá, Minas Gerais, Brazil, at the Federal University of Itajuba (UNIFEI) campus. The results showed that adding biochar impaired the workability of fresh mortar. A large reduction of mechanical resistance was observed in compression tests, making this an unviable alternative for use in construction. In chemical tests we observed that biochar is composed of chemically reactive and bioaccumulative metals, which the human organism cannot eliminate. This may lead to environmental liabilities if not properly handled. We have concluded that biochar can be substituted for use in non-reinforced and non-structural concretes and mortars at levels not exceeding 5% of the total aggregate mixture.

Keywords: Cement. Gasification. Biochar. Physical properties. Mechanical properties. Urban solid waste.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
	1.1 Justificativa	19
2	OBJETIVOS	21
	2.1 Objetivo Geral	21
	2.2 Objetivos Específicos	21
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
	3.1 Concreto	22
	3.1.1 Propriedades do Concreto no Estado Fresco	25
	3.1.2 Propriedades do Concreto no Estado Endurecido	28
	3.2 Aditivos e adições	32
	3.2.1 Aditivos	32
	3.2.2 Adições	34
	3.2.3 Adições minerais: definição e importância	36
	3.2.4 Adições minerais de subprodutos	37
	3.2.4.1 Cinza volante	37
	3.2.4.2 Escória de alto forno	38
	3.2.4.3 Sílica ativa	38
	3.2.4.4 Cinza de casca de arroz	39
	3.2.4.5 Cinza de bagaço de cana de açúcar	39
	3.2.4.6 Cinza da casca da castanha de caju	40
	3.2.4.7 Cinzas de carvão mineral	41
	3.2.4.8 Cinza da casca de coco verde	41
	3.2.4.9 Cinza de incineração de resíduos sólidos urbanos (RSU)	43
	3.2.5 Classificação, composição e características das principais adições minerais para concreto.	45
	3.2.6 Propriedades e tipos de cimento comercializados no Brasil	47

3.2.6.1	Microestrutura do concreto	52
3.2.6.2	Hidratação do cimento	52
3.2.6.3	Comportamento reológico das pastas de cimento	55
3.3	Coprocessamento	56
3.3.1	Coprocessamento de resíduos em fornos de cimento	56
3.3.2	Aspectos econômicos e ambientais do coprocessamento	58
3.3.3	Legislação federal aplicada ao coprocessamento	58
3.3.3.1	Resolução CONAMA nº 264, de 26 de agosto de 1999 – Coprocessamento em Fornos de Clinquer	59
3.3.3.2	Resolução CONAMA nº 316, de 29 de Outubro de 2002 – Sistemas de Tratamento Térmico dioxinas e furanos	60
3.3.3.3	Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010 - Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)	61
3.3.3.3.4	Decreto 7.404, de 23 de dezembro de 2010	61
3.3.3.3.5	Legislação Federal aplicada ao coprocessamento de RSU	62
3.3.4	Legislação Estadual aplicada ao coprocessamento	63
3.3.4.1	Minas Gerais – Copam (Conselho Estadual de Política Ambiental) – Deliberação Normativa COPAM nº 154/2010	63
3.4	Normas sobre aditivos e adições	66
3.4.1	Normas ABNT	66
3.4.2	Normas ASTM	67
4	INCINERAÇÃO E GASEIFICAÇÃO	68
4.1	Incineração	68
4.2	Gaseificação	70
5	MATERIAIS E MÉTODOS	75
5.1	Especificações do gaseificador utilizado na produção do biochar de RSU	77
5.2	Tipo de cimento Portland utilizado	78
5.3	Agregado miúdo(areia) utilizado nos ensaios	78

5.4	Briquetes de RSU utilizados na gaseificação	78
5.5	Coleta do biochar	79
5.6	Granulometria do biochar de RSU	79
5.7	Traços utilizados: substituição parcial da areia normal por biochar proveniente da gaseificação de RSU	80
5.8	Moldagens, desmoldagem, cura e rompimento dos corpos de prova (CP's)	81
5.9	Análises químicas quanto à presença de metais	81
5.10	Determinação dos elementos e compostos químicos presentes no biochar	82
5.11	Determinação dos compostos químicos presentes e pH das amostras após 28 dias	83
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	84
6.1	Análises do biochar da gaseificação de RSU	84
6.1.1	Especificação do gaseificador utilizado	84
6.1.2	Características dos briquetes utilizados como biomassa	84
6.2	Traço e tipo de cimento utilizado na composição das amostras	88
6.2.1	Traço de referência – NBR 7215 (Sem adição da biochar de RSU)	88
6.2.2	Caracterização física e química do cimento utilizado – Cauê	89
6.3	Caracterização química do biochar de RSU	91
6.3.1	Presença de metais	91
6.3.2	Composição Química da Cinza de RSU – MEV e EDS	94
6.3.2.1	MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura	94
6.3.2.2	EDS do biochar de RSU	94
6.3.3	Difração de Raios – X	97
6.3.3.1	DRX dos corpos de prova após o rompimento	97
6.3.3.2	Difração de raios-x do biochar de RSU	101
6.4	Corpos de Prova – Moldagem e Cura	102
6.4.1	Resistência Mecânica	103
7	CONCLUSÕES	106

7.1 Recomendações	107
REFERENCIAS	108

1 INTRODUÇÃO

A sociedade, de um modo geral, vive em uma época em que o consumo é cada vez mais acelerado, e, conseqüentemente, o aumento dos resíduos sólidos urbanos. Mallmann (2013) define resíduos sólidos urbanos, como os resíduos domiciliares e os resultantes de limpeza urbana. A quantidade gerada irá depender de diversos aspectos, tais como, por exemplo, costumes e hábitos da sociedade. De acordo com a Abrelpe, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, (Abrelpe, 2017), no ano de 2017 foi gerada 78,4 milhões de toneladas de RSU no país, sendo que 71,6 milhões foram efetivamente coletadas.

Em âmbito global, segundo o Banco Mundial, (Banco Mundial, 2016), foram geradas 1,3 bilhão de toneladas de RSU. Porém, com a evolução tecnológica juntamente com a necessidade de dar a devida destinação a esses resíduos, algumas propostas devem ser adotadas, como é o caso de gaseificá-los para utilização do gás de síntese gerado ou com o aproveitamento do biochar, subproduto gerado no processo de gaseificação e que pode substituir parte da areia utilizada em concretos e argamassas. Esta pode ser vista, inclusive, como uma forma de eliminar os resíduos sólidos, além de ser caracterizada como uma fonte que poderá ser viável em termos técnicos e econômicos para o setor da construção civil, caso utilizado em percentuais adequados e da maneira correta.

Assim sendo, observa-se que muitas foram e continuam sendo cada vez mais dinâmicas as inovações que vão sendo criadas acerca dos projetos de engenharia de todas as áreas e segmentos. Conseqüentemente, o mercado tem exigido estudos e pesquisas aprofundadas a respeito dos componentes que são parte fundamental no setor da engenharia, como os concretos e argamassas.

Decorrente de vários estudos, novos tipos de concretos foram sendo desenvolvidos para atender às necessidades diversas, desde o convencional, até o concreto aparente, de alto desempenho, com elevados teores de adições pozolânicas, reforçado com fibras, sustentáveis, coloridos, brancos e autoadensáveis, dentre outros.

A necessidade por melhoria nas estruturas, sobretudo em projetos de engenharia, faz com que profissionais desta área considerem as adições e aditivos

de grande relevância para a função mecânica e durabilidade e, com isso, pesquisam sobre novas alternativas e práticas voltadas aos concretos e argamassas. A este respeito, é preciso salientar, por exemplo, que no ano de 1988, na procura por uma opção que oferecesse maior vida útil para as estruturas de concreto, foi desenvolvido no Japão um concreto que apresenta alto desempenho e excelente deformabilidade quando no estado fresco, além de elevada resistência à segregação, denominado autoadensável (CAVALARO e CARBONARI, 2006).

Segundo o Centro de Informações Minerais (USGS: Mineral Commodity Summaries, 2019), órgão ligado ao governo americano, o consumo mundial de cimento em 2018 foi de mais de 4 bilhões de toneladas. Desse total, 52 milhões de toneladas foram consumidas no Brasil.

Sendo assim, a alta demanda por cimento, aliada a necessidade de dar destinação adequada ao crescente volume de RSU gerado nas cidades, foi o ponto de partida para se pensar em propostas para reutilizar o RSU nas mais variadas misturas com cimento, como em argamassas e concretos.

Neste sentido, este estudo propõe o uso de um subproduto do RSU (biochar) nos concretos/argamassas por meio da substituição do agregado miúdo convencional (areia) utilizado em quase todas as misturas normalmente utilizadas com cimento. Mesmo sendo um agregado novo, há a possibilidade de sua separação em frações granulométricas adequadas como veremos adiante.

Dessa forma, a expectativa é que o biochar de RSU seja capaz de apresentar determinada resistência mecânica tais como ocorre com alguns tipos de materiais reciclados, como, por exemplo, a areia de fundição. Também é esperada a formação de novos compostos químicos após a mistura, mas que não sejam prejudiciais à mistura ou ao seu uso sustentável.

Considerando que o biochar utilizado não possui padrões gravimétricos e de composição química durante sua produção, é esperado certo potencial de contaminação e toxicidade ao meio ambiente e ao homem. Entretanto, há o benefício ambiental oriundo do uso de subprodutos de processos térmicos de tratamento dos resíduos sólidos, como a redução de RSU nos aterros controlados e sanitários. É também uma forma, inclusive, de diminuir os danos que os resíduos sólidos podem causar ao meio ambiente, no contexto da economia circular, cujo objetivo é manter produtos, componentes e materiais em seu mais alto nível de utilidade e valor o tempo todo. Quando esses resíduos chegam a um aterro, sua

degradação produz diversos gases do efeito estufa (GEE), como o metano (CH_4), por exemplo.

De acordo com Barros *et al.* (2018), durante a decomposição predominantemente anaeróbia de RSU em aterros sanitários, ocorre a produção de subprodutos, como lixiviado / digestato altamente nutritivo e biogás. Esses subprodutos são ricos em metano (CH_4 , 35-65 vol.%), dióxido de carbono (CO_2 , 15-40 vol.%), água, nitrogênio e compostos aromáticos, como sulfeto de hidrogênio.

Muito se pesquisa o uso de diversos tipos de materiais e resíduos, para confecção de concretos e argamassas. Dentre tais pesquisas, há os estudos de Lima e Rossignolo (2009), Gomes, *et al.* (2015) e Frotte, *et al.* (2017). Rukzon, *et al.* (2009) por exemplo, estudou a adição ao cimento de cinzas de combustível de óleo de palma e casca de arroz. Yakubu *et al.* (2018) também pesquisou sobre o potencial de utilização industrial do biochar resultante da incineração de resíduos sólidos urbanos.

Por se tratar de uma tecnologia ainda não tão difundida em escala comercial, a gaseificação produz subprodutos sólidos que merecem destaque para pesquisas. O aproveitamento do biochar de resíduos sólidos urbanos provenientes da sua gaseificação contribuirá para fornecer uma reinserção deste subproduto na cadeia produtiva, economizando espaço em aterros de resíduos sólidos, sejam eles controlados ou sanitários. Poderá agregar valor a tal subproduto, talvez até, gerando receitas para os empreendimentos de gaseificação.

De um modo geral, o concreto possui características distintas que o difere um do outro e que pode ou não reduzir os custos financeiros do projeto de engenharia, conforme cada necessidade. Pelo fato de os resíduos sólidos urbanos representarem significativa parcela dos resíduos produzidos em diversas cidades, busca-se responder ao seguinte questionamento: é possível substituir frações de areia (agregado miúdo) por biochar resultante da gaseificação de Resíduos Sólidos Urbanos sem que haja alterações deletérias significativas nas propriedades físicas e mecânicas dos concretos/argamassas?

Portanto, dado o questionamento supracitado, esta dissertação tem como objetivo estudar as alterações nas propriedades físicas e mecânicas do cimento com a adição de biochar proveniente da gaseificação dos RSU, tendo como referência a Norma ABNT NBR 7215 (ABNT, 1996), as características físicas e químicas desses

resíduos e a sua influência na resistência final das argamassas elaboradas com tal subproduto em substituição as frações de areia.

1.1 Justificativa

O concreto, segundo Cavalaro e Carbonari (2006), não possui nenhuma característica especial, sendo apenas um material comum e usual no dia a dia das empresas de diversos segmentos, tais como, por exemplo, a construção civil. Ele pode ser aplicado na realização de praticamente todos os tipos de estruturas, desde que sejam tomados os devidos cuidados e precauções quanto ao seu adensamento.

Em muitas empresas, os custos e tempo são cada vez mais altos com relação ao concreto, levando-as a tentarem reduzir custos em outros setores. Mas, com o avanço tecnológico, tem sido possível fazer com que o processo se torne mais efetivo, pois há disponível no mercado, material da categoria cimentícia que pode ser moldado diretamente nas fôrmas, capaz de preencher todo espaço exclusivamente por meio do seu peso próprio. Além disso, não requer qualquer tipo de compactação ou vibração externa, o que reduz a mão de obra e quantidade de material na obra.

Além do exposto, à proposição do uso do biochar proveniente da gaseificação dos resíduos sólidos urbanos é uma forma de gestão eficiente para a destinação adequada desses efluentes gasosos, assim como dos resíduos. Estabelece-se um tipo de reuso, contribuindo para a preservação do meio ambiente e minimizando o descarte de resíduos na natureza (CAVALCANTI, 2006).

A partir do contexto apresentado, nota-se a importância do desenvolvimento dessa dissertação que busca determinar as alterações nas propriedades físicas e mecânicas do cimento com a substituição parcial das frações de areia (agregado miúdo) previstas na Norma NBR 7215 por biochar resultante da gaseificação de Resíduos Sólidos Urbanos. Portanto, objetiva-se contribuir na redução de custos e oferecer aos muitos setores da economia, opções de elaboração para concretos e argamassas.

Quanto à relevância acadêmica, este estudo permite ao mestrando, conhecer com maior profundidade o tema em estudo e colocar em prática os conhecimentos adquiridos na academia ao longo do curso, expandindo seus saberes. Além disso, o

desenvolvimento desta pesquisa pode servir de base como proposta para empresas adotarem o agregado que se pretende desenvolver.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Estudar as alterações nas propriedades físicas e mecânicas da argamassa com a substituição parcial das frações de areia previstas na Norma ABNT NBR 7215 (Cimento Portland – Determinação da resistência a compressão), por biochar resultante da gaseificação de Resíduos Sólidos Urbanos coletados em gaseificador em escala piloto na cidade de Itajubá, Estado de Minas Gerais, Brasil.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar a resistência mecânica do cimento com base na ABNT NBR 7215, com substituição parcial das frações de areia previstas na referida norma, por biochar resultante da gaseificação de resíduos sólidos urbanos oriundos da cidade de Itajubá, Minas Gerais - Brasil;
- Identificar metais porventura existentes no biochar;
- Identificar a formação de novos compostos químicos e analisar sua influência nos resultados dos traços de argamassa no estado endurecido após 28 dias;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Concreto

De acordo com Frotté *et al.* (2017), os primeiros materiais que se tem conhecimento na história a serem utilizados nas antigas construções foram aqueles que se encontravam disponíveis na natureza, a pedra natural e a madeira. Tempos mais tarde, o homem começou a fazer uso de aço, ferro e concreto para as construções. Ainda conforme os autores, o material que foi considerado como sendo o mais adequado para serem empregados nas construções foi aquele que apresentava as qualidades de resistência e durabilidade juntas, como a pedra, a madeira, o ferro e aço.

No contexto histórico, Rodrigues (2005) preconizou que as primeiras construções de pedra são datadas entre 8.000 e 4.000 a.C., sobretudo entre os povos do mediterrâneo e os da costa Atlântica. A partir de descobertas da arqueologia, há vestígios de uma construção de cerca de 4.000 a.C. parcialmente executada em concreto. Anos mais tarde (3.500 a.C.) houve a aplicação de tijolos de barro cozido em uma civilização construída pelos Sumérios, a mais antiga nas terras da Mesopotâmia e Oriente. O barro misturado com palha na fabricação de tijolos foi empregada entre 3.000 e 2.500 a.C. para a fabricação de tijolos, além da argamassa de gipsita e cal na construção de pirâmides.

No caso da rocha, por exemplo, Frotté *et al.* (2017) sinalizam ter sido muito utilizada nas construções antigas, como também foi apontado por Rodrigues (2005), pois apresenta resistência à compressão e durabilidade altas. Porém, em contrapartida, possui baixa resistência à tração. Quanto à madeira, esta tem razoável resistência, porém, sua durabilidade é limitada. O ferro e o aço, por sua vez, apesar de terem alta resistência apresentam a durabilidade limitada devido à corrosão que podem sofrer.

A partir do exposto, Frotté *et al.* (2017) explicam que o concreto, portanto, foi criado para atender à necessidade do homem em agregar a durabilidade da pedra com a resistência do aço. Além disso, essa união apresenta como vantagens, o ato do composto ter a capacidade de assumir qualquer forma, de forma rápida e fácil.

Além do exposto, os autores ainda observam que a fartura que há das matérias primas em praticamente todos os lugares e a elevada versatilidade para aplicação nas diversas formas, constituíram-se nos principais fatores que levaram ao seu desenvolvimento.

Rodrigues e Fucale (2014) sinalizam que na antiguidade, os povos que mais se destacaram no uso dos concretos foram os romanos, permitindo a eles criarem espaços grandiosos em formas diversas como cúpulas, arco e abóbadas. Em combinação com o concreto que existia na época, aliado aos tijolos de argila, pedra e demais composições naturais, puderam executar obras magníficas e únicas para a época, introduzindo, assim, significativa revolução para a Arquitetura da época.

Gomes *et al.* (2015) salientam que dentre os exemplos que mais marcaram a serem citadas das construções romanas que usaram o concreto são o Coliseu e o Panteão. O Coliseu, segundo Gomes *et al.* (2015), é uma construção de 69 e 79 d.C., e é até hoje a maior obra construída pelos romanos, na qual foram usadas rochas e concreto. O Panteão foi construído em 27 a.C usando concretos de diferentes materiais, possuindo o formato de abóbada.

Segundo os autores supracitados, a partir do momento em que o ferro foi juntado ao concreto, o conjunto obteve maior resistência às tensões de tração, permitindo, assim, o aumento de possibilidades da sua aplicação se comparado ao primeiro concreto criado e aplicado pelos romanos. Sua capacidade de resistir às tensões de compressão fez com que os projetos estruturais se tornassem o mais usado como material para a construção de diferentes tipos existentes atualmente.

Em relação ao concreto, Kumar (2014) enfatiza sobre a existência de concreto adicionado, que surgiu decorrente da necessidade observada em proporcionar melhorias e aprimorar algumas características, levando ao desenvolvimento de materiais aditivos. Tal fato gerou o incentivo pela criação de outros tipos de materiais que, ao serem devidamente adicionados ao concreto, proporcionaram melhorias maiores ao seu desempenho.

Ainda quanto ao concreto adicionado, o autor sinaliza que foram diversas as experiências positivadas evidenciadas quanto ao uso de determinados materiais, que resultaram no aumento da resistência, redução do calor de hidratação e diminuição de fissuras. No concreto adicionado, como aponta Kumar (2014), os materiais a ele adicionados à mistura, de um modo geral, não apresentam uma classificação oficial.

Continuando o contexto histórico, Priszkulnik (2005) afirma que no ano de 1963, o consumo mundial de concreto já estimava em aproximadamente três bilhões de toneladas, o que representava uma tonelada por cada ser humano vivo. O resultado do seu alto consumo se deve ao fato de ser facilmente encontrado os materiais que o constituem, aliado ao custo relativamente baixo que apresenta. Deve-se citar, também, sua facilidade de execução, adequação a quase todo tipo de tamanho, estrutura e forma, ótima resistência à água.

Para Cunha e Cortes (2014), os materiais de construção que são preparados à base de cimento têm sido considerados os mais relevantes desenvolvidos pelo homem. Isto porque lhe deu condições de construir edificações de pequena e grande complexidade, tais como, por exemplo, as barragens, habitações, rodovias, pontes, obras sanitárias, dentre outros. Cunha e Cortes (2014) explanam que dentre os componentes estruturais de construção, o concreto é um o material mais importante, pois, a sua aplicação vai desde grandes obras, a construções de edificações até pequenas peças pré-moldadas em baixa escala.

Dentre os materiais que compõem o concreto, Rodrigues e Fucale (2014) apontam a rocha, areia, água e o cimento, basicamente. O concreto, portanto, é o resultado da mistura, em quantidades corretas, de cimento, rocha, areia e água que, depois de misturados, precisa apresentar plasticidade suficiente e adequada para ser aplicado nas operações de manuseio, transporte e colocação em formas. Deve adquirir coesão e, inclusive, alta resistência ao tempo por causa das diversas reações que ocorrem entre cimento e água.

Contudo, atualmente há situações em que são adicionados aditivos que são capazes de alterar suas características físicas e químicas.

Ao explicar o que é cimento, Yazigi (2007) afirma ser um material cerâmico que, ao entrar em contato direto com a água, forma uma reação exotérmica de cristalização de produtos hidratados, o que o faz obter resistência mecânica. O cimento é o material principal aplicado em construções.

De acordo com Pereira *et al.* (2015), o concreto é um material que tem sido alvo de estudo para se conhecer suas características mecânicas e a durabilidade, de modo a permitir que fossem desenvolvidos concretos de maior resistência a serem aplicados em construções mais pesadas.

Depois de sua descoberta e ampla aplicação na construção de cidades e grandes metrópoles, Alves (2017) aponta que o concreto tem sido usado

diariamente desde o seu surgimento e evoluído ao longo dos tempos, recebendo mudanças e melhorias em sua composição. Sobre a composição do concreto, de um modo geral, tem-se mantido tradicionalmente a rocha britada como agregado graúdo e a areia como agregado miúdo.

Entretanto, embora mantenha esses elementos constituintes, a tecnologia permitiu outros aditivos e adições para proporcionar melhorias na qualidade do concreto em estado fresco ou endurecido, tal como explicado por Alves (2017).

O autor acima afirma que na composição do concreto, geralmente, se usa pedra britada e areia como agregado graúdo e miúdo. Este último age na composição do cimento para favorecer a sua coesão. Já o agregado graúdo em a função de contribuir para a resistência mecânica do concreto. Além deles, ainda há que se falar nos componentes que integram sua composição típica que são os aditivos.

3.1.1 Propriedades do concreto no estado fresco

É considerado no estado fresco, de acordo com Lima e Iwakiri (2014), o concreto que ainda tenha sido recém-misturado, em que se apresente no estado plástico, capaz de permitir a moldagem por meio da aplicação de cargas, se mantendo moldado depois de terminar a aplicação da carga. Neste estado, o concreto apresenta algumas características e propriedades, como trabalhabilidade, consistência, plasticidade e exsudação.

Mehta e Monteiro (2014) afirmam ser preciso que todas as propriedades sejam devidamente consideradas, pois, para a produção de concreto faz-se necessária à relação entre os materiais e na adequada dosagem, de modo a atender as características de durabilidade e resistência na estrutura.

Todas as operações para a produção do concreto podem ser influenciadas de acordo com as características dele, como, por exemplo, a trabalhabilidade, a maturidade, o tempo de pega, entre outros. Contudo, realizar o controle simultâneo de todas as operações das propriedades do concreto se torna fundamental para garantir que o elemento final de concreto acabado seja adequado estruturalmente para atender à finalidade a qual foi destinado.

Sobre a consistência e trabalhabilidade do concreto, Pereira *et al.* (2015) explicam que a primeira tem a finalidade de proporcionar maior ou menor esforço

para trabalhar com o concreto. Já a respeito da trabalhabilidade, os autores estabelecem a simplicidade de lançamento e a falta de segmentação no concreto fresco, associado ao acabamento, tipo de concreto, técnicas de lançamento, construção e adensamento.

Ainda com relação à facilidade de trabalhar o concreto, Rodrigues (2005), explica como sendo a propriedade que define o menor ou maior grau de facilidade quanto à sua aplicação e atender a determinado objetivo. Nesse contexto, entende-se que o concreto é considerado trabalhável nas situações em que ele se encontra no estado fresco, podendo observar sua consistência e dimensões máximas dos agregados, conforme o tipo de obra que se deseja aplicá-lo. Além disso, a trabalhabilidade do concreto também irá depender das condições que o local da aplicação apresenta.

Em relação à consistência, Rodrigues (2005) ainda define como sendo o grau de fluidez da mistura do concreto fresco, diretamente ligado à mobilidade da mistura de cimento e água. E, ainda, quando ao aspecto que pode influenciar na consistência, tem-se o teor de água/materiais secos. Neste caso, sugere-se que a consistência do concreto seja a mais plástica possível para apresentar maior facilidade de deslize e moldagem do concreto entre a armadura, sem separar os componentes.

Pereira *et al.* (2015) sinalizam que as misturas fluidas do concreto com alta consistência têm a tendência a segregar e exsudar o que causa prejuízos ao acabamento. Além disso, a mistura com consistência seca também pode apresentar dificuldade em lançar e adensar e quanto ao agregado graúdo, que poderá segregar no lançamento.

Conforme Lima e Iwakiri (2014), a segregação e exsudação podem intervir diretamente na trabalhabilidade do concreto, sendo que a segregação refere-se à perda de uniformidade da distribuição dos elementos do concreto fresco. Esta é uma tendência natural do concreto, especificamente na parte do transporte, lançamento e adensamento, provocado pelas diferenças nas massas e tamanhos das partículas dos materiais dos componentes do concreto.

Lima e Iwakiri (2014) ainda enfatizam que após a segregação do concreto fresco, torna-se impossível que seja feita a compactação ideal ou próxima, o que compromete a resistência e durabilidade da estrutura depois do endurecimento.

A exsudação, por sua vez, é explicada pelos autores como sendo a separação da parte da água da mistura do concreto que sobe à superfície do concreto para carregar um volume de partículas de cimento, constituindo uma nata com elevada relação água e cimento. Assim, nas estruturas concretadas em mais de uma camada, depois que ocorre o endurecimento, precisa-se escovar a superfície para retirar a matéria exsudada para conseguir melhor ligação na junta da concretagem.

Sobre a exsudação Rodrigues (2005) lembra que o fenômeno deve ser evitado, pois é caracterizado por promover a separação da água dos outros componentes do concreto, além de subir até a superfície da peça concretada. É um fenômeno que surge durante o processo de lançamento do concreto nas formas, sendo que a parte sólida não consegue reter a água de amassamento.

Segundo Rodrigues (2005), a plasticidade no concreto fresco é a propriedade que apresenta simplicidade com que ele possui para ser moldado sem que ocorra o rompimento. Contudo, depende diretamente da consistência do concreto, embora possua grande relevância em relação à quantidade de agregados miúdos no concreto.

O autor explica que quanto aos ensaios que descrevem as propriedades acima citados, bem como os limites aceitáveis, tem-se a consistência pelo abatimento do tronco de cone que é um ensaio conhecido como *slump test*. Este ensaio permite que seja avaliada a trabalhabilidade do concreto ainda em estado fresco, por meio da utilização de uma base metálica plana quadrada, uma haste metálica de seção circular e um molde tronco-cônico.

Contudo, ele não tem a capacidade de mensurar a facilidade de adensamento do concreto e, com isso, não aponta as condições de fato da mistura quando em condições dinâmicas.

É preciso que o ensaio comece pelo menos cinco minutos antes da coleta da amostra e, segundo Rodrigues (2005), é preciso controlar a trabalhabilidade durante o intervalo de tempo que se fizer entre a produção do concreto e sua aplicação. Ainda assim, é necessário enfatizar que não há ensaio com a total capacidade de fornecer uma mensuração precisa e completa das propriedades do concreto fresco.

Por outro lado, para mensurar a consistência do concreto, é indicado o uso do *slump test* anteriormente citado, pois, o abatimento do concreto pode ser usado como uma das medidas de referência do concreto.

Conforme se pode verificar, o concreto fresco apresenta algumas peculiaridades que devem ser observadas e seguidas de modo a se obter um concreto de acordo com a necessidade de cada caso.

3.1.2 Propriedades do concreto no estado endurecido

A principal característica do concreto endurecido, segundo Rodrigues (2013), dentre as tantas, é a alta resistência aos esforços de compressão. Mas, por outro lado, apresenta uma má resistência em relação aos esforços de tração. A resistência no concreto em estado endurecido pode ser obtida por meio da elaboração de corpos de prova devidamente padronizados conforme normas (no Brasil, ABNT), fazendo com que se torne possível a comparação entre os resultados a partir de um mesmo concreto.

Ainda conforme Rodrigues (2013), a respeito do peso específico do concreto endurecido, trata-se de uma característica que irá depender de uma diversidade de fatores, especialmente quanto à natureza dos agregados, granulométrica e técnica utilizada para a compactação.

Quanto às deformações do concreto endurecido, Pereira e Medeiros (2012) afirmam que elas podem surgir a partir de duas naturezas. A primeira, devido à variações das condições ambiente, ou seja, retração, umidade ou temperatura ambiente. A segunda decorrente da ação de cargas externas, tais como, deformação lenta, imediata, fluência ou lenta recuperável.

Os autores também explicam sobre a retração e afirmam ser a redução de volume do concreto, considerando o fim da cura até que ele chegue a um estado compatível de equilíbrio, conforme as características ambientes. O processamento da retração ocorre nos primeiros três a quatro meses de forma mais rápida e, após esse período, o processo se dá de modo lento.

A temperatura também pode ser aspecto influenciador ao concreto no estado endurecido. De acordo com Pereira *et al.* (2015), não se pode transmitir a variação da temperatura ambiente imediatamente ao concreto, porém, existe um efeito lento que se dá sobre a variação da temperatura do concreto.

Da mesma forma que o concreto no estado fresco possui algumas propriedades, é igualmente no concreto endurecido, sendo elas a resistência, durabilidade, impermeabilidade e aparência.

Sobre a resistência, Lima e Iwakiri (2014) explicam ser a capacidade que o concreto endurecido possui em relação à possibilidade de resistir às várias condições de carregamento as quais, ele está sujeito.

Essa propriedade do concreto é também a resistência mecânica, conhecida como “resistência característica do concreto”, representada pela sigla f_{ck} . É propriedade indicadora que caracteriza a resistência do concreto à compressão, ou seja, aquela aplicada com a finalidade de cálculo, em que é aceita a possibilidade de ocorrer somente 5% de valor de resistência à compressão inferior a ela.

De um modo geral, em relação à resistência, Lima e Iwakiri (2014) sinalizam que é preciso ao concreto endurecido, ter a durabilidade e a resistência mecânica de acordo com as necessidades e condições do projeto, tal como em coerência ao ambiente e estrutura. Para se obter a resistência desejada no concreto endurecido, conforme constante no projeto estrutural, é importante levar em consideração muitos aspectos.

Um desses aspectos é, segundo os autores supracitados, verificar, antes da execução, a dosagem do concreto. Neste caso, é preciso que se tenha a adequada especificação da relação água *versus* cimento, bem como conhecer todas as características que os agregados apresentem, sem deixar de observar a especificação do cimento.

Outro aspecto é durante a execução, sendo necessário ter cuidado na hora de receber, transportar, lançar, adensar e curar o concreto.

Ainda sobre a resistência do concreto endurecido, pode-se citar a abordagem de Pereira *et al.* (2015) que explicam sobre a resistência à tração simples, como sendo um dos elementos fundamentais do concreto. Normalmente, em obras, costuma-se não fazer ensaios com o concreto para analisar sua resistência à tração.

Contudo, determiná-la poderá ajudar na prevenção de futuras patologias e fissuras no concreto. A razão da importância do conhecimento dessa propriedade é que, tendo conhecimento das condições de movimentações higroscópicas, térmicas e carregamento, torna-se possível agir antes de acontecer à patologia.

A determinação da resistência à tração deve atender às exigências previamente estabelecidas pela Norma NBR 7222 (ABNT NBR 7222, 2011) que trata da “resistência à tração simples de argamassa e concreto por compressão diametral dos corpos-de-prova cilíndricos”.

A flexão à fadiga do concreto endurecido, segundo Rodrigues e Fucale (2014), visa a avaliar a resistência em relação à ação de cargas repetidas a qual é submetida. Essa capacidade que o concreto possui que o faz resistir aos esforços de tração por flexão vai diminuindo conforme cresce a frequência de atuação da carga. A partir dessa explicação, nota-se o quão relevante é considerar a flexão à fadiga no projeto, especialmente, em casos em que a estrutura poderá receber ações repetidas de cargas.

De acordo com Verzegnassi (2015), a propriedade do concreto endurecido denominada durabilidade é sobre a capacidade em resistir à ação do tempo, seja à abrasão, deteriorização, ataques químicos como por exemplo a carbonatação. Geralmente, a durabilidade do concreto endurecida irá depender de alguns fatores, tais como o tipo de ataque sofrido pelo tempo, se químico ou físico, etc. Cabe aos responsáveis pela obra, fazer uma criteriosa análise ao se fazer a escolha da dosagem e materiais utilizados no concreto, de modo que obtenha maior durabilidade.

É preciso que antes da execução da obra, os projetos sejam feitos, levando em consideração as estruturas de concreto, como serão construídas, sua exposição às condições ambientais, manutenção preventiva e corretiva, segurança, estabilidade e aparência que devem durar por determinado espaço de tempo.

Para Verzegnassi (2015), é fundamental às estruturas de concreto, um bom desempenho conforme as exigências mecânicas específicas e quanto às expectativas da durabilidade. A durabilidade do concreto, em algumas situações, é negligenciada devido à ideia de que um concreto resistente é também durável. Contudo, é preciso sempre se ter ciência de que as estruturas de concreto estão sujeitas a vários modos de ataques, seja por mecanismos de deterioração físicos ou químicos.

Além disso, os mecanismos de degradação do concreto se fazem a partir de processos complexos, no esqueleto dos poros, sendo que os problemas de durabilidade, geralmente, ocorrem devido às ações sinérgicas entre dois ou mais processos diferentes.

O autor supracitado ainda sinaliza sobre a relevância quanto à execução do concreto, pois deve ser precisa, usando, para tanto, mão de obra qualificada nas etapas, bem como a utilização de materiais de qualidade.

A impermeabilidade é uma propriedade do concreto endurecido que, segundo Frotte *et al.* (2017) está diretamente associada com a durabilidade, uma vez que, sendo impermeável, não haverá acesso de agentes agressivos ao concreto que, por sua vez, fará com que ele tenha maior durabilidade ao tempo. São diversos os elementos que influenciam na impermeabilidade do concreto endurecido, tais como, por exemplo, a porosidade da pasta, a relação água/cimento, a agressão química e retração hidráulica.

Em relação à porosidade da pasta, os autores supracitados salientam estar a impermeabilidade associada diretamente a ela e, assim sendo, quanto mais impermeável a pasta, menos porosa ela será. Sobre a relação água/cimento, pode-se afirmar serem os determinantes da estrutura da pasta, pois, é preciso que essa relação seja menor para que haja maior aproximação entre eles (água/cimento) e, conseqüentemente, os grãos de cimento serão menores e a porosidade da pasta também.

A agressão química segundo Frotte *et al.* (2017), especialmente se for por sulfatos, ao reagir com o aluminato de cálcio hidratado e hidróxido de cálcio livre e elevam o volume dos sólidos. Isto provoca expansão, levando à fissuração do concreto, deteriorando, em alguns casos, o concreto completamente endurecido.

Quanto à retração hidráulica, Frotte *et al.* (2017) sinaliza ser consequência da retração da pasta de cimento devido a alterações de tamanho sofridas decorrente da movimentação da água. Essa movimentação, por sua vez, causa tensões sobre o concreto, levando ao surgimento de fissuras.

Segundo Pereira *et al.* (2015), existem três ensaios que podem ajudar a determinar a resistência à tração do concreto, sendo eles, de tração axial, de compressão diametral ou flexão de vigas.

No caso da resistência à compressão, Lima e Iwakiri (2014) explicam ser importante considerar a possibilidade da correlação com a tração do concreto, pois, na flexão, a resistência à tração é igual à quinta parte da resistência à compressão do concreto. E a resistência à tração é equivalente à décima parte da resistência à compressão do concreto.

Com a finalidade de proporcionar melhorias e aperfeiçoar a qualidade do concreto, Alves (2017) afirma que foram sendo elaborados aditivos e adições como ingredientes para alterar as propriedades do concreto, estudados a seguir.

3.2 Aditivos e adições

Segundo a Norma ASTM C 125 (2017), aditivos e adições são materiais diferentes de água, agregados, material cimentício hidráulico e reforço de fibra que é usado como ingrediente de uma mistura cimentícia para modificar suas propriedades recentemente misturadas, endurecidas ou que são adicionadas ao lote antes ou durante sua mistura.

As adições e aditivos, segundo Verzegnassi (2015), são materiais aplicados no concreto com a finalidade de alterar ou melhorar suas características no estado fresco e endurecido e adaptá-lo às exigências para o seu uso em determinado projeto. São materiais usados para controlar o desenvolvimento e/ou aumentar a resistência, melhorar a trabalhabilidade, modificar os tempos de pega, diminuir possibilidades de corrosão da armadura, reduzir problemas relacionados à ação do congelamento e reações álcali agregados e diminuir o índice de vazios, aumentando a compacidade.

A Norma ASTM C 125 (2017) define aditivos e adições apenas como “*admixture*”. Inúmeros tipos de aditivos e adições são usados na produção do concreto em todo o mundo com o objetivo de alterar as propriedades do concreto de acordo com a conveniência e necessidade de uma edificação. O efeito da presença desses materiais no comportamento reológico do concreto fresco se torna rapidamente aparente, mas pode levar dias ou meses para que os efeitos químicos na hidratação se manifestem.

Ademais, apenas uma classificação não consegue abordar todos os aditivos e adições para concreto disponíveis, suas composições e mecanismos de ação e suas respectivas aplicações. Dessa forma, é adequado agrupar estes materiais em três categorias: (1) Substâncias Químicas Tensoativas; (2) Substâncias Químicas modificadoras de pega; e (3) Adições minerais.

3.2.1 Aditivos

O reconhecimento de que as propriedades do concreto fresco ou endurecido podem ser modificadas com a adição de determinados materiais à mistura é responsável pelo grande crescimento da indústria de aditivos e adições para

concreto nos últimos 60 anos. Segundo Kumar (2014), centenas de produtos são comercializados atualmente e em países desenvolvidos, 80 a 90% de todo concreto produzido contém um ou mais desses materiais.

Para Rodrigues (2005), em concreto, os aditivos são considerados todo e qualquer produto necessário à aplicação em sua composição, que ao ser aplicado imediatamente no concreto, seja antes ou durante a mistura, contribui para o surgimento ou aumento de determinadas características. Tais características podem ser, dentre outras, a resistência mecânica, tempo de pega, trabalhabilidade, resistências à algumas condições específicas ou, tempo de endurecimento.

De acordo com Rodrigues (2005), aditivo é definido como sendo todo produto não indispensável à constituição e objetivo do concreto que, colocado no concreto antes ou durante o processo de mistura, imediatamente, em baixas qualidades e homogeneizado, faz surgir ou elevar suas características. Dentre tais características, o autor cita a resistência mecânica, a trabalhabilidade, o tempo de pega ou endurecimento, resistências a determinadas condições especiais e impermeabilidade.

Complementando a explicação dada por Rodrigues (2005), há ainda a abordagem de Almeida (2002) sobre os aditivos em cimentos. O autor afirma ser preciso adicioná-los em quantidade inferior a 5% do peso de cimento, pois, acima desse valor, são as adições acrescentadas em maior quantidade. Dentre os tipos de aditivos que existem, podem-se citar os plastificantes, aceleradores de pega e endurecimento, incorporadores de ar, impermeabilizantes e colorantes.

Como forma de fundamentar o exposto por Almeida (2002), para Rodrigues (2013), em concretos de cimento Portland, os aditivos são capazes de alterar algumas das suas propriedades para melhorá-los. Os principais tipos de aditivos são os retardadores de pega (R), plastificantes (P), superplastificantes retardadores (SPR), aceleradores de pega (A), superplastificantes (SP), plastificantes retardadores (PR), incorporadores de ar (IAR), plastificantes aceleradores (PA), superplastificantes aceleradores (SPA).

Segundo Dal Molin (2005), acerca dos superplastificantes, podem ser classificados em quatro categorias distintas, de acordo com a composição química que apresenta. A primeira categoria é dos lignossulfonatos modificados que normalmente agregam ar e retardam, com várias intensidades, a pega de cimento.

A segunda categoria, conforme o autor refere-se aos sais sulfonatos de policondensado de naftaleno e formaldeído, comumente conhecidos como naftaleno sulfonato ou somente naftaleno. Tais elementos não incorporam o ar e não influenciam no tempo de pega do cimento.

A terceira categoria, de acordo com Dal Molin (2005) é a dos sais sulfonatos de policondensado de melamina e formaldeído. A melamina, por sua vez, pode possuir tendência a retardar a pega do cimento e, em algumas vezes, incorporar pequena quantidade de ar.

A quarta categoria é explicada pelo autor como sendo dos policarboxilatos, sendo estes polímeros de cadeias longas e de grande massa molar. Tais aditivos possuem como instrumento básico de ação a repulsão estérica que, por sua vez, reúne os efeitos da repulsão eletrostática com o efeito de dispersão provocado pela grande massa que há entre os grãos de cimento. Desta forma, não permite que haja aproximação e floculem.

A Norma Brasileira ABNT NBR 11.768 (ABNT, 2011), define aditivos para concreto como produtos que são adicionados durante o processo de preparação do concreto, em quantidade não maior que 5% da massa de material cimentício contida no concreto, com o objetivo de modificar propriedades do concreto no estado fresco e/ou no estado endurecido, exceto pigmentos inorgânicos para o preparo de concreto colorido. Os aditivos variam muito na composição química. Muitos desempenham mais de uma função sendo difícil classificá-los apenas de acordo com suas funções.

Conforme Verzeznassi (2015), a finalidade dos aditivos em concreto é fazer com que eles atuem na dinâmica das reações químicas dos constituintes do cimento de forma direta para aumentar o contato entre a água e os grânulos de cimento, visando aperfeiçoar a plasticidade e trabalhabilidade do concreto.

3.2.2 Adições

Sobre as adições, Kumar (2014) salienta que diversos pesquisadores e empresas tem estudado a viabilidade da adição de vários tipos de materiais aos compostos de origem cimentícia. De cinzas de lodos de estações de tratamento de esgoto, casca de coco verde até cinzas de bagaço de cana ou de casca de arroz, a

origem desses produtos são as mais variadas. As adições normalmente são incluídas no concreto em maiores quantidades que os aditivos químicos.

Além do custo, Kumar (2014) ainda afirma que há os benefícios ambientais pela reutilização de materiais que seriam descartados na natureza e ainda, a possibilidade de que propriedades importantes do concreto possam ser melhoradas, como a trabalhabilidade do concreto fresco, maior resistência à fissuração térmica e até o incremento de resistência do concreto endurecido.

Kumar (2014) ainda explica que o uso de subprodutos industriais também tem se tornado fonte primária de adições minerais ao concreto em muitos países. A produção de ferro fundido, silício metálico e ligas de ferro silício em altos-fornos metalúrgicos são as principais fontes de subprodutos que podem ser utilizados como agregados para concreto, em forma de cimento Portland composto ou como adição mineral. Descartar esses materiais em aterros e córregos resulta em desperdício de material e causa sérios problemas ambientais.

De acordo com Rodrigues (2013), as adições em concreto compõem os materiais inseridos nele, em quantidade adequada, para diversificar os cimentos comerciais. Desta forma, ao modificar sua composição a partir de adições, eles passam a ser chamados de aglomerantes, como, por exemplo, cinza volante, escória de alto forno, e outros. As adições são materiais que podem ser inseridos aos concretos ou em cimentos na fábrica, resultando na diversidade de cimentos comerciais. Ao fazer a alteração da composição dos cimentos por meio de introdução de adições, eles podem ser chamados de aglomerantes, como, por exemplo, sílica ativa de ferro-silício, escória de alto forno, cinza volante e metacaulinita.

A ASTM (2010), por meio da Norma ASTM C 618, *Standart Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete*, menciona três categorias de adições minerais: Classe N, Classe F e Classe C.

A ASTM (2010) explica que A Classe N engloba as pozolanas naturais ou calcinadas, como cinzas vulcânicas ou pedra pomes e materiais calcinados como as argilas. Fazem parte da Classe F as cinzas volantes produzidas pela queima do carvão mineral antracítico ou betuminoso. Já na Classe C estão presentes as cinzas normalmente produzidas pela queima de carvão mineral lignítico ou sub-betuminoso. Ainda segundo a ASTM C 618, as cinzas da Classe C tem poder cimentante devido

à alta quantidade de cálcio (Ca) em sua composição, sendo essa a principal diferença entre as cinzas da Classe C e Classe F.

Importante ressaltar que outra norma publicada pela ASTM, denominada ASTM C 989 está livre de exigências químicas e físicas complicadas. Ao contrário da ASTM C 618 que determina que quando um determinado material atende ao desempenho desejado, não há necessidade de especificações prescritivas.

Para Kumar (2014), na base dessa norma há um ensaio que utiliza escória com cimento Portland com o intuito de categorizá-la com base na contribuição para a resistência da mistura cimento Portland/escória. São avaliadas com base na determinação da resistência à compressão de argamassas de referência de cimento Portland, apenas e de escória e combinados, em proporções iguais em massa (50% cada).

Segundo Frotte *et al.* (2017), é preciso considerar as adições minerais como muito refinados, pois sua composição contém alta quantidade de sílica amorfa, reativa que, ao serem adicionados no concreto tem a capacidade de modificar o balanço dos demais produtos químicos que constituem a hidratação do cimento.

3.2.3 Adições minerais: definição e importância

Em obra de construções civil é comum ouvir dizer em adições minerais ao concreto que, segundo Pinheiro *et al.* (2017) nada mais é que todo material utilizado nele como um tipo de ingrediente, adicionado diretamente e imediatamente à massa no momento da mistura. Contudo, não podem ser consideradas adições, a água, cimentos hidráulicos e agregados. A importância dada às adições minerais versa sobre o fato de serem adicionados ao concreto para melhorar suas propriedades.

A definição de adições minerais é dada por Albuquerque e Lima (2014) é como sendo materiais inorgânicos, constituído de sílico-cálcico-aluminosos, usados para substituir parte do cimento se apresentar estrutura vítrea. Geralmente, são usadas as pozolanas, por reagirem com a cal surgida das reações de hidratação ou a escória granulada de alto forno. O alto teor de cálcio apresenta propriedades pozolânicas e cimentícias.

De acordo com Daros (2009), a adição de minerais no concreto tem o como um dos seus objetivos, aumentar a coesão da mistura, prevenindo que ocorra a segregação do agregado graúdo. Com adições de minerais, pode-se produzir na

microestrutura do concreto, efeitos físicos e químicos que ocorrem decorrente da reação com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), consequente deste composto solúvel que se constitui durante a hidratação de cimento Portland, em um composto resistente que é o silicato hidratado de cálcio (C-S-H).

Conforme Albuquerque e Lima (2014), as adições minerais no concreto podem ser obtidas de modo natural ou artificial. Quanto obtida de forma natural, o processo ocorre por meio de moagem e britagem, caracterizada conforme o tamanho de partícula ou a partir de solos naturais vulcânicas ou pela ativação de rochas. Dentre as adições minerais obtidas por meios naturais, pode-se citar, dentre outras, as terras diatomáceas, tufo vulcânico, vidro vulcânico, argilas e folhelhos calcinados.

Quanto às adições minerais artificiais, Albuquerque e Lima (2014) explicam que estes são obtidos a partir de resíduos industriais, especialmente por meio das cinzas da combustão do carvão de termelétricas, casca de arroz, escória granulada de alto forno de materiais ferrosos e não ferrosos, carecendo passar por processo de beneficiamento. Dentre as adições minerais obtidas por alternativas artificiais, pode se citar como exemplo a sílica ativa, cinzas volantes e escória granulada de alto forno.

3.2.4 Adições minerais de subprodutos

3.2.4.1 Cinza volante

Conforme Alencar e Helene (2006), a cinza volante é um material inorgânico que apresenta em sua composição boas propriedades pozolânicas, podendo ser aplicado no concreto de modo a melhorar as propriedades no seu estado fresco ou endurecido. Além disso, por possuir uma forma quase esférica, possibilita a rolagem dos agregados, diminuindo o atrito interno entre eles e dos mesmos com partículas de cimento, resultando em maior fluidez e viscosidade, reduzindo o consumo do superplastificante.

Explicando o que é superplastificante, Alves (2017) afirma serem produtos compostos à base de polissacarídeos com cadeias poliméricas de alto peso molecular. Quando aplicados no concreto, eles otimizam a coesão da massa em seu estado fresco, impedindo a segregação, restringindo, assim, a perda de água por

exsudação. Tal fato possibilita a redução dos efeitos indesejáveis da ausência de uniformidade na dosagem do volume de água e da curva granulométrica dos agregados.

Para Mello (2005), a utilização da cinza volante nas propriedades do concreto quando em estado fresco leva à diminuição da quantidade de água para que seja alcançada uma fluidez específica e maior coesão, além da diminuição significativa de exsudação e segregação. Além disso, esse material também resulta em maior fluidez e pode ser bombeado.

3.2.4.2 Escória de alto forno

De acordo com Daros (2009), a escória de alto forno é o subproduto da indústria do ferro-gusa e tem as características cimentantes e químicas oriundas dos fundentes adicionados à mistura. No processo de resfriamento rápido, ela se solidifica em uma forma vítrea e, assim, torna-se reativa. Quando adicionada em mistura de cimento Portland, comumente diminui a demanda de água e proporciona melhoria na trabalhabilidade do concreto.

Daros (2009) ainda salienta que os grãos de escória de alto forno têm superfície lisa e limpa com planos de deslizamento que permitem a trabalhabilidade e menor velocidade de hidratação. Com ela, o concreto tem a exsudação diminuída e o calor de hidratação também reduz devido ao aumento teor de escória.

3.2.4.3 Sílica ativa

Para Daros (2009), a sílica ativa é um subproduto usado na indústria de ferrosilício, criada a base do monóxido de silício lançado ao ar que passa a ser transformado em pó devido à oxidação ao entrar em contato com a atmosfera. O autor enfatiza que a sílica no concreto possibilita que seja feita uma mistura mais homogênea, além de diminuir a segregação e exsudação, melhorando a distribuição dos agregados. Esse componente ainda promove melhorias em outros aspectos do concreto que está no estado fresco ou endurecido, pois aumenta a coesão interna, viscosidade e, consecutivamente, a trabalhabilidade.

Conforme Cavalcanti (2006), a sílica ativa no seu estado endurecido desempenha forte influência sobre as propriedades mecânicas do concreto e, desta

forma, aumenta a resistência à tração, à compressão e maior aderência com os aços e demais superfícies de concreto. O autor ainda observa que a sílica ativa exerce forte influência vantajosa quanto à resistência a abrasão e a corrosão química, o que resulta, conseqüentemente, no aumento da durabilidade.

3.2.4.4 Cinza de casca de arroz

Dal Molin (2005) explica ser um material decorrente da combustão da casca de arroz. Este último, por sua vez, possui em sua composição elevada quantidade de sílica, especialmente na casca. Quanto à casca de arroz, esta é formada por aproximadamente 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica. O autor salienta que a cinza de casca de arroz como material pozolânico tem sua eficiência associada ao processo de obtenção.

3.2.4.5 Cinza de bagaço de cana de açúcar

Outra adição mineral de subproduto a ser citada é a cinza de bagaço de cana de açúcar que, segundo De Paula *et al.* (2009) tem sido utilizada devido à necessidade de se usar alternativas para a geração de energia a partir de fontes renováveis.

Os autores explicam que durante o processo de extração do caldo da cana de açúcar, uma significativa quantidade de bagaço é gerada, sendo esta biomassa considerada de grande relevância como fonte de energia. No Brasil, por exemplo, aproximadamente 95% de todo o bagaço que é produzido vão para as caldeiras para serem queimados para gerar vapor.

Ainda conforme De Paula *et al.* (2009), a cinza do bagaço de cana de açúcar é composta de sílica (SiO_2), praticamente, fazendo com que o bagaço possa ser usado como adição mineral. Esta afirmativa pode ser mais bem compreendida conforme De Paula *et al.* (2009) afirmam que uma grande quantidade de bagaço é obtido durante a extração do caldo da cana-de-açúcar, normalmente, uns 30% da cana moída. Também é obtida a biomassa, sendo esta, fonte energética.

Esse bagaço é composto de sílica, SiO_2 , permitindo à cinza do bagaço apresentar potencial para ser usada como adição mineral e substituir parte do cimento em argamassas e concretos.

Para Lopes *et al.* (2014), a cinza do bagaço de cana de açúcar surgiu como uma opção para reduzir o problema sobre o gerenciamento dos resíduos sólidos e diminuir a retirada de material de jazidas naturais, pois a cinza do bagaço pode ser usada para substituir parcialmente o cimento Portland.

Além disso, os autores ainda afirmam que a cinza do bagaço de cana de açúcar como adição mineral de subprodutos apresenta relevância econômica e ambiental. Os prejuízos causados à natureza durante a produção de cimento são minimizados. Porém, é preciso também levar em consideração fatores como a durabilidade, resistência à compressão do concreto, retração, fluência, e outros.

Lopes *et al.* (2014) explicam que o uso de cinza de bagaço de cana de açúcar como adição mineral de subprodutos resultará na minimização da emissão de CO₂ ao se produzir cimento. Também, dará uma destinação final adequada ao resíduo gerado com a produção de álcool e açúcar.

3.2.4.6 Cinza da casca da castanha de caju

No contexto de resíduos agroindustriais, de acordo com Lima e Rossignolo (2009), a cinza da casca da castanha de caju utilizada como adição mineral de subprodutos, é capaz de auxiliar no processo de geração de energia. De um modo geral, a cinza obtida é resultado da queima das cascas de caju que gera o resíduo e este é colhido no fundo da grelha das caldeiras.

Várias das cinzas de resíduos agroindustriais têm reatividade pozolânica e, por isso, podem ser usados como adição mineral de subprodutos de cimento, como observado, os subprodutos de origem vegetal, subprodutos agroindustriais e resíduos ou cinzas processadas tem sido estudados para serem usados como estabilizantes de solos, combustíveis e fertilizantes.

Além do exposto, os autores ainda salientam que as cinzas, como subprodutos que são, surgem decorrente da queima de outros resíduos e a importância reside no fato da reinserção destas no processo. No Brasil, o setor da construção civil é um dos que utilizam resíduos agroindustriais como adição mineral no cimento Portland, pois são materiais com características químicas e físicas próprias para serem usados em argamassas e também, concretos. Por esse motivo, a cinza da casca da castanha do caju tem sido utilizada como adição mineral em matrizes cimentícias.

3.2.4.7 Cinzas de carvão mineral

Ulhôa (2005) explica que o carvão mineral é uma massa compacta, estratificada, proveniente da degradação de resíduos vegetais, ou seja, florestas que foram soterradas a milhões de anos atrás e que sofreram um processo de decomposição em consequência de ações geológicas que resultaram em alterações nas suas propriedades físicas e químicas. Além disso, a incineração que gera cinzas de carvão mineral tem sido uma das alternativas para gerar subprodutos, principalmente, relacionados ao cimento.

Sobre o exposto por Ulhôa (2005), Siqueira, Souza e Souza (2012) afirmam ser a geração de subprodutos, consequência de todo processo industrial. Assim, o aproveitamento de resíduos industriais tem sido proposto para a aplicação no segmento da construção civil, apresentando uma alternativa viável em relação técnica e econômica, de modo a reduzir ou eliminar os resíduos.

Conforme os autores supracitados, em relação às cinzas de carvão mineral, sua reutilização para compor a fórmula de concreto e argamassa tem sido considerada uma interessante opção, pois é um material que apresenta atividade pozolânica.

Sobre isso, Siqueira, Souza e Souza (2012) enfatizam serem as pozolanas, materiais silicosos ou silicoaluminosos com pouca ou nenhuma atividade aglomerante. Porém, ao serem divididas finamente na presença da água, elas reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, constituindo, desta forma, compostos com propriedades aglomerantes.

Normalmente, as pozolanas têm baixo custo se comparadas com o cimento Portland, além de terem como características a baixa taxa de geração de calor e hidratação lenta. Para Siqueira, Souza e Souza (2012), estes são fatores relevantes em se tratando de construção em massa, sendo este um dos motivos que fazem com que o cimento Portland seja parcialmente substituído por pozolana.

3.2.4.8 Cinza da casca de coco verde

A cinza da casca de coco verde tem sido utilizada como adição mineral de subprodutos da incineração, como parte da composição de argamassa e cimento. De acordo com Matos e Guimarães (2017), tem sido cada vez maior a quantidade

de casca de coco verde produzida em todo o Brasil, seja como resíduo urbano quanto agroindustrial. É um resíduo que representa parte significativa do peso bruto do coco verde, chegando a 90%, considerando que o peso médio depois de retirada da água é de em média de 1,5kg.

Devido à grande quantidade de cascas de coco verde geradas durante todo o ano, os autores afirmam ser o seu reaproveitamento uma necessidade de ordem ambiental e econômica.

Este aproveitamento tem sido uma tendência em todo o mundo, aplicada como matéria prima em vários setores de produção, como, por exemplo, na construção civil, mas, inclusive como biomassa na geração de energia. Pelo fato de o coco residual possuir poder calorífico superior a 5.447,38 kcal/kg, isto permite que seja queimado diretamente em fornalhas ou, conforme Matos e Guimarães (2017), usado para produzir carvão vegetal.

O potencial calorífico que as cascas do coco verde possuem, permite que sejam usadas como fonte de energia alternativa, e sejam transformadas em um subproduto que pode ser colocado na cadeia produtiva para fabricação de novos produtos. Uma alternativa é o uso das cinzas da casca de coco verde na construção civil, por ser o setor da economia que mais consome recursos ambientais.

Além disso, é o que apresenta alto potencial para a absorção de resíduos de outros setores. Somado a esses fatores, é um setor da economia que vive um grande desafio, ou seja, proporcionar um desenvolvimento tecnológico mais sustentável, especialmente devido aos danos ambientais associados à produção do cimento Portland.

Segundo Matos e Guimarães (2017), na construção civil, por exemplo, as cinzas das cascas de coco verde têm sido usadas como adição mineral para substituir o cimento parcialmente. As cinzas de coco verde são constituídas de propriedades capazes de atender às exigências para seu uso como adição mineral em cimentos compostos. Sua eficiência está associada a diversos aspectos, tais como o tipo de biomassa adotada e as condições de queima.

Os autores salientam que em relação à ação pozolânica, é preciso que a cinza contenha teores de ferro, sílica e alumina acima de 70%. Assim, a ação pozolânica das cinzas é capaz de influenciar diretamente pela finura, fundamental na composição granulométrica.

3.2.4.9 Cinza da incineração de resíduos sólidos urbanos (RSU)

Muitas atividades econômicas, de um modo geral, geram resíduos sólidos, principalmente a indústria da construção civil. Devido a isso, empresas e governos têm buscado alternativas para um gerenciamento responsável desses resíduos. Coutinho e Vieira (2016) explicam que, além da reciclagem, tem-se realizado também a incineração dos rejeitos por ser uma técnica que diminui de forma significativa o volume de resíduo sólido. Além disso, a incineração dos resíduos sólidos urbanos, também resulta na geração de energia como resultado do poder calorífico obtido durante o processo de combustão.

Os autores acima citados ainda destacam que a incineração de RSU gerar cinza de fundo e cinza volante, demandando a estas, uma forma de disposição responsável. Em alguns casos, nota-se que a cinza de incineração de RSU tem sido usada como aditivo de subprodutos como parte da composição de argamassa e cimento. Sobre o processo de incineração:

A incineração é um processo de oxidação em temperaturas altas, com a queima dos gases entre 1000 e 1450 °C, necessitando ocorrer em instalações bem projetadas e corretamente operadas, onde há a transformação de materiais e a destruição dos microrganismos presentes nos resíduos sólidos, buscando, essencialmente, reduzir seu volume e sua massa (COUTINHO e VIEIRA, 2016, p. 249).

Fontes (2008) explica que as cinzas são produzidas em vários pontos de queima do RSU ao longo do processo de incineração. Muitos estudos têm sido realizados com o intuito de verificar e comprovar ser viável utilizar a cinza de incineração de resíduos sólidos como substituto de areia nas camadas de base de cimento. É recomendado que a cinza de incineração de RSU com finalidade cimentícia seja submetida a uma prévia lavagem, utilizando, para tanto, solução de ácido nítrico e, em seguida, filtração. Assim, poderá se obter uma significativa diminuição na concentração de metais presentes nas cinzas. A partir da lavagem é possível se obter um produto seguido por cimentação que pode ser usado em materiais de construção na indústria da construção civil. Importante ressaltar que a lavagem irá gerar efluentes contaminados que também deverão ser coletados e ter tratamento adequado.

Ainda conforme Fontes (2008), a cinza de RSU pode ser usada para a estabilização de solos, pois serve como substituto de cimento, visto que apresenta características pozolânicas. A densidade que a cinza de RSU apresenta é inferior aos demais materiais de aterro que são normalmente usados em construção de aterros.

Na Tabela 1 é possível observar a categoria e a aplicação das cinzas de incineração de RSU.

Tabela 1 – Aplicação das cinzas de RSU

CATEGORIA	APLICAÇÃO
Materiais de Construção	Produção de Cimento
	Concreto
	Cerâmica
	Vidro e Cerâmica de Vidro
Geotécnica	Pavimento
	Aterro
Outros	Condicionamento de lodo

Fonte: Fontes, 2008.

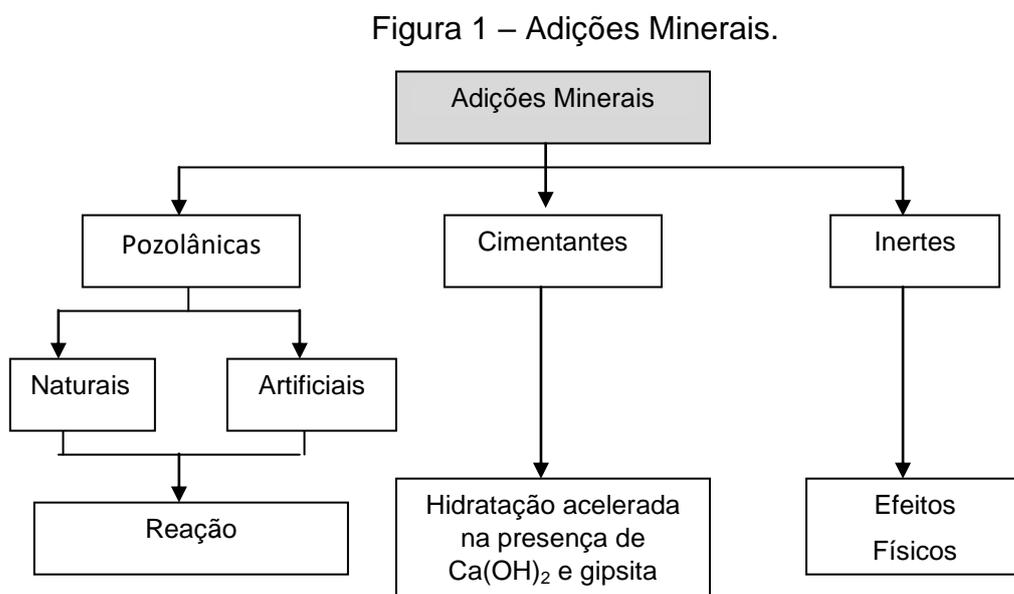
Para Coutinho e Vieira (2016), o uso das cinzas de RSU em cimentos de alto desempenho e argamassas pode oferecer maior e melhor desempenho físico-mecânico, bem como alta durabilidade do material.

Além disso, é importante enfatizar sobre o aspecto do ponto de vista ambiental, pois ao ser incinerado, o RSU gera um material com comportamento satisfatório em relação à imobilização de metais pesados dentro da matriz cimentícia.

Somado a este fator, os autores afirmam que produzir uma mistura binária por meio da ligação de um material com alta atividade pozolânica com material de baixa reatividade, resulta em produto aceitável. Considerando o alto índice de atividade pozolânica da cinza de RSU, esta é obtida devido ao teor de amorfos e à granulometria, contribuindo, assim, na melhoria do desempenho dos concretos de alto desempenho.

3.2.5 Classificação, composição e características das principais adições minerais para concreto.

As principais adições minerais para concreto são pozolânicas, cimentantes e inertes que, segundo Rodrigues e Fucale (2014), são produtos normalmente acrescentados ao concreto em quantidades aproximadas de teor > 5%. Eles podem ser explicados de acordo com a Figura 1:



Fonte: Rodrigues e Fucale (2014).

Rodrigues e Fucale (2014) explicam que, com a finalidade de melhorar determinadas características do cimento, tais como a trabalhabilidade, resistência e durabilidade, é preciso fazer uso de outros tipos de materiais em sua composição. Dentre estes materiais, tem-se, por exemplo, a pozolana, muito usada para fabricar cimento.

Segundo Rabelo e Garcia (2013), o material pozolânico pode ser natural ou artificial. É caracterizada como pozolana natural quando de origem vulcânica ou sedimentar com atividade pozolânica, sendo elas materiais normalmente de caráter petrográfico ácido (65% de SiO_2). No concreto, tem sido comum o uso de pozolanas de origem natural como parte da composição desse elemento, em obras de engenharia e produtos manufaturados de concreto.

Os autores acima ainda explicam que se podem classificar os materiais pozolânicos naturais de acordo com a origem, como, por exemplo, arenitos, rochas vulcânicas ácidas, argilitos de argilas mal cristalizadas, tufos vulcânicos, folhetos opalinos e terras diatomáceas.

Complementando a explicação de Rabelo e Garcia (2013), os autores Rodrigues e Fucale (2014) salientam que, conforme for à origem das pozolanas naturais, possivelmente poderão apresentar algum tipo de variação em suas propriedades de acordo com que os componentes ativos das rochas variam, com as características físicas e mineralógicas. Além disso, outros fatores capazes de influenciar na reação pozolânica são a finura, a densidade, a forma, a distribuição do tamanho das partículas e a sua composição mineralógica, sendo estes fundamentais para desenvolver a resistência do concreto.

Sobre a pozolana artificial, Rabelo e Garcia (2013) afirmam ser um material que se origina a partir do subproduto industrial com atividade pozolânica ou tratamento térmico, sendo ele dividido em três classes: Classe N, C e E. Sobre a Classe N, os autores explicam serem as pozolanas naturais e artificiais, porém, a partir de determinados materiais vulcânicos que tenham características como argilas calcinadas, silicosa, ácida, terras diatomáceas. Pozolana da Classe C é formada pelas cinzas da queima de carvão mineral derivada de termelétricas. A Classe E, por sua vez, constituem as pozolanas com características que as outras classes não têm.

O resultado da adição de pozolanas no concreto é maior resistência, durabilidade, coesão e plasticidade.

A respeito das cimentantes, Mantuano Netto (2006) explicam serem materiais que se formam quando entram em contato com a água, tais como, por exemplo, o C-S-H de menor densidade. Outro exemplo é a utilização da cinza de arroz por possuir características pozolânicas que se forem finamente moídas e com presença de água, têm reação com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) formando, desta forma, compostos cimentantes.

De acordo com Matos e Guimarães (2017), de um modo geral, deve-se entender que as adições minerais são materiais com propriedades cimentantes e, assim sendo, ao serem adicionados ao concreto, respeitando as devidas quantidades variáveis necessárias à massa de cimento, são aplicadas para substituir

parte do cimento ou como adição em teores variáveis ao volume ou massa do cimento.

Ainda conforme os autores acima citados, as cimentantes têm uma hidratação lenta e, além disso, a quantidade de C-S-H que é produzida não basta para que essas adições sejam utilizadas com fim estrutural. Por isso, elas não precisam de hidróxido de cálcio para constituir produtos cimentantes C-S-H, contudo, se aplicada como adição ou para substituir parcialmente o cimento Portland, os produtos da hidratação do cimento como, por exemplo, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e gipsita podem acelerar a sua hidratação e, com isso, potencializar a formação de C-S-H.

Para Matos e Guimarães (2017), os inertes são de um modo geral, uniformes e finos com ação puramente física, sem qualquer atividade química em relação à produção de C-S-H. Os inertes possibilitam o efeito do empacotamento granulométrico, além de serem adições que funcionam como um tipo de ponto de nucleação com o objetivo de hidratação dos grãos de cimento. Se presentes em pouca quantidade (inferior a 15% da massa do cimento) são capazes de promover melhorias às propriedades da massa, dentre elas, a trabalhabilidade, porosidade, massa específica e exsudação do cimento Portland. Os inertes mais comuns são o cascalho e a areia geralmente fornecido a partir da extração de sedimentos aluviais.

3.2.6 Propriedades e tipos de cimento comercializados no Brasil

Para explicar os tipos de cimentos comercializados no Brasil e suas propriedades é preciso fazer uma abordagem teórica sobre o processo de produção do cimento para compreender melhor cada um deles.

De acordo com Santos (2015), a produção de cimento envolve diversos processos diferentes e interdependentes em linha de fabricação, passando por processos de preparação, estocagem de matérias-primas, limpeza de gases de exaustão, moagem de cimento, dentre outros. Tais processos são a pré-homogeneização de matérias-primas, moagem de matérias-primas, pré-aquecimento, clinquerização e resfriamento.

O autor ainda explica que inicialmente, é realizada a pré-homogeneização de matérias-primas, pois, normalmente, a argila e as jazidas de calcário possuem diversidades em sua constituição ao longo de suas extensões. Porém, a qualidade

do produto final, bem como a estabilidade do processo de produção exigem materiais quimicamente homogêneos.

Romano e Cincotto (2018) salientam que na produção do cimento são utilizados sistemas de recarregamento e empilhamento com extensas pilhas de material para que sejam criadas camadas horizontais vindos de diferentes lotes, que, posteriormente, são misturadas no próprio processo de recarregamento.

Quanto ao processo de moagem de matérias-primas, Paliga, Real e Campos Filho (2013) salientam que os materiais advindos das pilhas de pré-homogeneização são posteriormente colocados em um ou mais moinhos, de acordo com cada empresa, para que seja feita a mistura e atinja granulometria e umidade corretas aos processos que serão realizados depois.

Também chamado de “moagem de cru”, Paliga, Real e Campos Filho (2013) afirmam que esse processo acima explicado compõe a fabricação do cimento utilizando gases quentes residuais do forno de clínquerização, usados como fonte de calor para a secagem do material. O produto resultante desta moagem é normalmente conhecido como “farinha” pelo fato de parecer com a farinha de trigo, mas como um tom bege.

Romano e Cincotto (2018) observam que essa farinha acima citada por Paliga, Real e Campos Filho (2013) é armazenada em silos que, por sua vez, fazem a homogeneização e absorvem as assincronias que possam surjam entre o forno e os moinhos de cru. O que leva à redução de tamanho das partículas são, exatamente, a homogeneização durante o processo e a elvação da superfície exposta que aumenta as reações químicas e trocas de calor entre as partículas e os gases dentro do forno.

Acerca da fase de pré-aquecimento, Romano e Cincotto (2018) sinalizam que, quase todos os fornos de cimento que operam na produção de cimento, normalmente possuem torres de pré-aquecimento que são responsáveis por retirar a umidade residual do material anterior para começar a descarbonatação do calcário.

Ainda para os autores acima citados, comumente encontra-se os pré-aquecedores com torres de ciclones, com altura que ultrapassam a 100 metros, vários separadores ciclônicos interligados entre si por meio de dutos de imersão usados para realizar a troca térmica que acontece em média de 80% entre a farinha alimentada e gases quentes saídos do forno.

Por meio da sequência de ciclones, saem os gases quentes do forno em contra-corrente com a matéria prima. Com a mistura deste com o fluxo de gases, acontece a mudança de calor e transferência de massa. Segundo Mehta e Monteiro (2014), nos trechos iniciais do processo, acaba-se a umidade superficial, enquanto a temperatura mantém próxima à temperatura de ebulição da água. A partir deste ponto, o material sólido que agora somente possui umidade integranular começa a ser aquecido de forma gradual. Ao término do processo, o material chega de 700 °C a 1000 °C, o bastante para que a água esteja acabada e para começar as decomposições químicas da matéria-prima.

A fase do processo de fabricação do cimento, conhecido como clinquerização, surge das reações de descarbonatação, constituição de silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio que acontecem dentro do forno de cimento, como explicam Romano e Cincotto (2018).

Na maioria das vezes, os fornos de cimento são cilindros horizontais de até 160 metros de comprimento e rotativos, tendo um pequeno ângulo de inclinação que, combinado ao vagaroso movimento de rotação permite que o material perfaça o cilindro na medida em que vai deslizando pelas paredes.

De acordo com Romano e Cincotto (2018), dentro do forno existem um revestimento de material refratário para fazer a proteção da carcaça contra as elevadas temperaturas e manterem o calor interno. A matéria prima que ali possui, continua no forno por um tempo de aproximadamente quatro horas e chega a temperaturas clinquerização de até 1.230 °C, sendo esta, o bastante para que ela fique incandescente e pastosa.

Segundo Souza e Tamaki (2001), a fase do resfriamento é composto por dois tipos de resfriadores que são considerados como os principais mais usados. Os fornos que são mais antigos e que ainda operam na produção de cimento usam resfriadores satélites, cilindros pequenos de acordo com o movimento de rotação do forno, ligados à carcaça. Os fornos mais novos, fabricados na década de 1980, normalmente possuem resfriadores de grelha, com ventilação forçada, permitindo alta taxa de transferência de calor entre o clínquer e o ar entrante. Assim, é reduzida a temperatura de saída do material, resgatando parcela da energia relacionada ao mesmo, elevando a eficiência do sistema.

Os resfriadores apresentam grande importância na qualidade do produto, pois, de acordo com Souza e Tamaki (2001), o tempo e o perfil de resfriamento são

fundamentais para determinar as propriedades químicas finais do produto. Os autores salientam que os resfriadores mais modernos propiciam uma excelente troca térmica e a recuperação de gases quentes que são reaproveitados no processo de fabricação do cimento.

Romano e Cincotto (2018) afirmam existir dois métodos que ainda são adotados para se fabricar o cimento, que são o processo seco e o processo úmido. O processo úmido tem sido pouco usado pelas fábricas, mas, seja qual for o método, os materiais são retirados das minas e britados de modo mais ou menos semelhantes, tendo, apenas como diferença, o processo de moagem, mistura e queima.

De acordo com Sales, Alfere Filho (2014), no processo úmido, a mistura é moída juntamente com 40% de água e é colocada no forno rotativo sob a forma de uma pasta de lama. Já no processo seco, essa mesma mistura é moída totalmente seca, sem a mistura de água, alimentando o forno em forma de pó.

De acordo com Santos (2015), existem vários tipos de cimento comercializados no Brasil e todos eles podem ser usados em qualquer obra, tendo diferenças somente na composição e em suas propriedades, o que os tornam mais viáveis para determinado uso. Para o autor, as diversidades aparecem com mudanças na proporção dos ingredientes e a soma de adições minerais e materiais ao processo de moagem.

De modo geral, Santos (2015), explica que os cimentos mais adotados nas obras comuns são o CP I, CP II, o CP III e o CP IV. Contudo, todos possuem diferentes classes (25, 32 e 40), que estão ligadas à resistência à compressão.

Para o presente estudo é importante conhecer o cimento CP II E – 32, que, segundo Santos (2015), apresenta as seguintes características:

É um cimento que pode usado em todas e quaisquer fases da construção e está disponível em três diferentes adições: CP II – Z, com material pozolânico; CP II – E com escória de alto forno; e CP II – F com material carbonático.

Conforme o autor, o CP II-E é constituído de 90% à 94% de clínquer+gesso e ainda adicionado de 6% a 10% de material carbonático em massa. É um cimento indicado para ser usado em estruturas em concreto armado e revestimento. A norma brasileira para todos os tipos de cimento é a NBR 16.687/2018.

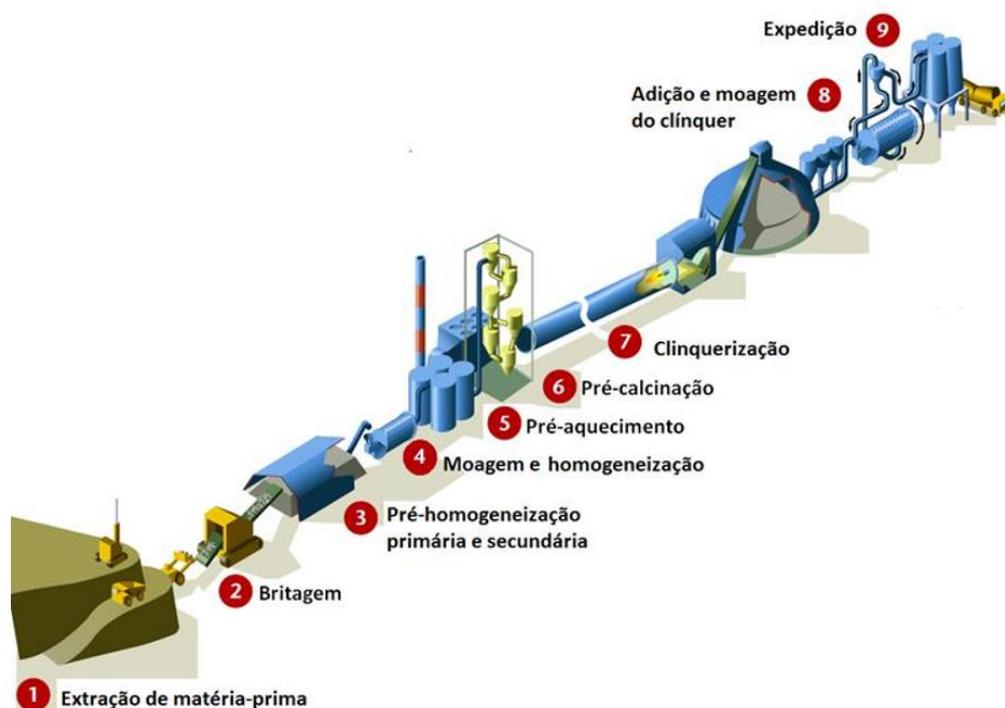
Franco Jr. *et al* (2001) afirmam que com a finalidade de manter um controle de qualidade e impedir que o cimento polua o meio ambiente com metais tóxicos o

que constituem, este produto deve ser analisado rotineiramente pelas empresas fabricantes. Seu processo de preparo também depende do controle das quantidades das matérias-primas que compõem o cimento para que, quando em um contato entre elas, seja possível que as trocas químicas aconteçam na temperatura adequada para a calcinação no forno.

De acordo com os autores, durante o processo de fabricação do cimento acontecem várias reações as quais são responsáveis pelas suas peculiaridades finais. Tais mudanças dão origem a diferentes compostos.

A produção do cimento, portanto, compreende várias fases que vão desde a extração até o ensacamento do produto. Belato (2013) ilustra todo o processo na Figura 2:

FIGURA 2 – Processo de fabricação do cimento.



Fonte: Belato, 2013.

Após estudar as propriedades do tipo de cimento utilizado no estudo, faz-se necessária uma abordagem sobre a microestrutura do concreto.

3.2.6.1 Microestrutura do concreto

Ao explicarem sobre a microestrutura do concreto, Mehta e Monteiro (2014) salientam, inicialmente, que ele é constituído por uma estrutura de grande complexidade e heterogênea, o qual permite que seja estudado como sendo um tipo de material formado por partículas de agregado. Estas partículas, por sua vez, são envolvidas por uma matriz porosa de pasta de cimento e, nelas, há uma zona de transição entre as fases que apresentam características próprias.

Conforme estes autores, a ligação dessas fases possui grande relevância às propriedades do concreto, mas, ao sendo observadas com o auxílio de microscópico, notam-se particularidades em sua estrutura. De um modo geral, as pastas de cimento que envolve as partículas de agregado do concreto e a zona de transição estão passíveis de sofrerem modificações ao longo do tempo, devido a umidade e por mudança de temperatura ambiente, levando a alterações na microestrutura do concreto.

Ollivier e Vichot (2014) sinalizam ser importante estudar sobre a microestrutura da zona de transição do concreto pela necessidade de se identificar o desempenho que apresenta quanto à aderência na extrusão do concreto sob tensão e o grau de influência na resistência, pois as características: resistência e durabilidade do concreto são essencialmente importantes.

3.2.6.2 Hidratação do cimento

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), o cimento Portland simples tem em sua composição quatro elementos considerados como sendo principais, sendo eles C3S (silicato tricálcico), C2S (silicato bicalcico), C3A (aluminato de cálcio) e C4AF (ferroaluminato cálcico). Desta forma, eles conseguem obter propriedades aglomerantes por meio da adição da água e, ao começar o processo de hidratação, várias reações químicas ao mesmo tempo ocorrem entre a água com os compostos anidros do cimento.

Além do exposto acima, o cimento, como explicado pelos autores, é um material formado ou não por adição, sulfato de cálcio e fases do clínquer que, sendo misturada água aos compostos anidros, desenvolve sua estrutura cristalina íons OH- resultando em reações de hidratação.

Segundo Romano e Cincotto (2018), no caso do cimento Portland, a hidratação é considerado um sistema complexo devido ao fato de cada fase apresentar uma reação diferente e característica com a água. Assim sendo, o teor relativo existente possui efeito sobre a evolução da hidratação de um modo geral.

Cincotto (2011) afirma haver duas maneiras de reação observadas entre a água e os constituintes do cimento, sendo elas: 1) incorporação direta de determinadas moléculas de água, realizado a hidratação de fato; 2) a hidrólise, em que se observa haver a dissolução e a quebra de alguns elementos do cimento, o qual se pode citar como exemplo, o gesso.

Além do exposto, o autor ainda associa o enrijecimento durante o tempo do concreto em que ele é inicialmente fluído, com as reações apresentadas pela hidratação do cimento e a reatividade das suas fases conforme as condições de pressão da cura, temperatura e efeito da formação dos produtos hidratados.

Levando-se em consideração os principais constituintes minerais do clínquer (cimento na fase básica do fabrico) Portland, Cincotto (2011) aponta serem os aluminatos os que mais rapidamente se hidratam em relação aos silicatos. Somado a isso, o enrijecimento e a pega do cimento são consequências das reações de hidratação dos aluminatos, considerando que os silicatos representam aproximadamente 75% do clínquer e possui como característica mais relevante do endurecimento, a resistência mecânica à compressão,

De um modo geral, Cincotto (2011) explica ser a reação de hidratação do cimento uma dinâmica em que ele se altera com o objetivo de alcançar a forma mais estável possível, logo depois de completar a composição dos produtos hidratados.

A partir do exposto até aqui, se pode compreender que a hidratação do cimento constitui um conjunto de processos físico-químicos que atendem todas as leis da cinética e termodinâmica.

Por fim, como explicam Mehta e Monteiro (2014), considera-se finalizada a hidratação do cimento ao se observar algumas situações, como o fato de não existir mais fase anidra de cimento; caso não haja mais água disponível; e se água não tiver mais condições de chegar às fases não hidratadas.

Depois de verificado sobre a hidratação do cimento, é importante discorrer a respeito do comportamento reológico das pastas de cimento.

3.2.6.3 Comportamento reológico das pastas de cimento

A respeito do comportamento reológico das pastas de cimento, Silva, Andrade e Gonçalves (2018) explicam, inicialmente, que a pasta de cimento é a mistura do cimento com a água e esta mistura tem sido constantemente analisada e estudada na busca pela sua melhoria. Isto porque, dentre as estratégias mais importantes ao desenvolvimento sustentável no setor da construção civil tem sido a busca por métodos que visam aumentar a durabilidade dos materiais. Geralmente, em materiais a base cimento Portland comum é possível obter maior durabilidade dos materiais por meio da substituição parcial de adições minerais ao clínquer Portland. Ao adicionar as adições minerais ao clínquer, ocorrem alterações às características microestruturais, bem como nas propriedades dos materiais em seu estado fresco e endurecido.

Contudo, os autores sinalizam que em um material cimentício, o desempenho irá depender de como as adições irão se comportar com o cimento, o que torna importante a escolha criteriosa dos materiais e da quantidade dos constituintes para sua constituição.

Em relação às pastas de cimento, Romano (2016) salienta serem suspensões coloidais que fazem com as interações entre partículas resultam na formação de muitas microestruturas. Conforme forem estas estruturas, elas irão responder à taxa de deformação ou tensão de cisalhamento, permitindo observar tipos diversificados de comportamento macroscópico do fluxo.

Mais especificamente sobre o controle do comportamento reológico do cimento, Senff, Hotza e Repette (2010) enfatizam ser fator relevante tanto na produção quanto na qualidade dos concretos, uma vez que, quando no estado fresco é um material fluido, seu comportamento reológico irá ser um importante influenciador do seu processamento. Os autores salientam que os reômetros têm sido muito usados para caracterizar materiais cimentícios com o benefício de se fazer medições da tensão de escoamento e da viscosidade no mesmo tempo para diversas faixas de taxas de deformação.

Ainda segundo Senff, Hotza e Repette (2010), o comportamento reológico de pastas é comumente adotado na indústria da construção civil e pode ser de diferentes modelos empíricos, utilizados para determinar qual o comportamento

reológico de pastas de cimento, considerando as curvas de fluxo. Dentre os modelos que se pode dizer ser o mais usado é o de *Bingham* que adota a seguinte fórmula:

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$$

Onde:

τ : = Tensão de cisalhamento (Pa)

τ_0 = Tensão de escoamento (Pa)

μ = viscosidade plástica (Pa.s)

$\dot{\gamma}$ = Taxa de cisalhamento (s^{-1})

Senff, Hotza e Repette (2010) continuam explicando que o comportamento reológico das pastas de cimento, quando no estado fresco, irá depender de diversos fatores específicos, como, por exemplo, físicos, químicos e mineralógicos, condições de mistura e de medição e de acordo com a presença de aditivos.

A finalidade de se verificar o comportamento reológico das pastas de cimento, segundo Castro, Liborio e Pandolfelli (2011), é para projetar, executar e fazer a avaliação do processo de cimentação, pois, ao se caracterizar as propriedades reológicas das pastas de cimento, é possível saber avaliar a trabalhabilidade das pastas; analisar a capacidade das pastas para se transportar partículas maiores; melhorar a eficiência da pasta ao se deslocar o fluido e determinar a pressão a ser exercida sobre a construção.

De acordo com os autores acima, o cimento quando no seu estado fluido, o comportamento reológico das pastas se mostra de alta complexidade e acaba sofrendo a influência de uma diversidade de fatores como composição química das misturas, condições de mistura, composição química do cimento, razão água/cimento, tamanho e forma dos grãos.

Para tensões baixas, como afirmam Castro, Liborio e Pandolfelli (2011), a pasta de cimento se mostra muito viscosa, como uma espécie de sólido elástico. Assim sendo, a viscosidade irá cair em várias ordens de grandeza ao colocar a uma faixa de tensões muito estreita, resultando na ocorrência do fluxo macroscópico.

As pastas de cimento, segundo os autores, constituem uma estrutura conhecida como gel sempre que seu estado fluido estiver em repouso. A força deste

gel é a medida de todas as forças de atração presentes entre as partículas de um fluido em condições estáticas. Já a tensão de escoamento significa a medida das forças de atração presentes entre as partículas em um fluido que se encontra em condições de fluxo.

3.3 Coprocessamento

3.3.1 Coprocessamento de resíduos em fornos de cimento

Segundo a ABCP (2018), o coprocessamento já é utilizado há algum tempo no Brasil, mais precisamente desde o início da década de 90. Essa atividade procura utilizar resíduos sólidos urbanos em fornos de clínquer como matéria prima na fabricação do cimento e também como combustível do processo.

Nesse sentido, o RSU é utilizado na fabricação e não na mistura/consumo como é a proposta do presente estudo. Entretanto, é importante conhecer um pouco sobre esta tecnologia que trás enormes ganhos ambientais e pode ser utilizada como alternativa para reutilização e reaproveitamento do RSU.

O coprocessamento de resíduos em fornos de cimento, segundo Giusti (2016), é uma tecnologia aplicada para a destruição dos resíduos que podem ser usados para a substituição de parte da matéria-prima e dos combustíveis fósseis não renováveis, de modo a não modificar a qualidade do cimento.

É uma atividade voltada para a queima de resíduos em fornos de cimento, sem que esta cause a geração de novos resíduos, o que resulta na contribuição para preservar os recursos naturais a partir da substituição de combustíveis tradicionais e matérias primas para fabricar cimento. Além disso, no caso da indústria cimenteira, significa uma grande estratégia para otimizar o seu desempenho econômico.

A explicação dada pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), por meio da Resolução nº. 264 de 1999 é que a atividade conhecida como coprocessamento de resíduos em fornos de cimento é *“uma técnica de utilização de resíduos sólidos industriais a partir do processamento desses, em substituição parcial da matéria-prima e/ou de combustível no sistema de fornos de produção de clínquer”*.

Completando as explicações acima já dadas, Cardoso (2015) afirma que o coprocessamento auxilia de forma significativa a preservação do meio ambiente pelo fato de permitir a substituição de combustíveis tradicionais e matérias-primas na fabricação do cimento, contribuindo para que seja dada uma correta destinação aos resíduos perigosos.

Na Figura 3 proposta por Cardoso (2015) é possível observar como se dá o coprocessamento:

Figura 3 – Coprocessamento: fluxo da destruição e redução.



Fonte: Cardoso, 2015.

*EDR – Eficiência de Destruição e Redução.

Segundo a Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais (Minas Gerais, 2010), o coprocessamento de resíduos em fornos de cimento tem sido considerado uma alternativa viável para reduzir ou eliminar os resíduos por meio da recuperação energética. Somado a isso, também se pode citar como benefício dessa técnica, o fato de não produzir cinzas auxiliando na diminuição da disposição de resíduos nos aterros sanitários.

3.3.2 Aspectos econômicos e ambientais do coprocessamento.

A Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais - FEAM (Minas Gerais, 2010) explica que o coprocessamento é feito simultaneamente à produção do clínquer, considerando que há resíduos que produzem energia térmica enquanto outros são para substituir a matéria-prima sendo uma técnica ambientalmente e economicamente viável, pois, acaba adequadamente com grande quantidade de resíduos diretamente nos fornos de clínquer, de maneira econômica, eficaz e ambientalmente correta.

Segundo a FEAM (Minas Gerais, 2010), não se podem apontar vantagens apenas para a indústria cimenteira, pois os investimentos gastos pelos estados e municípios para a destinação dos resíduos sólidos urbanos podem ser menores, uma vez que não serão necessários aterros de grande estrutura.

Ademais, por meio do coprocessamento são destruídos os resíduos, economizando combustível e matéria prima, resultando, conseqüentemente, em uma ação sustentável.

Ainda de acordo com a Fundação Estadual do Meio Ambiente (Minas Gerais, 2010), o que para muitas empresas é considerado resíduo, na indústria cimenteira é uma importante fonte de energia.

Sendo assim, pode-se afirmar ser o coprocessamento um método que unifica vantagens tanto de cunho ambiental quanto econômicas. A empresa obtém lucro pelo fato de passar a economizar com a compra do principal combustível, além de muitas empresas que geram resíduos também pagarem para que eles sejam coprocessados.

3.3.3 Legislação federal aplicada ao coprocessamento

Para o uso do coprocessamento, inclusive para o uso dos resíduos sólidos urbanos, é preciso atender aos Decretos e Legislações vigentes de modo a prevenir a contaminação do meio ambiente e oferecer segurança à saúde dos seres vivos.

Nesse sentido, em esfera nacional, a oficialização da atividade de coprocessamento se deu por meio da Resolução nº 264, de 26 de agosto de 1999, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Brasil, 2000), permitindo seu uso em todo o Brasil.

As legislações aplicadas ao coprocessamento são em nível Federal e Estadual.

Em nível federal tem-se principalmente a Resolução nº 264/1999, Resolução nº 316/02 e a Lei nº 12.305/2010 (será descrito no Decreto 7.404/2010).

3.3.3.1 Resolução CONAMA nº 264, de 26 de agosto de 1999 – Coprocessamento em Fornos de Clínquer.

A Resolução CONAMA/264 (Brasil, 1999) estabelece os critérios, procedimentos e fatores técnicos específicos em relação ao licenciamento ambiental para a utilização do coprocessamento de resíduos em fornos rotativos de clínquer para fabricar cimento, sendo seu atendimento obrigatório para atividade de coprocessamento de resíduos sólidos urbanos, devendo ainda, serem atendidas as peculiaridades regionais e locais.

Na referida resolução, vemos que no art. 4º, o volume de resíduos deve justificar seu uso como parte da matéria prima:

“Art. 4º: A quantidade de resíduo gerado e/ou estocado deverá ser suficiente para justificar sua utilização como substituto parcial de matéria prima e/ou de combustível, no sistema forno de produção de clínquer, após a realização e aprovação do Teste de Queima” (Brasil, 1999).

Quanto à preservação da qualidade ambiental, o art. 5º estabelece a este respeito:

“Art. 5º: O coprocessamento de resíduos em fornos de produção de clínquer deverá ser feito de modo a garantir a manutenção da qualidade ambiental, evitar danos e riscos à saúde e atender aos padrões de emissão fixados nesta Resolução” (Brasil, 1999).

De acordo com BRASIL (1999), também deve ser fixado o limite de CO para o intertravamento da alimentação de resíduo, e este precisará ser feito por meio da realização de Testes de Queima tendo como base as médias horárias, corrigidas constantemente a 7% de O₂ (gás base seca), como ilustrado na Tabela 2 proposta pela Resolução CONAMA nº 264/1999.

Tabela 2 – Limites Máximos de Emissão.

POLUENTE	LIMITES MÁXIMOS DE EMISSÃO
HCL	1,8 kg/h ou 99% de redução
HF	5mg/Nm ³ corrigido a 7% de O ₂ (base seca)
CO*	100 ppmv corrigido a 7% de O ₂ (base seca)
MP	70 mg/Nm ³ farinha seca corrigido a 11% de O ₂ (base seca)
THC (expresso como propano)	20 ppmv corrigido a 7% de O ₂ (base seca)
Mercúrio (Hg)	0,05 mg/Nm ³ corrigido a 7% de O ₂ (base seca)
Chumbo (Pb)	0,35 mg/Nm ³ corrigido a 7% de O ₂ (base seca)
Cádmio (Cd)	0,10 mg/Nm ³ corrigido a 7% de O ₂ (base seca)
Tálio (Tl)	0,10 mg/Nm ³ corrigido a 7% de O ₂ (base seca)
(As+Be+Co+Ni+Se+Te)	1,4 mg/Nm ³ corrigido a 7% de O ₂ (base seca)
(As+Be+Co+Cr+Cu+Mn+Ni+Pb+Sb+Se+Sn+Te+Zn)	7,00 mg/Nm ³ corrigido a 7% de O ₂ (base seca)

Fonte: Brasil, 1999.

Obs.: As concentrações de CO na chaminé não poderão exceder a 100 ppmv em termo de média horária.

3.3.3.2 Resolução CONAMA nº 316, de 29 de Outubro de 2002 – Sistemas de Tratamento Térmico dioxinas e furanos.

A Resolução CONAMA/316 (Brasil, 2002) dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos.

Ainda segundo a referida resolução, os sistemas de tratamento térmico de resíduos devem ser vistos como fontes potenciais de risco ambiental, além de serem emissores poluentes perigosos. Tal fato permite considerar esta uma agressão tanto ao meio ambiente quanto à saúde dos seres vivo caso esses sistemas não sejam adequadamente instalados, operados e passados pela devida manutenção.

Para a Resolução CONAMA 316/02, “considera-se tratamento térmico para os fins desta regulamentação todo e qualquer processo cuja operação seja realizada acima da temperatura mínima de 800° C”.

Ainda no parágrafo 1º da citada resolução, podemos observar o que deve ser excluído dessa regulamentação. Veja: “§ 1º Excetuam-se da disciplina desta Resolução: a) os rejeitos radioativos, os quais deverão seguir a normatização específica da Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN; b) o coprocessamento de resíduos em fornos rotativos de produção de clínquer, o qual deverá seguir a Resolução CONAMA específica nº 264, de 26 de agosto de 1999, salvo a disposição sobre dioxinas e furanos, que deverá obedecer esta Resolução” (BRASIL, 2002).

Já no parágrafo 2º da Resolução CONAMA 316, deverá ser realizado estudo prévio para a instalação de fábricas e indústrias que irão dispersar emissões atmosféricas, como segue: “§ 2º O estudo da dispersão das emissões atmosféricas do sistema de tratamento deverá, necessariamente, alicerçar a decisão quanto à sua localização” (Brasil, 2002).

3.3.3.3 Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010 - Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS);

De acordo com Mallmann (2013), a Lei nº. 12.305/2010 institui o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), criado pela União, por meio da coordenação do Ministério do Meio Ambiente. Este Plano é voltado para uma grande abrangência, incluindo todos os tipos de resíduos sólidos, determinado as diretrizes, instrumentos e princípios referentes aos resíduos sólidos.

A proposta do PNRS é, segundo Mallmann (2013), também o de gerir de forma adequada os resíduos sólidos, de modo que seja realizado um ciclo de vida direcionado à logística reversa, visando coordenar, de modo mais adequado e sustentável, a relação existente entre produção e consumo.

A Lei determina ainda, a responsabilidade compartilhada quanto à destinação dos resíduos sólidos gerados pelas empresas, conferindo a responsabilidade a cada membro da cadeia produtiva e órgãos governamentais, sobre o manejo e correto controle dos resíduos.

3.3.3.4 Decreto 7.404, de 23 de dezembro de 2010.

O Decreto 7.404, de 23 de dezembro de 2010 “regulamenta a Lei n. 12.305, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências”. O referido Decreto estabelece a responsabilidade dos fabricantes, distribuidores, consumidores, importadores, comerciantes e titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manuseio de resíduos sólidos pelo ciclo de vida dos produtos. (Brasil, 2010).

Além disso, lê-se no art. 5º, parágrafo único, sobre a implantação da responsabilidade compartilhada, de modo encadeado e individualizado. Destaca-se

ainda a obrigatoriedade aos consumidores, conforme art. 15º, acondicionar corretamente e de maneira diferenciada todos os resíduos sólidos produzidos, deixando disponibilizados aqueles que podem ser reutilizados e reciclados, para devolução ou coleta.

Brasil (2010a) sinaliza que no art. 6º, *caput*, a obrigação não desobriga aos consumidores, observar as normas de acondicionamento, segregação e destinação final dos resíduos.

Por outro lado, cabem ao Poder Público, à coletividade e ao setor empresarial fazerem com que se tornem efetivas as ações que garantam a observância da PNRS (2010) e no Decreto 7.404/2010.

3.3.3.5 Legislação Federal aplicada ao coprocessamento de RSU

Cabe ressaltar alguns pontos da Lei 12.305/2010 diretamente relacionados com o coprocessamento de RSU, como o Art. 8º que menciona os instrumentos que serão utilizados pela legislação acima citada, como por exemplo, o incentivo à criação e ao desenvolvimento de cooperativas ou de outras formas de associação de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis; a cooperação técnica e financeira entre os setores público e privado para o desenvolvimento de pesquisas de novos produtos, métodos, processos e tecnologias de gestão, reciclagem, reutilização, tratamento de resíduos e disposição final ambientalmente adequada de rejeitos e a pesquisa científica e tecnológica.

A Lei 12.305 fornece ainda, algumas diretrizes para as atividades de coprocessamento, como por exemplo, a que consta no Art. 9º: “Na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos”.

O inciso primeiro (§ 1o) também propõe o uso de tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental.

A legislação também prevê financiamento estatal para implementação das medidas. Tal previsão pode ser vista no capítulo “Instrumentos Econômicos”, que dentre outras medidas determina que: O poder público poderá instituir medidas

indutoras e linhas de financiamento para atender, prioritariamente, às iniciativas de desenvolvimento de projetos de gestão dos resíduos sólidos de caráter intermunicipal ou, ainda, o desenvolvimento de pesquisas voltadas para tecnologias limpas aplicáveis aos resíduos sólidos.

Outro importante ponto citado pela lei é a prioridade na obtenção de incentivos do Governo Federal dos consórcios públicos com a finalidade de prestação de serviços públicos que envolvam resíduos sólidos.

3.3.4 Legislação Estadual aplicada ao coprocessamento de RSU

3.3.4.1 Minas Gerais – Copam (Conselho Estadual de Política Ambiental) – Deliberação Normativa COPAM nº 154/2010.

No Estado de Minas Gerais, foi criado o Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos da Construção Civil (PGIRCC), determinada pela Lei 18.031, de 12 de janeiro, de 2009 (Minas Gerais, 2009). Este plano tem a finalidade de apoiar a criação de consórcios intermunicipais para diminuir os custos e constituir parcerias estratégicas que visem melhorar a qualidade ambiental do Estado. Além disso, também tem o objetivo de promover a inserção de pessoas que vivem em situação de vulnerabilidade social em programas de coleta seletiva de modo a geração de trabalho e renda (MINAS GERAIS, 2009).

No caso dos Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, a PNRS estabelece que esses devam ser sempre atualizados e/ou revisados por meio da elaboração dos planos plurianuais municipais. Além disso, também deverão indicar e identificar os métodos que resolvam problemas ambientais de áreas contaminadas e os empreendimentos que estão sujeitos à elaboração de planos de gerenciamento de resíduos sólidos.

Conforme se pode verificar, a PNRS (2010) estabelece que todo resíduo seja processado de forma adequada antes de ir para a sua destinação final. Dentre as alternativas propostas, tem-se a reciclagem, compostagem, por exemplo, para o correto processamento dos resíduos. Tudo o que não for aproveitado deverá ser enviado aos aterros sanitários, coprocessado, ou outro.

Ainda no Estado de Minas Gerais, tem-se o Conselho Estadual de Política Ambiental (Copam), com a Lei nº 154/2010. (MINAS GERAIS, 2010). A Deliberação

Normativa Copam nº. 154 de 2010 dispõe sobre o coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer.

Esta Deliberação Normativa foi criada com itens muito sucintos, constituído por 21 artigos, nos quais, são determinados aspectos como definições, sobre licenciamento ambiental, a respeito do conteúdo do Plano de Controle Ambiental (PCA), teste de queima e monitoramento de emissões atmosféricas. Somado a isso, também versa sobre a equivalência de resíduos, padrões de concentração dos resíduos a serem coprocessados, análises do clínquer, resíduo que não pode ser coprocessado, condições de operação dos fornos de clínquer, limites quanto a utilização de resíduos como combustível ou matéria-prima fundente e, ainda, acerca do transporte rodoviário dos resíduos.

No art. 1º da Copam nº. 154/2010 estão estabelecidas as definições de conceitos como, por exemplo, de coprocessamento, fornos de clínquer e outros.

De um modo geral, as empresas consideram dentre as características dos resíduos para o coprocessamento, aqueles de baixos teores de metais pesados e de cloro. Porém, segundo a Copam n. 154/2010, não são todos os resíduos possíveis de serem coprocessados, sendo proibido que resíduos radioativos, domiciliares brutos, explosivos, de serviços de saúde, agrotóxicos e organoclorados passar pelo coprocessamento.

Como se pode notar, o Copam nº. 154/2010 versa, principalmente, assuntos relativos às emissões atmosféricas, considerado este, um dos principais fatores ambientais da atividade. Desta forma, busca-se assegurar com que as características físico-químicas do processo sejam mantidas e se possa atender a todos os padrões de emissões determinados pela legislação.

Sabe-se que a PNRS é de competência do Poder Público, tendo os Planos Estaduais de Resíduos Sólidos que disseminá-lo para todo o território nacional a partir da ideia de unidade federativa. Deve também, assegurar que todos os municípios brasileiros participem ativamente de todos os programas da PNRS, que são os Planos Regionais de Resíduos Sólidos, das aglomerações urbanas, das microrregionais e regiões metropolitanas (MALLMANN, 2013).

Sendo assim, as cidades e municípios que sejam compostos por população menor de 20 mil habitantes poderão estabelecer planos de resíduos sólidos mais simples, contendo diagnóstico e ações da situação dos resíduos sólidos que são gerados no referido território.

Contudo, aqueles municípios que escolherem por buscar soluções consorciadas intermunicipais não precisam desenvolver o plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos. Entretanto, deve haver um plano intermunicipal que atenda o mínimo das diretrizes da Lei nº 12.305/2010, art. 9 (MALLMANN, 2013).

É importante enfatizar que a PNRS não será aplicada de forma individual, mas, sim, em conjunto com as normas e diretrizes do Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária (SUASA), Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA), Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (SINMETRO) e Sistema Nacional de Vigilância Sanitária (SNVS). Outro fator a ser observado se refere ao fato de que a PNRS é aplicada também juntamente com as Leis no 9.974, de 6 de junho, de 2000 (Embalagens de Agrotóxicos), no 11.445, de 5 de janeiro, de 2007 (Lei do Saneamento Básico) e no 9.966, de 28 de abril de 2000 (poluição causada por óleo e outras substâncias nocivas lançadas em águas sob jurisdição nacional) (Brasil, 2010).

Uma definição importante foi introduzida por meio da PNRS (2010), que é a definição de resíduos e rejeitos, assim como a diferença existente entre eles, na qual se reconhece o resíduo sólido não como lixo comum a ser descartado, mas, sim, como um bem de valor social e econômico que pode gerar trabalho e renda, promovendo a cidadania.

Nesse contexto, a PNRS conceitua rejeitos como sendo os: “Resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e tecnicamente viáveis não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada” (Brasil, 2010, artigo 3º, inciso XV).

Assim sendo, nota-se que a PNRS faz pressão sobre a cadeia produtiva, possibilitando que seja realizada a análise do ciclo de vida do produto de modo que a construção de soluções sejam inovadoras e orientadas, para otimizar a eficiência na utilização de materiais. Esta Lei apresenta o valor dos resíduos sólidos para a geração de negócios, engenharia de materiais e simbiose industrial, focando na diminuição desses e na melhoria das ações de responsabilidade socioambiental por parte das empresas (MALLMANN, 2013).

3.4 Normas sobre aditivos e adições

3.4.1 Normas ABNT

Os aditivos e adições em concreto devem seguir os padrões estabelecidos pelas normas nacionais e internacionais. No caso das normas nacionais, tem-se a NBR 11.768/2011, 10.908/2008, 13.069/2012, 13956/2012, 13957/1997, 5753/2016, 16.697/2018 e ABNT NBR 5754/1992.

A NBR 12.317 de 1992 estabelecia a “verificação de desempenho de aditivos para concreto” e determina os procedimentos e critérios para se fazer a verificação de desempenho dos materiais que serão usados como aditivos para concreto.

Contudo, esta norma foi cancelada no dia 10 de agosto de 2012 e substituída pela ABNT NBR 11768/2011.

A NBR 11.768/2011, sob o título “aditivos para concreto de cimento Portland” é uma norma que tem como objetivo, estabelecer as condições legais mínimas quanto aos materiais a serem utilizados como aditivos de concreto de acordo em atendimento a cada tipo de concreto.

Em 2014, a NBR 10.908/2008 foi confirmada. Esta norma trata sobre “aditivos para argamassa e concretos - ensaios de caracterização” com o objetivo de prescrever as técnicas e métodos adequados à determinação da massa específica, do pH, teor de cloretos e sólidos, de modo que se torne possível verificar a uniformidade de aditivos líquidos e sólidos de um lote ou diferentes lotes de determinada procedência. Desta forma, nota-se ser esta norma voltada para a caracterização de aditivos.

Quanto à NBR 13.069/2012, esta versa sobre “concreto projetado - determinação dos tempos de pega em pasta de cimento Portland com ou sem a utilização de aditivo acelerador de pega”. A finalidade desta normalização é determinar a técnica ou método a ser aplicado para que seja determinado o tempo de pega em pasta de cimento Portland, com ou sem a utilização de aditivo acelerador de pega.

A ABNT NBR 13957/1997 tratava da “sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland - Métodos de Ensaio”, especificamente.

Essa norma descrevia as técnicas e os métodos referentes aos ensaios de laboratório exigíveis para especificar a sílica ativa de modo que pudesse ser usado em argamassa, concreto e pasta de cimento Portland. Além disso, também estabelecia o uso de sílica como adição, inclusive, na fabricação do cimento Portland. Esta normalização teve seu cancelamento no dia 6 de agosto de 2012 e substituída pela NBR 13956/2012 cujo objetivo desta é determinar as condições mínimas requeridas para se receber sílica ativa no concreto, argamassa ou pastas de cimento Portland.

A ABNT NBR 5753/2016 é conhecida com o título “Cimento Portland - Ensaio de pozolanicidade para cimento Portland pozolânico”. Tem como finalidade, prescrever a técnica ou método utilizado para determinar a pozolanicidade de cimento Portland pozolânicos.

A ABNT NBR 16.697/2018 define os requisitos para fabricação do cimento Portland, contendo os teores das adições permitidas para cada tipo de cimento.

A ABNT NBR 5754/1992 trata do “cimento Portland - determinação do teor de escória granulada de alto-forno por microscopia”, com o objetivo de apresentar a devida prescrição do método a ser adotado para determinar o teor de escória granulada em cimento Portland por microscopia de luz transmitida, quanto à porcentagem relativa ao cimento. Além disso, pode-se ainda encontrar nesta norma, os documentos complementares, sobre a aparelhagem, como fazer os ensaios, e os possíveis resultados.

3.4.2 Normas ASTM

Seguir as normas é importante e, por isso, no caso de aditivos e adições, também é preciso aplicar normas que estabelecem a forma correta de se fazer. Assim como anteriormente apontado pela ABNT NBR, normalização nacional tem-se ainda que levar em consideração as internacionais, como é o caso da ASTM. De acordo com a ASTM (2017), define-se como norma técnica, todo documento que estabelece e possui as características e peculiaridades de determinado serviço, produto ou mesmo processo, os quais podem incluir a segurança, as dimensões, desempenho ou outros.

Em relação aos aditivos e adições para cimento Portland, tem-se a ASTM C125, que define ser “qualquer material que não seja água, agregados, cimentos

hidráulicos ou fibras usadas como ingrediente do concreto ou argamassa e adicionado à massa imediatamente antes ou durante a mistura”. Os materiais os quais a referida norma ASTM C 125 se refere são aqueles adicionados com diversos objetivos e propósito, tais como para aumentar a plasticidade do concreto sem que haja necessidade de colocar mais quantidade de água, fazer demorar o tempo de pega ou mesmo torná-lo mais rápido, tornar mais rápido as taxas de desenvolvimento da resistência, etc.

Conforme verificado, existem normas a serem seguidas para os casos de aditivos e adições de cimento Portland e, além disso, também há Leis específicas sobre os resíduos sólidos urbanos, pois deles se podem retirar aditivos e adições que podem ser usados no concreto.

4 INCINERAÇÃO E GASEIFICAÇÃO

Para verificar o resultado da gaseificação de resíduos sólidos urbanos e estabelecer as mudanças nas propriedades físicas e mecânicas do cimento com a substituição parcial das frações de areia, é preciso compreender o que é gaseificação e também incineração, como segue neste capítulo.

4.1 Incineração

A incineração, segundo Mannarino, Ferreira e Gandolla (2016), é conhecida como sendo uma das alternativas mais comuns e usuais de se fazer o processamento térmico de resíduos com uma grande variedade de diferentes tipos de materiais. Esse processo se dá quando existe oxigênio em excesso de modo a possibilitar a completa oxidação e redução de até 90% da quantidade de resíduos e em até aproximadamente 75% do peso que o material tinha inicialmente.

Processo também denominado como combustão, a incineração, conforme Mannarino, Ferreira e Gandolla (2016) é, de um modo geral, a queima dos resíduos sólidos em alta temperatura, por meio do uso de fornos desenvolvidos com a finalidade de gerar calor para geração de vapor. Os autores ainda explicam que no processo de incineração a queima se dá, basicamente, por meio de uma câmara receptora direta do resíduo que tem uma temperatura elevada o bastante para ser

possível transformar as substâncias existentes nos resíduos, em gases e as demais, em cinzas.

Conforme Soares, Miyamaru e Martins (2017), a incineração é uma forma de se fazer o aproveitamento do potencial presente nos resíduos, sendo pela queima do resíduo como combustível em usinas, por processos de reciclagem, e da compostagem e recuperação do biogás que é gerado em aterros sanitários.

Contudo, a escolha do processo produtivo do resíduo, irá depender do modo como o resíduo urbano foi gerado, coletado, tratado e condicionado. Isto porque é fundamental que os resíduos a serem aproveitados passem por uma adequada separação daqueles que possuem maior ou menor grau de homogeneidade para não haver mistura, especialmente, os orgânicos. Com essa separação, o potencial de aproveitamento energético do resíduo pode aumentar, tornando economicamente inviável, contudo, é essencial que os RSU recebam a destinação correta.

Gomes et al. (2017) sinalizam que no caso dos RSU, tem sido observado que muitas empresas ainda usam os aterros como sua destinação final, alternativa não muito indicada, uma vez que há outras formas de destinação que não deixa o resíduo exposto, tais como reciclar, incinerar e outros. No caso da incineração, esta, além de queimar o resíduo, também é uma maneira de recuperação do potencial energético presente nesse material, sendo esta, uma estratégia de tratamento que se mostra viável e adequada para a destinação de RSU, principalmente, por possibilitar que resíduos que não podem ser reciclados sejam transformados em energia.

Ainda para Gomes et al. (2017), devido ao grande volume de RSU que tem sido lançado pelas empresas em aterros, pode-se dizer que há a diminuição de vida útil do espaço e, por consequência, a necessidade de outros espaços para a criação de novos aterros. Tal fato resulta em aumento dos custos logísticos para a realização da coleta e transporte desse material, bem como custos para atender às legislações ambientais.

A destinação correta de RSU inclui a reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação e o aproveitamento energético ou outras formas de destinações aceitas pelos órgãos competentes sobre o assunto. Neste caso, devem ser incluídos, de acordo com Soares, Miyamaru e Martins (2017), a disposição final, considerando as normas operacionais específicas com o objetivo de evitar que danos ou riscos sejam causados à segurança e à saúde pública, reduzindo, assim, os impactos ambientais.

A incineração de RSU, segundo Soares, Miyamaru e Martins (2017), é um processo que deve começar por meio da seleção manual e mecânica dos materiais que apresentam potencial de reciclagem, como, por exemplo, garrafas pet, vidro, latas de aço, papelão, alumínio, e outros. Esses materiais previamente selecionados são aqueles que serão enviados para a incineração.

4.2 Gaseificação

Segundo Neto (2011), os primeiros usos de gaseificadores foram datados do início do século 19, quando se fez uso de destilação seca de material orgânico para uso em iluminação pública. Ainda segundo o autor, através dos anos novos tipos de gaseificadores foram sendo desenvolvidos, passando pelos dispositivos portáteis operados durante os períodos de guerra em veículos, os gasogênios, e a partir destes que os gaseificadores de biomassa foram desenvolvidos. No Brasil, o estudo mais profundo sobre gaseificadores teve início nas décadas de 80 e 90 e também mais recentemente.

De acordo com Lora *et al.* (2012), a gaseificação pode ser definida como um processo de conversão termoquímica de um material sólido ou líquido (que contem carbono na sua composição), em um combustível gasoso, através da oxidação parcial a temperaturas elevadas (800° á 1100°C) e em pressões atmosféricas ou maiores, até 33 bar, utilizando-se agentes de gaseificação que podem ser ar, vapor de água, oxigênio, ou uma mistura destes, em quantidades inferiores a estequiométrica.

Para Qian *et al.* (2015) quando se fala em gaseificação é preciso explicar que a biomassa pode ser convertida em biocombustíveis e bioprodutos via processos termoquímicos, como a gaseificação.

Além disso, as emissões líquidas de dióxido de carbono do uso de biocombustíveis são consideradas nulas ou negativas, porque o CO₂ liberado é reciclado a partir da atmosfera capturada durante o processo de gaseificação.

Ademais, este processo é indicado por apresentar uma biomassa com baixa quantidade de enxofre e nitrogênio, uma vez que a combustão leva a menores emissões de gases nocivos. Tais vantagens da biomassa fazem dela um promissor recurso energético renovável.

Segundo Peter (2002), são as propriedades inerentes da fonte de biomassa que determinam a escolha do processo de conversão e quaisquer dificuldades de processamento subseqüentes que possam surgir. Ainda segundo o autor, as principais propriedades do material de interesse, durante o processamento como fonte de energia, são: o teor de umidade (intrínseco e extrínseco), o valor calórico, proporções de carbono fixo e voláteis, o teor de cinza / resíduo, o teor de metais alcalinos e a relação celulose / lignina.

Somado ao exposto, Qian *et al.* (2015) ainda sinalizam que a gaseificação transforma a biomassa em basicamente uma mistura gasosa (gás de síntese contendo CO, H₂, CO₂, CH₄ e quantidades menores de hidrocarbonetos superiores) fornecendo uma quantidade controlada de agente oxidante sob alta temperatura. O rendimento típico da gaseificação é de cerca de 10% em peso de biomassa. O agente oxidante usado na gaseificação pode ser oxigênio, ar, vapor ou misturas desses gases, convertendo-os em energia.

De um modo geral, as etapas que ocorrem durante a gaseificação em uma temperatura gradiente podem ser distinguidas como conclusão de secagem, pirólise, combustão (oxidação) e gaseificação (redução).

Os gaseificadores onde ocorrem as reações de gaseificação, são, de acordo com Cha *et al.* (2016), divididos em reatores de leito móvel, reatores de leito fluidizado e reatores de leito arrastado, dependendo da forma de contato entre agente de gaseificação e biomassa. Os parâmetros que afetam o reações de gaseificação incluem a temperatura de reação, gaseificação tipo de agente, relação agente de gaseificação (biomassa e pressão).

O gaseificador de leito móvel também é conhecido como gaseificador de leito fixo devido ao seu modo de funcionamento. Durante sua operação, à medida que o combustível é inserido no reator, e o biochar retirado na parte inferior, o leito movimenta-se do topo para o fundo.

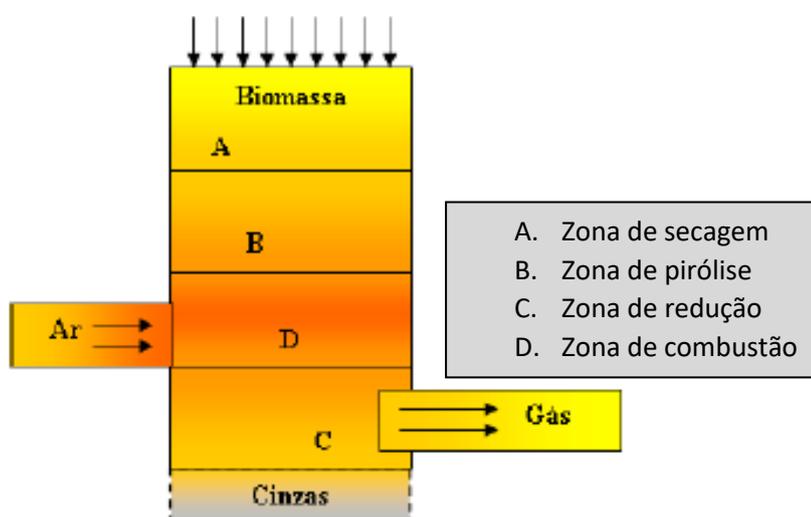
Nesse tipo de reator, a gaseificação também pode ser classificada em função do movimento do fluxo do gás gerado no interior do reator, podendo ser de corrente ascendente (updraft) ou descendente (downdraft). Essa classificação também pode ser de acordo com o movimento do combustível a ser transformado (biomassa) e do gás de síntese gerado.

Neste sentido, a gaseificação pode ser classificada como contracorrente, cocorrente e em fluxo cruzado (cross-flow). Segundo Drogru *et al.* (2002), em um

gaseificador tipo cocorrente, o combustível a ser gaseificado deve apresentar tamanho de partículas de no máximo 1/8 da do diâmetro da garganta do reator. Esse tipo de reator apresenta boa eficiência e podendo utilizar combustíveis de alta massa específica e granulometria com os mais variados tamanhos de partículas.

Lora *et al.* (2008) mostra na figura 4, as fases da conversão térmica da biomassa em um gaseificador de leito fixo tipo concorrente, gaseificador que foi utilizado no produção do biochar objeto do presente estudo.

Figura 4 – Esquema gaseificador em reator de leito fixo concorrente.



Fonte: Adaptado, Lora *et al* (2008).

Para Ardila (2015), dentre os gaseificadores mais usuais se pode apontar os reatores de leito fluidizado e fixo. Esse gaseificador gera um gás que resulta da mistura de metano, monóxido de carbono, nitrogênio, hidrogênio e dióxido de carbono, com diferentes proporções e segundo as condições do processo.

A gaseificação com vapor, segundo Luz (2013), produz um gás de teor de hidrogênio elevado e com um médio poder calorífico médio, tendo o vapor como o único agente gaseificante no processo. A gaseificação com vapor não utiliza reações exotérmicas, sendo necessário fornecer energia externa de modo que seja possível obter reações endotérmicas.

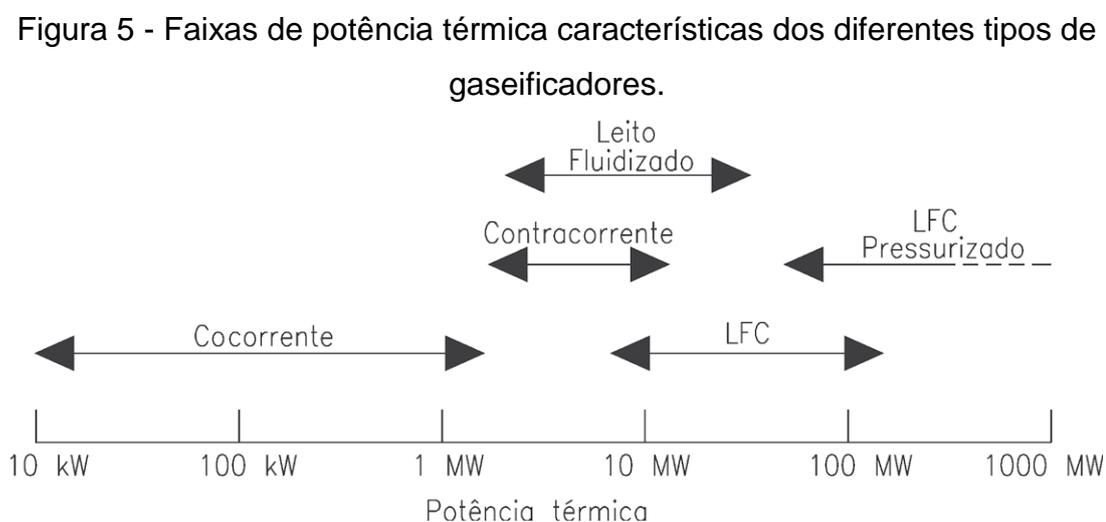
Quanto a gaseificação por plasma, Luz (2013) sinaliza ser um processo que ocorre a partir de uma fonte de calor do reator. Esta fonte de calor, por sua vez, se dá por meio de tochas de plasma, o qual é feito um arco elétrico, gerando um gás a elevada temperatura. É um processo que permite o uso de combustível que tem

muitas variações em sua constituição elementar, teor de umidade, tamanho, e outros.

Dentre os benefícios proporcionados pela gaseificação, Ardila (2015), Rollinson (2018) e Luz (2013) apontam o fato de ela ser uma combustão incompleta, uma vez que o gás por ela produzido será queimado na fase seguinte. Outro benefício é citado por Rollinson (2018) que afirma ser a gaseificação interessante por apresentar fácil transporte e distribuição, e, sobre isso, Ardila (2015) e Luz (2013) complementam enfatizando que, por ser o produto final um gás combustível, seu transporte pode ser realizado por meio de tubulações para longas distâncias, sem que para isso, seja preciso construir usina local.

A gaseificação é vantajosa no processo de RSU porque, para Luz (2013), possui um simples controle e uma combustão limpa. Mas, corroborando com Luz (2013), Ardila (2015) sinaliza ser uma técnica de combustão mais eficiente.

A figura 5 apresenta as faixas de potência térmicas para os diferentes tipos de reatores segundo Silva (apud Altener, 2002).



Fonte: Altener, 2002.

De acordo com MCKENDRY (2002), há vantagens e desvantagens dos vários tipos de reatores de gaseificação.

A seleção do tipo de gaseificador e seu design irão depender de vários fatores, como por exemplo, a influência das propriedades da matéria-prima (tanto química como física); as características do gás do produto requerido; as diversas variáveis operacionais envolvidas; os custos de capital do gaseificador e limpeza de

gás do produto da unidade deve ser o mais baixo possível; os custos de operação e manutenção devem ser baixos; o gaseificador deve ser robusto. No processo de gaseificação, a preparação de matéria-prima, como secagem, separação, redução de tamanho ou peletização, deve ser evitada.

Segundo o autor, aspectos que tornam o equipamento menos atraente são o design e operação complexos e a necessidade que o tamanho de partícula da matéria-prima de biomassa seja reduzido em tamanho,

5 MATERIAIS E MÉTODOS

O capítulo que segue foi desenvolvido com a finalidade de mostrar os ensaios e testes realizados, de acordo com as normas, para determinar as alterações nas propriedades físicas e mecânicas do cimento/argamassa com a substituição parcial das frações de areia (agregado miúdo) por biochar resultante da gaseificação de Resíduos Sólidos Urbanos (Biochar de RSU) coletado em gaseificador em escala piloto localizado no Laboratório de Energia Heliotérmica nas instalações da Universidade Federal de Itajubá, Brasil.

Para tanto, a metodologia de pesquisa que melhor atendeu ao propósito foi à aplicada.

É um tipo de pesquisa que, segundo Gil (2012), apresenta característica científica, pois requer a aplicação prática da ciência ao longo do estudo.

Assim sendo, entende-se ser a pesquisa aplicada útil no contexto dessa dissertação pelo fato de possibilitar ao pesquisador encontrar soluções para o problema proposto.

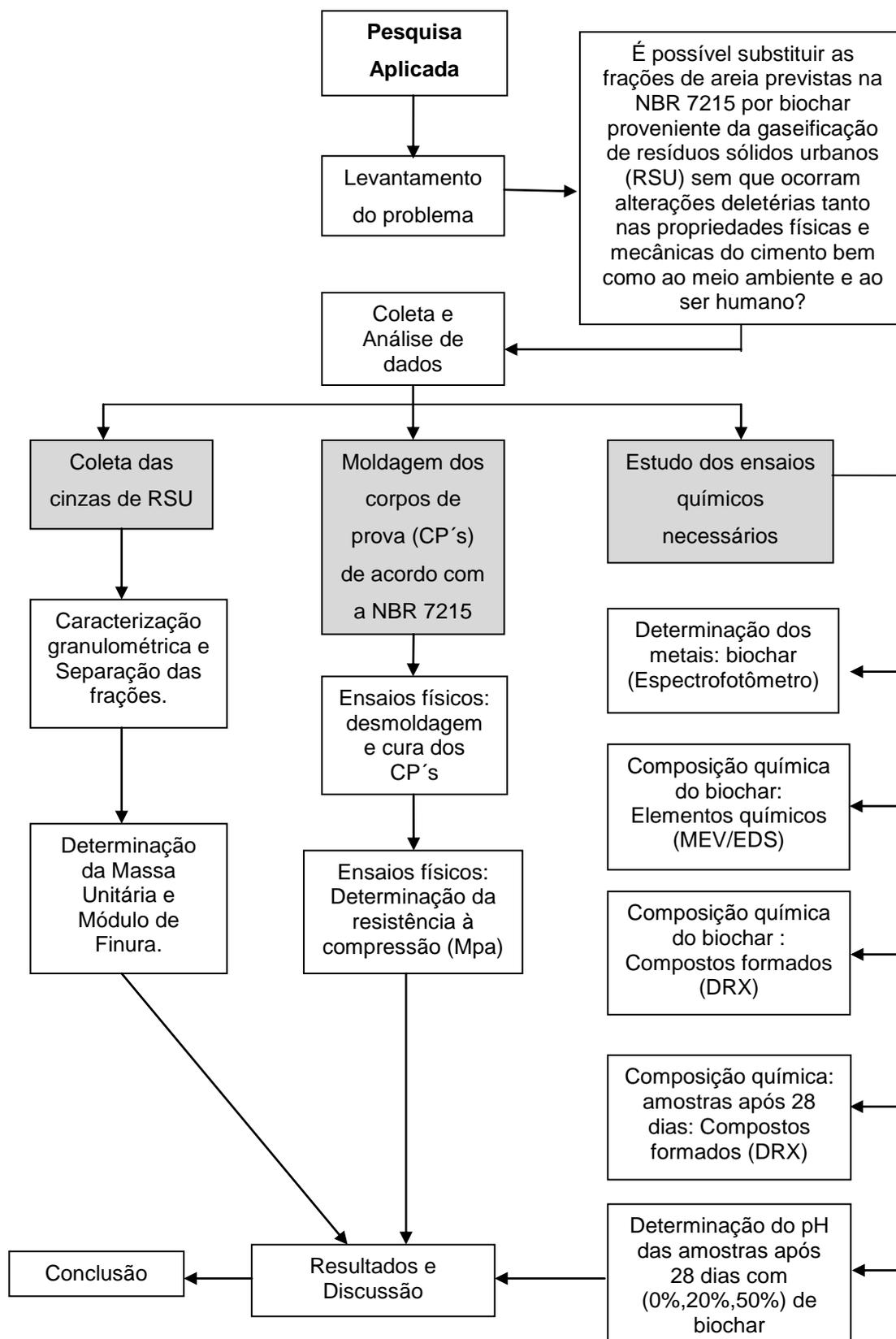
Os laboratórios utilizados no presente estudo foram os laboratórios de Concreto do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais, Campus Pouso Alegre, e os laboratórios de Química e Meio Ambiente da UNIFEI, Campus Itajubá.

As amostras utilizadas (biochar) nos testes de resistência do cimento foram coletadas no Laboratório de Energia Heliotérmica da UNIFEI.

O passo a passo para o desenvolvimento do trabalho pode ser visto na figura 6, que mostra o fluxograma com as principais etapas da pesquisa, executadas por vezes, de forma preliminar e também de forma concomitante em alguns momentos.

Para os ensaios e análise dos dados obtidos, foram aplicadas como ferramentas, as normas brasileiras, sendo elas a NBR 7214, NBR 7215, NBR 7211, NBR NM 45, NBR NM 27 e NBR NM 248. A norma NBR 7215 que é a base do presente trabalho, foi alterada/atualizada no ano de 2019. Entretanto, a norma utilizada como referência para o presente estudo, é a norma NBR 7215 do ano de 1997, considerando que os ensaios foram realizados no ano de 2018.

Figura 6 – Fluxograma da pesquisa aplicada e etapas do trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor da pesquisa, 2018.

5.1 Especificações do gaseificador utilizado na produção do biochar de RSU

O biochar proveniente da gaseificação de resíduo sólido utilizada neste trabalho foi produzida por um gaseificador de leito fixo do tipo cocorrente de duplo estágio de gaseificação, que possibilita a obtenção de um gás de boa qualidade com relação ao teor de alcatrão apresentado, o que pode permitir a sua utilização como combustível em motores de combustão interna.

Esse reator está instalado no Laboratório de Energia Heliotérmica da UNIFEI, tem capacidade térmica de 50 kW térmicos, construído em aço carbono 1020 e com revestimento interno de cimento refratário, tem diâmetro externo de 500 mm e foi projetado para operar com lenha como combustível.

Esse reator permite obter um gás combustível de baixo poder calorífico, daí o nome gás pobre, da ordem de 4 a 5 MJ/Nm³, valor característico de gaseificadores que operam com ar como agente de gaseificação. Ele é composto de monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂) e metano (CH₄), sendo que o percentual volumétrico de cada um deles deve ser em torno de 20% CO, 17% H₂ e 2% de CH₄.

A Figura 7 mostra o gaseificador utilizado para produzir o biochar de RSU utilizado no presente trabalho.

Figura 7 - Gaseificador de leito fixo instalado no laboratório de Energia Heliotérmica da UNIFEI – Itajubá/MG – Brasil.



Fonte: Autor da pesquisa, 2018.

De acordo com Henriques (2009), gaseificadores de leito fixo representam a maior parte dos equipamentos em operação ou em construção no mundo, representando cerca 77,5% dos projetos de gaseificadores. Esses gaseificadores são indicados para projetos de pequeno porte por serem adequados para conversão de quantidade relativamente pequena de biomassa.

5.2 Tipo de cimento Portland utilizado

A definição do tipo de cimento a ser utilizado levou em conta o tipo mais comum comercializado no Brasil. Sendo assim, o cimento portland CP II 32 – E é o encontrado com maior facilidade em casas de materiais para construção de todo o Brasil. De acordo com a NBR 16.687/2018, esse tipo de cimento é composto por 51 a 94% de clínquer + gesso; 6 a 34% de escória granulada de alto forno, adicionado de 0 a 15% de material carbonático. Na indústria cimenteira, material carbonático geralmente se refere ao fíler calcário que é um tipo de mineral moído e calcinado.

5.3 Agregado miúdo (areia) utilizado nos ensaios

O agregado miúdo utilizado nos ensaios é a areia normal brasileira. Os pré-requisitos para produção dessa areia estão contidos na NBR 7214. Segundo essa norma, a areia normal é um material natural quartozoso coletado em direção a nascente no Rio Tietê na cidade de São Paulo e produzido e fornecido pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo) e que satisfaz as exigências contidas na referida norma. As frações de areia normal utilizadas são as de nº 16, 30, 50 e 100 que apresentam dimensões de partículas de 1.2mm, 0.6mm, 0.3mm e 0.15mm respectivamente.

5.4 Briquetes de RSU utilizados na gaseificação

Os briquetes utilizados neste estudo (Figura 8) foram elaborados a partir de RSU coletado na cidade de Itajubá, Minas Gerais, Brasil e estavam armazenados no Laboratório de Energia Heliotérmica da UNFEI. Foram fabricados em uma briquetadeira e possuem diâmetro médio de 5,5 cm, sendo seu teor de umidade,

composição gravimétrica e poder calorífico desconhecidos, pois o biochar coletado era subproduto de RSU gaseificado em data desconhecida, conforme mostra a Figura 8.

Figura 8 – Briquetes utilizados na gaseificação do RSU.



Fonte: Autor da pesquisa, 2018.

5.5 Coleta do biochar

No Laboratório de Energia Heliotérmica da UNIFEI, foram coletadas 03 (três) amostras semelhantes (amostragem por pilhas) de acordo com a NBR NM 26 (Agregados: Amostragem), com volume de 40 dm³ e massa 25 kg. Em seguida o material foi reduzido de acordo com a NBR NM 27 (Redução da Amostra de Campo Para Ensaio de Laboratório), de acordo com o método B, por quarteamento.

5.6 Granulometria do biochar de RSU

O ensaio de granulometria foi necessário pelo fato de a sua composição influenciar de forma significativa nas propriedades das argamassas e concretos. No caso do presente estudo, ela foi fundamental para separar as partículas que seriam posteriormente misturadas (frações 0,15mm e 1,2mm). O objetivo é substituir as frações de areia preconizadas pela norma NBR 7215.

O biochar de RSU coletado apresentou tamanhos variados de partículas. Para determinar sua distribuição granulométrica foi utilizada como referência a

Norma ABNT NBR NM 248/2003, onde uma amostra foi seca em estufa entre 100° C e 110° C durante 24 horas. Em seguida, foram utilizadas as peneiras da série normal e intermediária (Tabela 3) com posterior agitação mecânica.

Tabela 3 – Séries normal e intermediária.

<i>Série Normal / Série Normal</i>	<i>Série Intermediária / Série Intermediária</i>
75 mm	-
-	63 mm
-	50 mm
37,5 mm	-
-	31,5 mm
-	25 mm
19 mm	-
-	12,5 mm
9,5 mm	-
-	6,3 mm
4,75 mm	-
2,36 mm	-
1,18 mm	-
600 µm	-
300 µm	-
150 µm	-

Fonte: NBR 7211/2005.

5.7 Traços utilizados: substituição parcial da areia normal por biochar proveniente da gaseificação de RSU

Para determinar o impacto na resistência do cimento devido à adição do biochar de RSU, as quatro frações de areia previstas na norma foram substituídas gradualmente pelo biochar nos seguintes teores: 0%, 5%, 10%, 20%, 30% e 50% e apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Traços utilizados no estudo.

Teor de RSU (%)	Cimento (g)	Água (g)	Areia 16 – 1,2 mm (g)	Areia 30 – 0,6 mm (g)	Areia 50 – 0,3 mm (g)	Areia 100 – 0,15 mm (g)	Cinza de RSU (g)
0	624,0	300,0	468,0	468,0	468,0	468,0	0,0
5	624,0	300,0	444,6	444,6	444,6	444,6	93,6
10	624,0	300,0	421,2	421,2	421,2	421,2	187,2
20	624,0	300,0	374,4	374,4	374,4	374,4	374,4
30	624,0	300,0	327,6	327,6	327,6	327,6	561,6
50	624,0	300,0	234,0	234,0	234,0	234,0	936,0
100	624,0	300,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1872,0

Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

5.8 Moldagem, desmoldagem, cura e rompimento dos corpos de prova (CP's)

Todo procedimento para moldagem, desmoldagem e cura dos corpos de prova seguiu o que determina a NBR 7215. Foram moldados 6 (seis) corpos de prova cilíndricos (50x100mm) para cada traço (tabela 9), exceto para os traços com os teores de 5% e 10% de Biochar, onde apenas 4 foram moldados devido a pouca quantidade de material disponível.

Os traços moldados foram para as idades de 14 e 28 dias. Foi realizada a cura inicial ao ar e a cura final em água. O rompimento foi realizado em uma prensa hidráulica manual com visor digital simples da Marca SOLOTEST, com carga máxima e útil de 100 tf localizada no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais, Campus Pouso Alegre, Minas Gerais.

5.9 Análises químicas quanto à presença de metais

Foi solubilizada em 20 mL de ácido nítrico (HNO₃) uma amostra com massa aproximada de 0,612 gramas de cinza de RSU, que após digestão, foi diluída em 80 mL de água.

Em seguida, foram elaborados padrões para investigar a presença dos seguintes metais: Chumbo (Pb), Níquel (Ni), Manganês (Mn), Ferro (Fe), Cobre

(Cu), Cromo (Cr), Cobalto (Co), Cádmiio (Cd), Cálcio (Ca), Alumínio (Al), Estanho (Sn) e Zinco (Zn).

Para análise dos padrões montados, foi utilizado um espectrofotômetro de absorção de atômica por chama, da Marca Agilent, Mod. 200, Series AA (Figura 9), que está localizado em um dos Laboratórios de química da UNIFEI, a Central analítica. A escolha sobre quais metais seriam analisados foi devido ao impacto que causam na resistência do cimento, na contaminação do meio ambiente e ao homem, e ainda, a disponibilidade do material em laboratório disponível.

Figura 9 - Espectrofotômetro de absorção de atômica por chama.



Fonte: Autor da pesquisa, 2018.

5.10 Determinação dos elementos e compostos químicos presentes no biochar

Foram analisados 3 (três) pontos de uma amostra de biochar para se determinar os elementos químicos presentes.

O equipamento utilizado foi um MEV - Microscópio eletrônico de Varredura com EDS, modelo EVO MA 15 (Figura 10-a). Para determinação dos compostos formados, o equipamento utilizado foi um Difrátômetro da Marca Panalytical, Modelo X'Pert Pro (Figura 10-b). Ambos os equipamentos estão localizados no LCE – Laboratório de Caracterização Estrutural da UNIFEI. Após as análises, os picos gerados pelo aparelho foram comparados com as referências do software XPert

HighScore Plus (PANalytical B. V. All Rights Reserved, 2016). Nesses ensaios, apenas o biochar coletado foi analisado.

Figura 10 – Microscópio Eletrônico de Varredura com EDS (a) e Difratorômetro de Raios X (b).



a.



b.

Fonte: Autor da pesquisa, 2018.

5.11 Determinação dos compostos químicos presentes e pH das amostras após 28 dias

Considerando a heterogeneidade do material estudado, e as restrições de uso dos equipamentos na UNIFEI, optou-se por analisar apenas uma amostra de cada traço estudado, conforme Tabela 13. O equipamento utilizado foi um Difratorômetro da Marca Panalytical, Modelo X'Pert Pro (Figura 10-b). Os picos gerados pelo aparelho foram comparados com as referências do software XPert HighScore Plus (PANalytical B. V. All Rights Reserved, 2016).

Para determinação do pH, foi utilizada fenolftaleína após o rompimento nas amostras que possuíam teor de biochar de 20% e 50%, e ainda, na amostra de referência, que não possuía biochar (0%).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Análises físicas e químicas do biochar da gaseificação de RSU

6.1.2 Granulometria do Biochar de RSU

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos no ensaio de granulometria para o material coletado (biochar).

Tabela 5 – Resultados do Ensaio da granulometria do Biochar de RSU.

Peneira (mm)	Massa Retida (g)		Amostra 1		Amostra 2		Média	
	Amostra 1	Amostra 2	% Retida	% Acumulada	% Retida	% Acumulada	% Retida	% Acumulada
19	15,85	10,9	3,4	3,4	2,3	2,3	2,8	2,8
12,7	4,1	14,88	0,9	4,2	3,1	5,4	2,0	4,8
9,5	7,46	17,93	1,6	5,8	3,8	9,1	2,7	7,5
6,34	29,36	27,94	6,2	12,1	5,8	15,0	6,0	13,5
4,8	29,29	31,06	6,2	18,3	6,5	21,5	6,4	19,9
2,4	96,48	100,8	20,5	38,8	21,1	42,6	20,8	40,7
1,2	81,53	82,08	17,3	56,1	17,2	59,8	17,3	57,9
0,6	61,63	58,82	13,1	69,2	12,3	72,1	12,7	70,7
0,3	56,68	53,1	12,0	81,3	11,1	83,2	11,6	82,2
0,15	31,59	29,08	6,7	88,0	6,1	89,3	6,4	88,6
Fundo	56,63	51,13	12,0	100,0	10,7	100,0	11,4	100,0
TOTAL	470,6	477,72						
Máx. 0,3% variação	OK	OK						

Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

Com esses dados foi possível calcular o módulo de finura (MF) através da soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100, e ainda, a dimensão máxima características do agregado (Tabela 6).

Foram separadas duas amostras, m1 e m2, com as massas determinadas em 471,02g e 477,78g, respectivamente. A amostra m2 foi reservada e a determinação se iniciou com a amostra m1, com o peneiramento da mesma, por agitação mecânica.

A dimensão máxima característica (DMC) também foi identificada após o ensaio de granulometria. Segundo a NBR 7211, a DMC de um agregado é a

abertura da malha da peneira superior a qual a porcentagem acumulada for igual ou imediatamente inferior a 5 %. Sua função é verificar se um agregado tem tamanho adequado para ser utilizado em concretos de elementos estruturais de determinadas dimensões.

Corroborando com Aragão (2012), Mehta (2014) afirma que, quanto maior a dimensão máxima de um agregado, menor será a área superficial por unidade de volume que deve ser coberta pela pasta de cimento para uma dada relação água/cimento.

Ainda conforme este mesmo autor, agregados de granulometria contínua, ou seja, que não apresentam grande deficiência ou excesso de qualquer dimensão de partícula produzem as misturas de concreto mais trabalháveis e econômicas.

Na produção de concretos e argamassas que utilizam traços em volume, também é fundamental conhecer a massa unitária dos agregados utilizados na composição do concreto/argamassa. Essa característica do biochar de RSU foi calculada de acordo com a NBR NM 45/2006, pelo método C para amostras em estado solto.

O valor encontrado foi de $475,35 \text{ kg/m}^3$. De acordo com Mehta (2014) agregados que possuem massa unitária menor que 1.120 kg/m^3 são classificados como agregados leves.

De acordo com o autor, o peso leve do agregado se deve à sua microestrutura celular altamente porosa e geralmente frágil. Ainda segundo Mehta (2014), a areia natural normalmente utilizada em argamassas e concretos possui massa unitária de 1520 a 1680 kg/m^3 .

Outra importante propriedade dos agregados é a superfície específica que nada mais é que a área exposta desse agregado por unidade de peso/massa. Hawlitschek (2014), determinou que a superfície específica (BET) da areia normal definida pela NBR 7214 é de $0,28 \text{ m}^2/\text{g}$.

Estudando as propriedades adsorventes do subproduto da gaseificação de resíduos sólidos urbanos (Biochar de RSU) no tratamento de efluentes, Jung *et al.* (2019) encontrou uma superfície específica de $11,4 \text{ m}^2/\text{g}$.

Considerando que o material utilizado por Jung se assemelha ao utilizado no presente estudo, é altamente provável que o biochar de RSU analisado, possua elevada porosidade.

Tabela 6 - Massa inicial, M.F. e D.M.C. do RSU.

Massa seca das amostras (g)		Módulo de finura (mm)		Dimensão máxima característica (mm)	
m ₁	m ₂	m ₁	m ₂	m ₁	m ₂
471,02	477,78	3,61	3,80	12,7	12,7

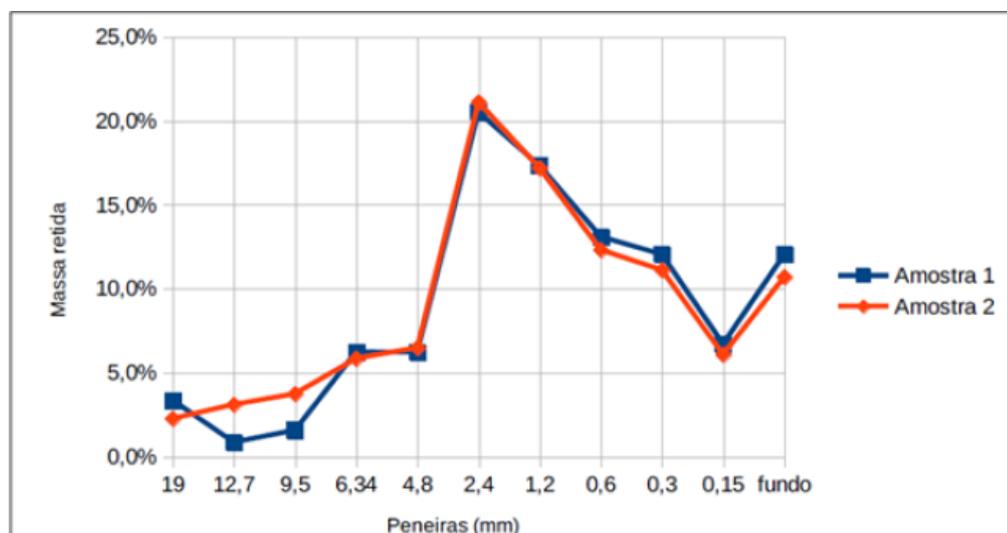
Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

Os ensaios para determinação da distribuição granulométrica do biochar de RSU foi realizado no Laboratório de Concreto e Agregados do Instituto Federal do Sul de Minas, Pouso Alegre/MG, Brasil.

Com essas informações foram construídos dois gráficos, o da distribuição granulométrica, Figura 11, e o da curva granulométrica ou “Curva S”, Figura 12.

Por meio desses Gráficos foi possível detectar com mais facilidade se o agregado miúdo (Biochar do RSU) se encaixa nas faixas desejáveis segundo a Norma NBR 7211.

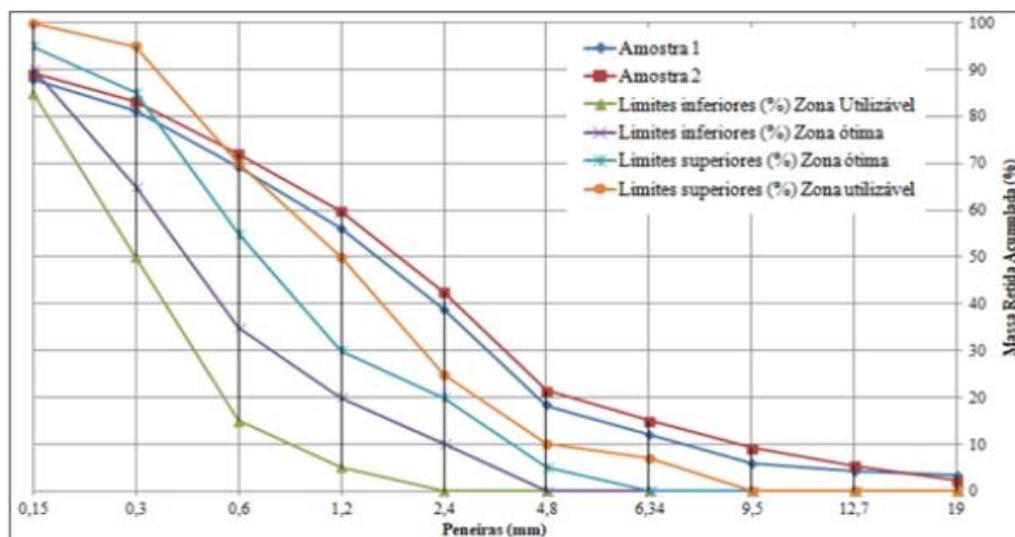
Figura 11 – Distribuição granulométrica do biochar de RSU.



Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

A curva “S” (Figura 12) mostra que o módulo de finura extrapolou os limites da zona utilizável superior, que segundo a norma NBR 7211 varia de 2,90 a 3,50. Para as duas amostras ensaiadas o módulo de finura foi de 3,61 para M1 e 3,80 para M2.

Figura 12 – Curva “S” – biochar de RSU



Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

De acordo com os gráficos apresentados, pode-se perceber que as amostras apresentam em sua maioria, tamanho de partículas superiores aos limites estabelecidos pela norma.

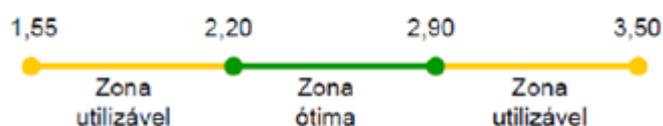
Ao se realizar a distribuição granulométrica do biochar, conforme apresentada na Figura 9, nota-se a predominância de grãos com tamanho 2,4 mm, ou seja, quase o dobro do percentual admitido pela norma na zona ótima do limite inferior.

Segundo a norma NBR 7211:2005, para esse tamanho de grão, a porcentagem em massa, retida acumulada na zona ótima do limite inferior é no máximo de 10%.

No entanto, os grãos utilizados no presente estudo possuem tamanho máximo de 1,2mm e nesse caso, os grãos apresentam percentual retido acumulado próximo ao que preconiza a referida norma.

Segundo Aragão (2012), o módulo de finura do agregado miúdo utilizado no presente trabalho (biochar de RSU) encontra-se acima da zona utilizável, conforme figura 13.

Figura 13 – Distribuição das zonas do módulo de finura.



Fonte: Aragão, 2012.

A análise granulométrica das amostras de biochar de RSU também mostrou que os tamanhos de partículas utilizados na pesquisa (frações entre 0,15 e 1,2 mm) são representativos das amostras analisadas.

Percebe-se que as partículas de biochar de RSU, em sua maioria, estão contidas nesse intervalo, sendo que a média acumulada das amostras 1 e 2 na fração de 1,2 mm representam 57,9%, de acordo com a Tabela 4.

6.2 Traço e tipo cimento utilizado na composição das amostras

Para se determinar a resistência à compressão do cimento com a adição do biochar proveniente da gaseificação de RSU, foi utilizada como referência a Norma NBR 7215/1996 – Determinação da Resistência a Compressão do Cimento Portland, sendo preparada a argamassa (traço) com diferentes teores de biochar de RSU e as frações de areia substituídas gradualmente na mistura.

6.2.1 Traço de referência – NBR 7215 (Sem adição da biochar de RSU)

A Tabela 7 apresenta o traço utilizado para elaboração da argamassa com a adição de biochar de RSU, seguindo o que preconiza a NBR 7215.

Tabela 7 – Traço preconizado pela NBR 7215.

Material	Massa para mistura (g)
Cimento Portland	624 ± 0,4
Água	300 ± 0,2
Areia normal	-----
- fração grossa	468 ± 0,3
- fração média grossa	468 ± 0,3
- fração média fina	468 ± 0,3
- fração fina	468 ± 0,3

Fonte: Adaptado da NBR 7215 pelo autor da pesquisa, 2018.

Importante ressaltar que todos os traços foram preparados com o uso de agitador mecânico de acordo com o tempo descrito na norma.

Verifica-se que a massa total de areia prevista pela norma (1872 g) foi mantida, sendo as frações de areia igualmente reduzidas devido à sua substituição pelo biochar de RSU. Com relação à fração da biochar de RSU utilizada, esta foi separada durante o ensaio de granulometria e foi resultado de uma mistura das

partículas de biochar retido entre as peneiras com malha 1,2mm e 0,15mm. Essa fração (entre 0,15 e 1,2mm) foi escolhida com o intuito de representar as 4 frações de areia em apenas uma fração de biochar. Essa escolha procurou reproduzir a manufatura desse material num eventual processo industrial, ou seja, a separação de biochar de RSU em mais de uma fração representaria um aumento de custos que poderá inviabilizar o seu uso.

6.2.2 Caracterização física e química do cimento utilizado – Cimento Cauê

O cimento utilizado no presente trabalho, o CP II e 32 do fabricante Cauê, foi caracterizado física e quimicamente por Grillo (2014), e atendeu às respectivas normas na época. O cimento caracterizado por Grillo, também segue o que preconiza a NBR 16.697:2018 (Requisitos – Cimento Portland).

Considerando os rigorosos padrões de qualidade que a maioria das cimenteiras segue, e ainda, considerando que o cimento utilizado no presente estudo é de um fabricante associado à Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), foi descartada uma nova caracterização por não representar fator determinante nos resultados para o tipo de cimento utilizado.

Sendo assim, o autor realizou a caracterização física dos cimentos Cauê e Holcim empregados na fabricação de concretos foi realizada na ABCP, Associação Brasileira de Cimento Portland - São Paulo e a análise química semiquantitativa (fluorescência de Raios X) foi realizada na indústria de Refratários TOGNI S/A - Poços de Caldas.

Essa caracterização foi utilizada como referência no presente estudo, considerando que o fabricante e o tipo do cimento utilizado são os mesmos.

A tabela 8 mostra os resultados para o cimento CP II E 32, da caracterização física feita por Grillo (2014).

Tabela 8 - Caracterização física dos cimentos Cauê e Holcim.

	Normas	Resultado		Limites da NBR 11578/91
		Cauê	Holcim	
Finura na peneira de 75 μ (%)	NBR 11579/91	4,3	4,4	<_ 10
Água da pasta de consistência normal (%)	NBR NM 43/03	28,2	25,0	-
Início de pega (h:min)	NBR NM 65/03	05:05	03:45	>_ 1h
Fim de pega (h:min)	NBR NM 65/03	06:30	05:00	<_ 10h
Tempo em aberto (h:min)	-	01:25	01:15	-
Permeabilidade ao ar (Blaine m ² /kg)	NBR NM 76/98	357	385	>_ 380
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 23/01	2,99	3	-
Expansabilidade (mm)	NBR NM 11582/91	0	0,5	<_ 5

Fonte: Grillo, 2014.

Segundo Grilo (2014), a massa específica e o ensaio de finura na peneira de 75 μ m dos dois cimentos são bastante semelhantes. No entanto, verificou-se um tempo de pega menor com a utilização do cimento Holcim, reflexo da quantidade menor de água necessária para hidratação desse cimento em função das partículas mais finas encontradas.

Ainda de acordo com o autor, os cimentos que possuem partículas mais finas tendem a hidratar-se mais rápido e, conseqüentemente, apresentar uma resistência mecânica inicial maior quando comparado com a hidratação mais lenta dos cimentos com partículas maiores. Pode-se observar na Tabela 9 a caracterização química dos cimentos obtida por Grillo (2014).

Tabela 9 – Análise química dos cimentos obtidos por fluorescência de Raios X.

Elemento Químico (%)	Cimento Holcim	Cimento Cauê
PF	5,200	4,100
Al ₂ O ₃	5,62	7,110
SiO ₂	22,300	22,450
TiO ₂	0,270	0,300
Fe ₂ O ₃	2,230	2,490
CaO	57,830	57,090
MgO	2,880	2,650
Na ₂ O	0,530	0,600
K ₂ O	0,740	0,710
P ₂ O ₅	0,160	0,000
ZrO ₂	0,020	0,300
Cr ₂ O ₃	0,070	0,040
Fe ₂ O ₃	0,734	0,956
I	0,045	0,039
MnO	0,238	0,372
Nb ₂ O ₅	0,022	0,024
SO ₃	0,892	0,864
SrO	0,147	0,214
ZnO	0,027	0,000

Fonte: Grillo, 2014.

6.3 Caracterização Química do Biochar de RSU

6.3.1 Presença de metais

Na Central Analítica, um dos Laboratórios de Química da UNIFEI, foram realizados testes para determinar a presença de metais no biochar de RSU (Tabela 10).

Após a análise da amostra, foi detectada a presença dos seguintes metais: Chumbo (Pb), Níquel (Ni), Manganês (Mn), Ferro (Fe), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Cobalto (Co), Cádmiio (Cd), Cálcio (Ca), Alumínio (Al), Estanho (Sn), e Zinco (Zn). Percebe-se que a amostra apresentou concentrações elevadas de Ferro e Alumínio.

Também se pode observar que a concentração de chumbo está acima do limite de tolerância preconizado pela Norma Regulamentadora nº 15 do Ministério do Trabalho e emprego, que é de 0,1 ppm. Sobre a presença de metais no biochar de RSU, Seo *et al.* (2018) menciona que esses metais podem ser recuperados durante o tratamento químico do biochar e enterrados caso necessário.

A alta concentração de ferro e alumínio no biochar de RSU pode ter interferido de maneira deletéria na formação dos silicatos responsáveis pela resistência do cimento.

Siddique *et al.* (2018), em seu estudo sobre a adição de biochar de incineração de resíduos sólidos urbanos municipais no concreto, menciona a possibilidade das reações de expansão do alumínio na mistura, e a respectiva formação do hidróxido de alumínio com posterior obtenção de fase gasosa durante o estado plástico da pasta de cimento. Segundo Siddique, nessa situação, há um aumento na porosidade do concreto devido à formação dessa fase gasosa.

Bassam *et al.* (2018), adicionou em argamassas cimentícias, pó de ferro reciclado com tamanhos de partículas variadas, mas com tamanhos semelhantes as da areia, e em teores entre 0% e 40%. Esse pó de ferro possuía origens diversas, inclusive resíduos sólidos municipais, oficinas, fábricas e resíduos da construção civil. Bassam verificou que a resistência à compressão diminuiu com o aumento da porcentagem do pó de ferro. Ao adicionar 10% desse material, a resistência diminuiu 6,45% em relação à mistura de referência. Com a adição de 40% de pó de ferro Bassam constatou uma queda de 42,30%.

Em ambos os casos o rompimento das amostras se deu aos 28 dias. No presente trabalho, a expressiva concentração de ferro nas amostras moldadas com todos os teores de biochar de RSU adicionados, foi claramente observada no aspecto ferruginoso dos corpos de prova, conforme mostrado na figura 14.

Figura 14 – Aspecto ferruginoso dos corpos de prova



Fonte: Dados da Pesquisa, 2018.

As concentrações dos metais encontrados nas amostras de RSU digeridas em ácido são apresentadas na Tabela 10:

Tabela 10 – Concentração de metais identificados no biochar de RSU.

Metal	Conc. (mg/L) ou *ppm	Metal	(mg/L) ou *ppm
Chumbo (Pb)	1,030	Cobalto (Co)	3,446
Níquel (Ni)	0,573	Cádmio (Cd)	Concentração menor que o limite de quantificação do equipamento.
Manganês (Mn)	3,149	Cálcio (Ca)	28,000
Ferro (Fe)	143,03	Alumínio (Al)	152,85
Cobre (Cu)	2,440	Estanho (Sn)	56,67
Cromo (Cr)	2,625	Zinco (Zn)	10,112

Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

*ppm – parte por milhão.

Em um ensaio utilizando fenolftaleína nas amostras depois de rompidas e com teor de biochar superior á 20%, verificou-se um pH inferior á 9, ou seja, valor adequado segundo a NBR 10004/2004 (ABNT, 2004a) mas não condizente com concretos de boa qualidade segundo o fabricante de cimento, Cimentos Itambé.

Comparando-se as concentrações dos metais encontrados nas amostras de RSU, com os anexos F e G da NBR 10004/2004 (ABNT, 2004a), que preconiza parâmetros seguros para extratos lixiviados (F) e solubilizados (G), verificou-se que as concentrações estavam acima dos limites de tolerância previstos na norma.

A presença do elemento chumbo ainda confere periculosidade á amostra, segundo a referida norma.

6.3.2 Composição Química do Biochar de RSU – MEV e EDS

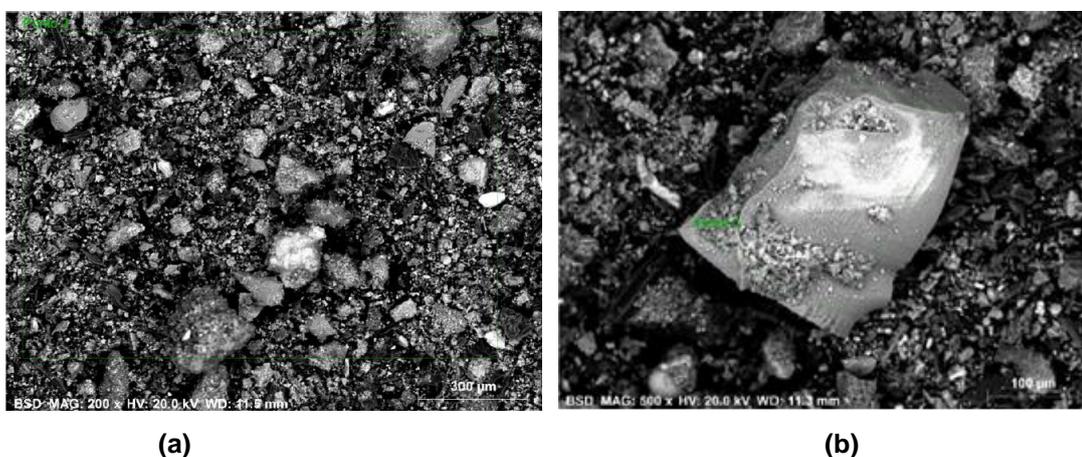
Para determinação da composição química e identificação da morfologia das partículas de biochar, foram utilizadas as técnicas de MEV e EDS.

6.3.2.1 MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

No Laboratório de Caracterização Estrutural da Unifei (LCE), foram analisadas três pontos de uma amostra de Biochar de RSU.

A Figura 15 apresenta os detalhes do Ponto 0 (a) e Ponto 2 (b) respectivamente. Pela imagem, nota-se que as partículas apresentam morfologia angular e faces pouco arredondadas com certo grau de aspereza. Pode-se perceber também o grande número de vazios entre elas.

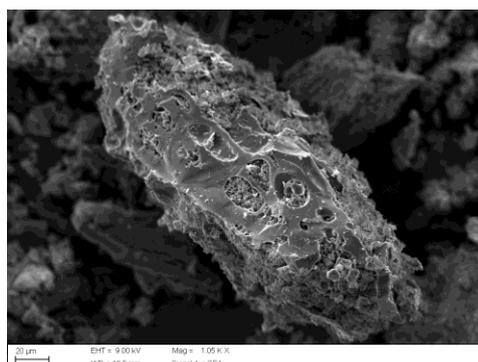
Figura 15 - Foto micrografia do ponto 0 (a) e do Ponto 2 (b).



Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

A imagem do Ponto 0 possui resolução de 300 µm e a do Ponto 2 resolução de 100 µm. Com relação ao tamanho, nota-se que possuem tamanhos variados, alguns com formato individual lamelar e um pouco achatados. Ampliando-se a imagem para 20 µm (Figura 16), é visível a porosidade do material.

Figura 16 – MEV/EDS DO BIOCHAR DE RSU.

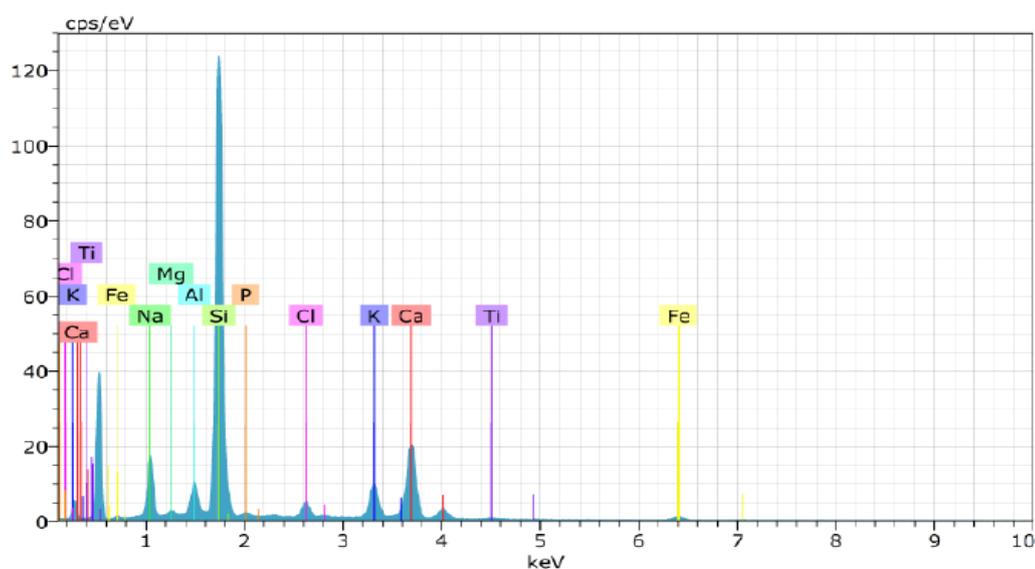


Fonte: Dados da pesquisa, 2019.

6.3.2.2 EDS do biochar de RSU

A Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS) forneceu o espectro dos elementos reconhecidos e uma tabela com as porcentagens em peso em dois pontos analisados, o Ponto 0 e o Ponto 2 (Figuras 17 e 18).

Figura 17 - EDS do Ponto 0 – Espectro por dispersão de Energia com tabela de discriminação dos elementos identificados.



Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

Tabela 11 – Porcentagens em peso - Ponto 0

ELEMENTO	NÚMERO ATÔMICO	PESO NORMALIZADO (% PESO)
Si	14	48.81
Ca	20	22.11
Na	11	9.88
K	19	7.92
Al	13	3.94
Cl	17	3.00
Fe	26	2.39
P	15	1.05
MG	12	0.47
Ti	22	0.42
TOTAL		100.00

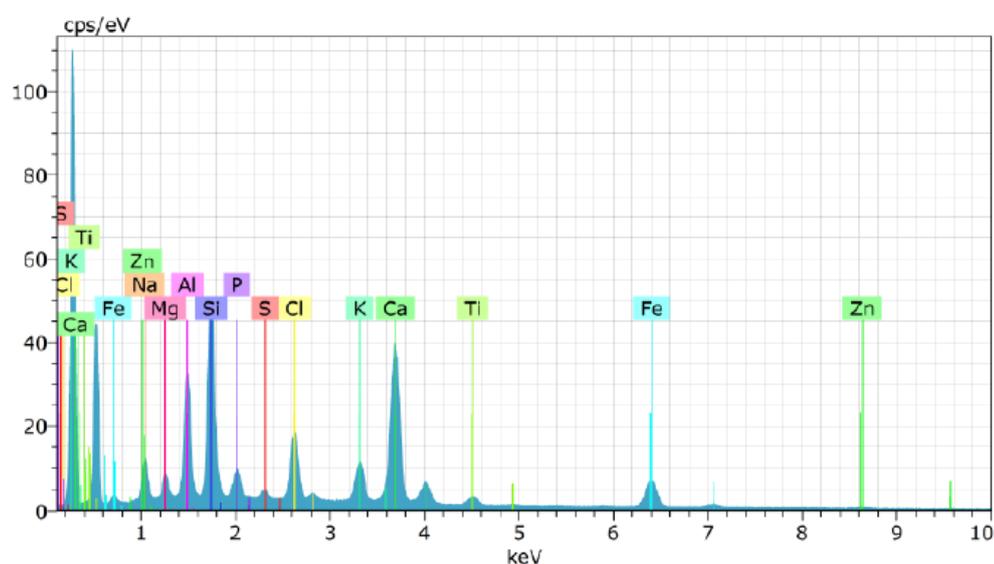
Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

A tabela 11, mostra que os elementos identificados no ponto 0 foram: Silício, Cálcio, Sódio, Potássio, Alumínio, Cloro, Ferro, Fósforo, Magnésio e Titânio.

Considerando a heterogeneidade do material gaseificado, é difícil dizer a origem de cada elemento na composição do biochar de RSU.

Nesse ponto (Ponto 0) a abrangência da análise foi mais ampla (200x), sendo analisada uma área maior pelo equipamento. Na análise do Ponto 2 (Figura 18), obteve-se valores diferentes para o mesmo material, pois nesse ponto a análise foi mais restrita e pontual (500x).

Figura 18 – EDS DO PONTO 02 (Espectro por dispersão de Energia com tabela de discriminação dos elementos identificados).



Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

Tabela 12 – Porcentagens em peso - Ponto 2.

ELEMENTO	NÚMERO ATÔMICO	PESO NORMALIZADO (% PESO)
Ca	20	30.28
Si	14	16.59
Fe	26	12.82
Al	13	11.66
Cl	17	7.91
Na	11	5.97
K	19	5.54
P	15	3.29
MG	12	2.27
Ti	22	2.22
S	16	0.79
Zn	30	0.65
TOTAL		100.00

Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

Na tabela 12, estão os elementos identificados no Ponto 2: Cálcio(Ca), Silício(Si), Ferro(Fe), Alumínio(Al), Cloro(Cl), Sódio(Na), Potássio(K), Fósforo(P), Magnésio(Mg), Titânio(Ti), Enxofre(S) e Zinco(Zn). Nesse ponto, elementos adicionais, como enxofre e zinco também foram localizados.

Importante ressaltar que elementos químicos de baixo peso atômico como o carbono e o oxigênio são detectados de maneira inexata e influenciam na determinação de outros elementos.

Jung *et al* (2019), também investigou quimicamente biochar de RSU. Os resultados de suas análises revelaram que o biochar continha quantidades significativas de inorgânicos em sua composição, principalmente Ca, Al, Si, Na. Outros inorgânicos químicos como C, O, Cl, K e Fe, também foram encontrados corroborando os dados encontrados no presente estudo.

6.3.3 Difração de Raios – X (DRX)

6.3.3.1 Difração de raios-X dos Corpos de Prova após os ensaios de compressão

De acordo com Hooler, (2009), a difração de raios x é uma maneira prática e conveniente para a identificação qualitativa das fases presentes na microestrutura de compostos cristalinos. Como cada substância possui um padrão único de difração de raios x, esse método é recomendado para identificação qualitativa de sólidos.

Para detectar as fases formadas (compostos), as amostras (corpos de prova - CP'S) rompidas aos 28 dias, foram analisadas no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) da UNIFEI.

Os picos gerados pelo aparelho foram comparados com as referências do software XPert HighScore Plus (PANalytical B. V. All Rights Reserved, 2016).

Como as amostras analisadas eram de um material incomum (composto por cimento, areia e biochar de RSU), foram utilizadas referências da literatura da Difração de Raios – X em materiais cimentícios para definição dos padrões de configuração que seriam adotados pelo equipamento.

Sendo assim, os parâmetros utilizados no ensaio foram: tensão 40 kV e corrente 40 mA, com range de varredura de 10 à 85°, com passo de leitura a cada 0.02° a cada 2 segundos. Um resumo das amostras analisadas está descrito na

Tabela 13. A figura 19 mostra os resultados obtidos para os teores de biochar analisados.

Quanto á idade adotada (28 dias), as particularidades da microestrutura desenvolvem-se rapidamente desde o contato do cimento com a água. Nos primeiros minutos e nas horas subseqüentes, as mudanças são bastante rápidas; depois se tornam mais lentas após a primeira semana, sendo que o processo de hidratação continua durante meses e anos. (IBRACON, 2011). Para o presente estudo, a idade de 28 dias é a mais adequada considerando que nessa idade, todas as principais microestruturas já foram constituídas.

Tabela 13 – Amostras analisadas por difração de raios-x.

Amostra	Teor de cinza de RSU (%)
CP rompido aos 28 dias. (referência)	0
CP rompido aos 28 dias.	5
CP rompido aos 28 dias	10
CP rompido aos 28 dias	20
CP rompido aos 28 dias	30
CP rompido aos 28 dias.	50

Fonte: Dados da pesquisa, 2019.

Os difratogramas mostraram que, na argamassa de referência, os compostos formados, CaCO_3 , SiO_2 , Ca(OH)_2 , são esperados para as fases sólidas da pasta de cimento hidratada. Segundo Mehta et al (2014), nessas fases formam-se o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 e sulfoaluminatos de cálcio.

Entretanto, com a adição do biochar, outros compostos não esperados foram formados. Na amostra com 10% de biochar de RSU, foi constatada a presença do Brometo de Cobre (CuBr) e do Siliceto de Cromo (CrSi).

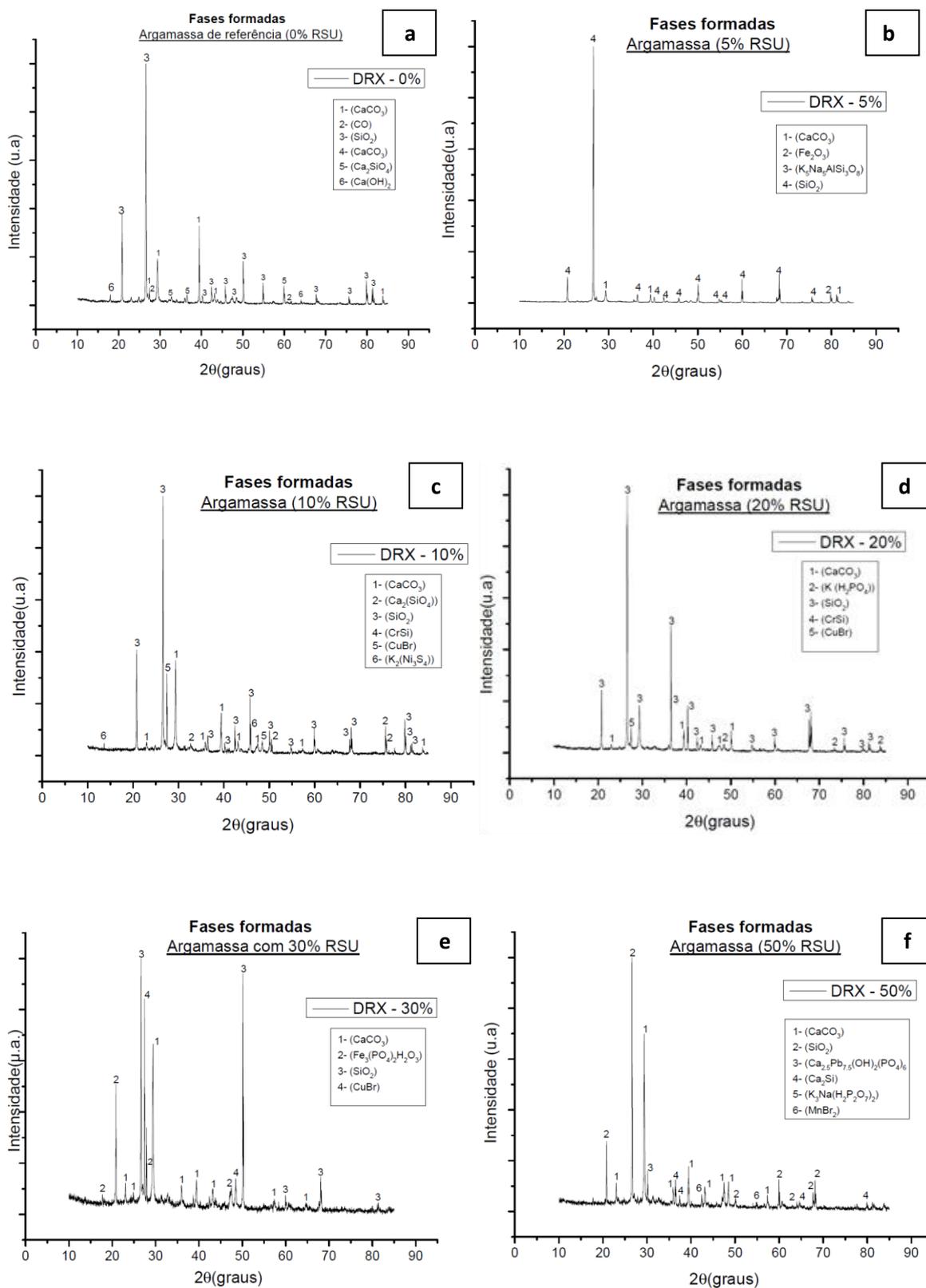
A argamassa com 20% de biochar indicou a existência do Fosfato de hidrogênio potássico ($\text{K(H}_2\text{PO}_4)$).

Para um teor de 30% de biochar formou-se um Hidrato de fosfato de ferro ($\text{Fe}_3\text{H}_6\text{O}_{11}\text{P}_2$).

Com o máximo teor analisado pelo estudo, 50%, o Brometo de Manganês (MnBr_2) e o Fosfato de hidrogênio de Sódio Potássico ($\text{Ca}_{2.5}\text{H}_2\text{O}_{26}\text{P}_6\text{Pb}_{7.5}$) foram detectados.

Supõe-se que, juntamente com as características mecânicas das biochar, com destaque para a alta porosidade, esses compostos interferiram na formação dos silicatos responsáveis pela resistência do cimento, resultando em redução abrupta de resistência a medida que se acrescentavam o biochar.

Figura 19 – Difratomogramas da argamassa endurecida com a adição dos diversos teores de biochar - a. 0%, b. 5%, c. 10%, d. 20%, e.30%, f. 50%.



Fonte: Dados da pesquisa, 2019.

6.3.3.2 Difração de Raios-X do Biochar de RSU.

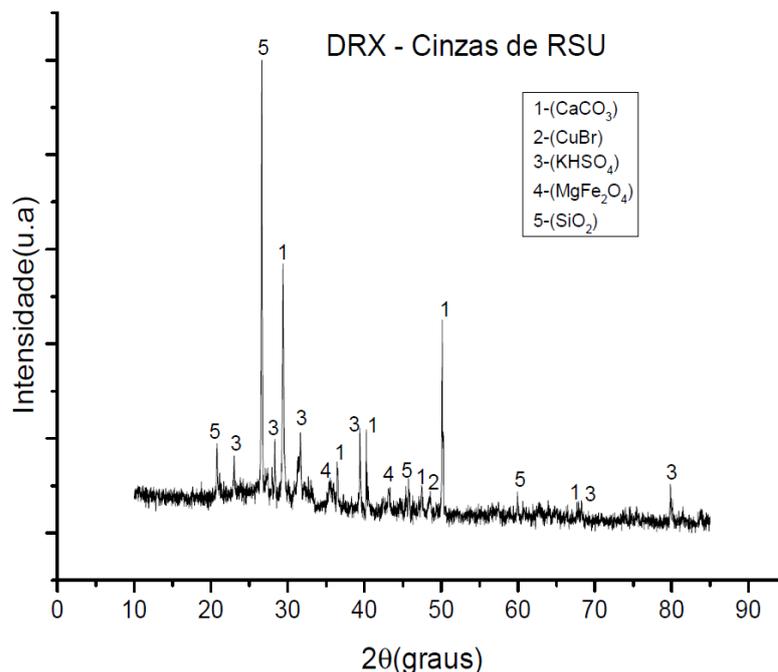
O resultado da análise do biochar de RSU por meio da difração de raios-x seguiu os mesmos parâmetros do ensaio realizado para as argamassas e está apresentado na Figura 19. Os principais compostos detectados nos ensaios são o Carbonato de Cálcio (CaCO_3), o Brometo de Cobre (CuBr), o Sulfato de Hidrogênio de Potássio (KHSO_4), o Óxido de Ferro de Magnésio (MgFe_2O_4) e o Óxido de Silício (SiO_2).

A presença de compostos tão distintos, tanto nas análises das argamassas com os diversos teores de biochar, como na análise do biochar de RSU conforme foi coletada, indica a complexidade e heterogeneidade do material estudado. Considerando que a origem do biochar é o resíduo sólido urbano coletado e gaseificado em data incerta e sem uma análise gravimétrica adequada, torna-se quase impossível conhecer que tipo de resíduo deu origem aos compostos e elementos químicos encontrados nas amostras analisadas.

Segundo Seo et al, (2018), o resíduo sólido municipal bruto não é apropriado para o processo de gaseificação, sendo geralmente é necessária uma separação incluindo a homogeneização mecânica e a separação de vidro, metais e materiais inertes. Importante salientar que a precisão do equipamento utilizado, pode detectar espectros de compostos em teores superiores a 3% da área da amostra analisada.

Com base nos resultados do DRX do biochar de RSU, é provável que as fases encontradas nas amostras de argamassa no estado endurecido, com os mais variados teores de biochar, se formaram durante a hidratação ou cura da mistura, que se supõe, sofreu alguma interferência deletéria dos compostos existentes no biochar.

Figura 20 – Difratoograma do biochar de RSU.



Fonte: Dados da pesquisa, 2019.

6.4 Corpos de prova – Moldagem e Cura.

Atendendo aos critérios estabelecidos pela norma NBR 7215, foram moldados corpos de prova cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Devido à quantidade limitada de material disponível (biochar de RSU), os CP's foram moldados apenas para as idades de 14 e 28 dias.

Dessa forma, foram moldados 6 corpos de prova para cada traço, exceto para os traços com teores de biochar com 5% e 10%, onde apenas 4 foram moldados devido ao pouco biochar de RSU.

Os CP's com teores de 5 e 10% de biochar foram moldados e rompidos após o rompimento dos CP's com teores superiores (20%, 30% e 50%).

Inicialmente a expectativa era que o biochar pudesse melhorar significativamente a resistência das amostras. Sendo assim, buscou-se o determinar o máximo teor possível que poderia ser utilizado. Como os primeiros resultados mostraram que isso não ocorreu, procurou-se determinar o menor teor de biochar que poderia ser utilizado sem grande prejuízo a resistência.

Após a moldagem, os CP's foram submetidos à cura inicial em ambiente úmido por 24 horas e em seguida desmoldados e submersos em água saturada com cal até o momento do seu rompimento.

Figura 21 - CP's durante a moldagem e após a desmoldagem.



Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

Após a desmoldagem, percebeu-se que o corpo de prova apresentava um aspecto escurecido e ferruginoso.

6.4.1 Resistência mecânica

Sobre a resistência mecânica do cimento, é explicado por Lima e Iwakiri (2014) ser esta capacidade, a possibilidade de o concreto resistir às diversas condições de carregamento a que está sujeito. A resistência mecânica do cimento é a propriedade caracterizadora da resistência à compressão.

A análise da resistência mecânica do cimento é de grande relevância, pois, dentre outros fatores, pelo fato de o concreto ser um dos materiais mais usado em vários segmentos da economia e se faz presente e necessário nas mais diferentes estruturas. É por meio da resistência mecânica que se torna possível medir a resistência potencial de fato do concreto para verificar qual o carregamento a ser aplicado em determinada estrutura.

O rompimento dos CP's foi realizado de acordo com as idades de 14 e 28 e foi realizado no Laboratório de Concreto e Agregados do Instituto Federal do Sul de Minas, Campus Pouso Alegre, Brasil. Na Tabela 14 é possível observar a resistência

à compressão obtida após o rompimento dos CP's com os diferentes teores de biochar de RSU.

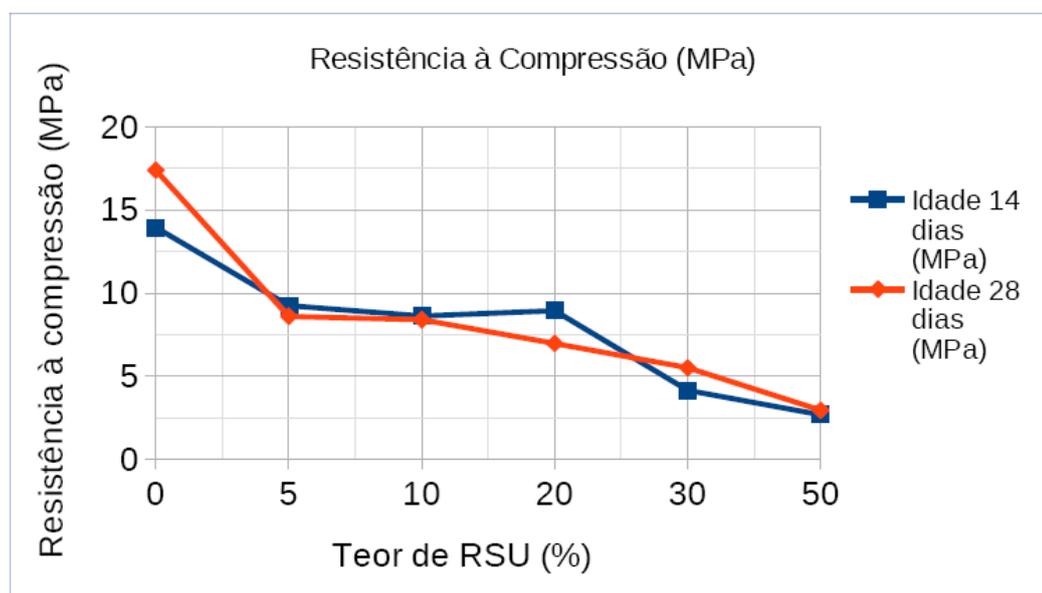
Tabela 14 - Resistência à compressão.

Teor de Biochar (%)	IDADE	
	14 dias (Mpa)	28 dias (Mpa)
0	13,95	17,4
5	9,24	8,59
10	8,62	8,39
20	8,93	6,97
30	4,15	5,50
50	2,68	2,95

Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

A Figura 22 mostra a variação da resistência à compressão em função do teor de biochar nos traços e da idade do rompimento.

Figura 22 - Resistência à compressão. (Mpa).



Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

Analisando-se o gráfico da Figura 21, se verifica uma tendência de redução da resistência mecânica, mesmo para baixos teores de biochar adicionados a mistura. Com o acréscimo de apenas 5% de biochar de RSU, a redução na resistência foi de aproximadamente 51% aos 28 dias.

Com a adição de 50%, máximo teor analisado pelo estudo, a queda na resistência chegou próximo dos 83% em relação à amostra padrão (sem adição de biochar de RSU).

Supõe-se que a diminuição abrupta da resistência se deve às características extrínsecas desse tipo de agregado (Biochar de RSU), como a intemperização física e química e a morfologia lamelar indesejável que causa fragilidade na mistura, favorecendo ainda a porosidade da argamassa.

A análise microscópica do biochar (MEV-EDS) permitiu observar nitidamente características intrínsecas do material, como a heterogeneidade de formas e a estrutura porosa indesejável nos pontos analisados. Jung *et al.* (2019) em sua pesquisa com o uso de material semelhante (Biochar de RSU), e utilizando a microscopia eletrônica de varredura – EDS, também verificou que as imagens obtidas da morfologia da superfície possuíam poros suaves e claramente visíveis.

Hartmann *et al.* (2015), avaliou seis diferentes misturas de argamassa com a adição da cinza volante do incinerador de resíduos sólidos urbanos. Segundo o autor, o nível máximo adicionado às misturas estudadas foi de 25% de cinzas volantes de incineração, a fim de preservar as propriedades de resistência à compressão das amostras.

7 CONCLUSÕES

Por meio da realização deste estudo, foi possível observar a existência de algumas alternativas voltadas para a reutilização e reciclagem de materiais oriundos de resíduos sólidos urbanos. Reutilizar resíduos sólidos urbanos tem sido uma alternativa possível e necessária pelo fato de contribuir na redução ou eliminação dos impactos ambientais causados por eles, ao meio ambiente. Dentre tais formas de reutilização, têm-se as usinas de gaseificação.

Dentre as formas de reaproveitamento de RSU, pode-se apontar, inicialmente, que os agregados para argamassas e concretos são um importante material que pode ser produzido a partir do RSU e, desta forma, além de contribuir no segmento da construção civil, ampliam os esforços para preservação do meio ambiente.

É importante lembrar que o agregado miúdo que pode ser produzido a partir da gaseificação de RSU para ser adicionado nas argamassas/concretos, demanda menor custo de capital, e é de fácil transporte, sendo que, por esses e outros fatores, a reciclagem e reutilização desse agregado deve ser realizada, beneficiando toda a sociedade com a substituição de matérias primas normalmente usadas em concreto e argamassas que antes, deveriam ser retiradas da natureza. Sendo assim, o seu uso em concretos e argamassas apresenta significativo potencial no mercado.

Quanto à pesquisa prática, as experiências realizadas permitiram evidenciar que, o biochar de RSU apresentou um efeito deletério na resistência mecânica do cimento, e ainda, após a análise das suas propriedades químicas e morfológicas, é possível seu uso apenas para concretos e argamassas não armadas e não estruturais em teores não superiores em 5% do total de agregado miúdo da mistura.

Durante os ensaios realizados, foi perceptível a dificuldade de manipulação da mistura, com prejuízo para a trabalhabilidade das amostras no estado fresco.

Na aplicação no setor da construção civil, são exemplos de aplicações do concreto ou argamassa não estruturais: lastro/nivelamento para fundações, brocas de baixa capacidade de carga, estacas não armadas, passeios, revestimentos e uma infinidade de outras utilizações, sempre tomando os devidos cuidados na manipulação do produto.

O uso do biochar também gera economia de energia e benefícios ambientais como redução da emissão de gases do efeito estufa e redução da extração da areia normalmente utilizada em argamassas/concretos.

Nos testes químicos, verificou-se que o biochar apresenta metais e compostos em sua composição que são tóxicos ao ser humano e podem gerar passivos ambientais se não forem devidamente manipulados. Supõe-se ainda que esses elementos/compostos prejudicaram a hidratação e resistência das amostras analisadas. A porosidade do agregado estudado (biochar de RSU) também foi claramente observada nas imagens microscópicas.

Com isso, os frutos dessa pesquisa almejam trazer além dos benefícios econômicos, ganhos ambientais com reutilização/reaproveitamento e o destino correto do biochar resultantes da gaseificação de resíduos sólidos urbanos.

7.1 Recomendações para trabalhos futuros

Como recomendação para outros trabalhos pode-se indicar:

- a) Ensaio mecânico do concreto com o uso do biochar na sua confecção devido a presença do agregado graúdo na mistura;
- b) Testes de resistência mecânica com o uso de outros tipos de cimento, como o CP III, CP IV e CP V considerando as diferentes características e propriedades dos diversos tipos de cimento;
- c) Utilização do biochar com granulometria reduzida, pois algumas frações utilizadas no presente estudo extrapolaram os limites da zona utilizável da NBR 7214;
- d) Utilização do biochar com pré-lavagem e posterior análise do material para avaliar os efeitos na resistência do biochar livre de metais.
- e) Caracterização preliminar do biochar, com respectivo estudo gravimétrico e segregação dos resíduos não interessantes ao estudo;
- f) Utilização do biochar de RSU na produção de asfalto, devido à grande demanda por esse produto que geralmente é produzido em usinas que estão próximas das cidades que são as geradoras de RSU;

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, Abrelpe – Panamorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, (2017), Disponível em www.abcp.org.br acesso em Novembro de 2017.

Associação Brasileira de Cimento Portland, ABCP – Panamorama do coprocessamento, (2017), Disponível em www.abcp.org.br acesso em janeiro de 2019.

ALENCAR, R; HELENE, P. Concreto auto-adensável de elevada resistência – inovação tecnológica na indústria de pré-fabricados. **Revista de Materiais do Ibracon**, v. 1, n. 1, São Paulo, 2006.

ALBUQUERQUE, Rayse Thaynare Oliveira; LIMA, Nelson Luiz de Andrade. Adições minerais ao concreto: melhores propriedades, maior economia e mais sustentabilidade. **Revista Interdisciplinar da Universidade Veiga de Almeida**, v. 1, n. 1, Julho/Dezembro, p. 56-59, 2014.

ALMEIDA, Jacinto Manuel Antunes de.; SILVA, Bruno do Vale. Influência da utilização de procedimentos não padronizados de ensaio para a determinação experimental da resistência à compressão simples e do módulo estático de elasticidade do cimento Portland. **Revista Matéria da Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, p.466-479, 2015.

ALMEIDA, Luiz Carlos de. **Concreto**. Notas de aula. Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Civil, campinas, 2002.

ALTENER. The future for biomass pyrolysis and gasification: status, opportunities and policies for Europe, Coord. A.V.Bridgwater, Aston University, November 2002. Downloaded from: http://ec.europa.eu/energy/res/publications/doc1/report_p536_v2.pdf.

ALVES, Rodrigo Luiz de Moraes. **Concreto produzido com resíduos de pavimento asfáltico**. 2017. 18f. Artigo (Curso de Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

ARAGÃO, M. **Seção de Ensino de Engenharia de Fortificação e Construção: Materiais de Construção II**. Apostila de aula, IME, Instituto Militar Exercito, 2012.

ARTIOLI, G. et al. X-ray diffraction microtomography (XRD-CT), a novel tool for non-invasive mapping of phase development in cement materials. **Analytical and Bioanalytical Chemistry**, v. 397, n. 6, p. 2131–2136, 2010.

ASTM. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use. **Annual Book of ASTM Standards**, n. C, p. 3–6, 2010.

ASTM INTERNATIONAL. Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. **Annual Book of ASTM Standards**, n. C, p. 1–15, 2017.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT - NBR 10004 - Resíduos Sólidos - Classificação, Rio de Janeiro, RJ, 2004a;

BARROS, R. M. et al. A potential of the biogas generating and energy recovering from municipal solid waste. *Renewable Energy Focus*, v. 25, n. June, p. 4–16, 2018.

BELATO, Mariana Natale. **Análise da geração de poluentes na produção de Cimento Portland com o coprocessamento de resíduos industriais**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

BRASIL (2010a), Lei Federal nº 12305 de 02 de agosto de 2010, regulamentada pelo Decreto nº 7404 de 23 de dezembro de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 03 de agosto de 2010.

BRASILEIRO, L.L; MATOS, J.M.E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Revista Cerâmica**, v. 6, n. 1, p. 178-181, 2015.

CASTRO, A.L; LIBORIO, J.B.L; PANDOLFELLI, V.C. Reologia de concretos de alto desempenho aplicados na construção civil – Revisão. **Revista Cerâmica**, v. 57, n.1, p. 63-75, 2011.

CAVALARO, S.H.P.; CARBONARI, G. Avaliação da viabilidade econômica da utilização de concreto de alto desempenho e lajes planas protendidas em edifício residencial: estudo de caso. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, Londrina, v. 27, n.1, p. 39-56, jan./jun. 2006.

CAVALCANTI, Diogo Jatobá de Holanda. **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto autoadensável visando sua aplicação em elementos estruturais**. 2006. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Alagoas, 2006.

CEBDS. Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável. Circular No Brasil : p. 1–31, 2017.

CINCOTTO, M. A. Reações de hidratação e pozolânicas. In: Geraldo Isaia. (Org.). *Concreto: Ciência e Tecnologia*. 1. ed. São Paulo: Ibracon, p. 381-p.412., 2011.

CHA, Jin Sun; et al. Production and utilization of biochar: A review. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 40, p. 1-15, 2016.

CUNHA, Claudio Barbieri da; CORTES, Clicia Soriano. Sistema de apoio à decisão baseado em planilha eletrônica para otimização da programação de entrega de concreto pronto. **J. Transp. Lit.**, Manaus, v. 8, n. 1, p. 125-158, jan. 2014.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições minerais para concreto estrutural**. São Paulo: IBRACON, 2005.

DAROS, Bruna. **Estudo e desenvolvimento de concreto autoadensável com metacaulinita**. 2009. 79f. Monografia (Curso de Engenharia Civil) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2009.

Dogru , M.; Howarth , C. R.; Akay , G.; Keskinler , B.; Malik A. A. Gasification of hazelnut shells in a downdraft gasifier. *Energy*, vol. 27, p. 415-427, 2002.

FRANCO JR., J. D. O. et al. Comparative study of analytical methods for iron and titanium determination in Portland cement. *Quimica Nova*, v. 24, n. 2, p. 195–199, 2001.

FROTTE, Camila *et al* . Estudo das propriedades físicas e mecânicas de concreto com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado proveniente de RCD. **Matéria (Rio J.)**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 2, 2017.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projeto de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2012.

GOMES, Paulo César Correia; *et al*. Obtenção de concreto leve utilizando agregados reciclados. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 15, n. 3, p. 31-46, jul./set. 2015.

GRILLO, Rodolfo Henrique Freitas. **Estudo da influência de aditivos redutores de água em concretos da construção civil**. Poços de Caldas, 2014.

HAWLITSCHKEK, G. Caracterização das propriedades de agregados miúdos reciclados e a influência no comportamento reológico de argamassas / Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo. ed. rev. -- São Paulo, 2014. 166 p.

HENRIQUES, R. M. et al (2009). Potencial para geração de energia elétrica no brasil com resíduos de biomassa através da gaseificação, 207 p. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2009. Coppe/ufrrj.

HOLLER, F. James. Princípios de análise instrumental. 6 ed. Porto Alegre. Bookman, 2009.

JUNG, H. et al. Characterization and adsorption performance evaluation of waste char by-product from industrial gasification of solid refuse fuel from municipal solid waste. *Waste Management*, v. 91, p. 33–41, 2019.

KUDO, E. K.; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G. Evaluation of adhesive mortars by rotational rheometry. *Ambiente Construído*, v. 13, n. 2, p. 125–137, 2013.

KUMAR, M. P. . M. P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2014.

LEITE, M.B., MOLIN, D.D., Avaliação da atividade pozolânica do material cerâmico presente no agregado reciclado de resíduo de C&D. **Sitientibus**, Feira de Santa, n. 26, pp. 111-130, 2002.

LIMA, Adauto José Miranda de; IWAKIRI, Setsuo. Utilização de resíduos da madeira de pinus SPP, como substituição ao agregado miúdo na produção de blocos de concreto para alvenaria estrutural. **Ciênc. Florest.**, Santa Maria, v. 24, n. 1, p. 223-235, mar. 2014.

LIMA, S.A.; ROSSIGNOLO, J.A.. Análise da pozolanicidade da cinza da casca da castanha do caju pelo método de difratometria de raios X. **Matéria (Rio J.)**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 1, p. 680-688, Apr. 2009.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 3): gasification technologies. **Bioresource Technology**, v. 83, n. 1, p. 55–63, 2002.

MINAS GERAIS (2009a), Lei Estadual nº 18031 de 12 de janeiro de 2009. Dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos, Belo Horizonte, MG, 10 de janeiro de 2009.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON, 2014.

MELLO, K. A. **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de fíler calcário**. 2005. 171f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

NBR NM 52 - Agregado Miúdo, Determinação da Massa Específica e Massa Específica Aparente, Rio de Janeiro, 2009.

NBR NM 53 - Agregado Graúdo, Determinação da Massa Específica, Massa Específica Aparente e absorção de água, Rio de Janeiro, 2009.

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 7211 - Agregados para concreto - Especificação, Rio de Janeiro, 2005.

NBR 7215 –Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão, Rio de Janeiro, RJ, 1996.

NBR 7214 – Areia normal para ensaio de cimento - Especificação Rio de Janeiro, RJ, 2015.

NBR NM 26 – Agregados - Amostragem, Rio de Janeiro, RJ, 2001.

NBR NM 27 - Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório, Rio de Janeiro, RJ, 2001.

NBR 11.768 – Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Requisitos, Rio de Janeiro, RJ, 2011.

NBR 15.116 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos, Rio de Janeiro, RJ, 2004.

NETO, R. V. Geração Elétrica Distribuída com Base na Biomassa de Tucumã Geração Elétrica Distribuída com Base na Biomassa de Tucumã. 2011.

OHBUCHI, A.; KONYA, T.; FUJINAWA, G. Improved bench-Top X-ray diffractometer for crystalline phase analysis of cement. *Powder Diffraction*, v. 28, n. 4, p. 233–237, 2013.

OLLIVIER, Jean-Pierre ; VICHOT, Angélique (Org.). **Durabilidade do Concreto:** bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. São Paulo: IBRACON, 2014.

PALIGA, C. M.; REAL, M. V.; CAMPOS FILHO, A.. Análise numérica de vigas de concreto armado reforçadas por compósitos formados por fibras de alta resistência e argamassa de cimento. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.**, São Paulo, v. 6, n. 2, p. 211-226, abr. 2013.

PASQUALE, Claudio de; et al. Fast field cycling NMR relaxometry characterization of biochars obtained from an industrial thermochemical process. **J Soils Sediments**, v. 12, p. 1211–1221, 2012.

PEREIRA, Adriana Maria *et al* . Estudo das propriedades mecânicas do concreto com adição de cinza de casca de arroz. **Matéria (Rio J.)**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 1, p. 227-238, mar. 2015.

PEREIRA, E; MEDEIROS, M.H.F de. Ensaio de “Pull Off” para avaliar a resistência à compressão do concreto: uma alternativa aos ensaios normalizados no Brasil. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 5, n. 6, 2012.

PETER, M. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, v. 83, n. July 2001, p. 37–46, 2002.

PRISZKULNIK, Simão. **Inspeção e diagnóstico de estruturas de concreto afetadas pelas reações cimento-agregado**. São Paulo: IBRACON, 2005.

QIAN, Kezhen; et al. Recent advances in utilization of biochar. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 1055–1064, 2015.

RAIZA, S.; MATOS, C.; GUIMARÃES, C. C. UTILIZAÇÃO DA CINZA DA CASCA DO COCO VERDE COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND EM ARGAMASSAS Use of gray bark of green coconut as replacement partial cement Portland in mortar . v. 13, p. 251–269, 2017.

RESOLUÇÃO CONAMA n. 316, de 2002. Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. - Data da legislação: 29/10/2002 - Publicação DOU nº 224, de 20/11/2002, págs. 92-95 Status: Alterada pela Resolução nº 386, de 2006.

RESOLUÇÃO CONAMA n. 264, de 1999. Licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de co-processamento de resíduos - Data da legislação: 26/08/1999 - Publicação DOU nº 054, de 20/03/2000, págs. 80-83

RODRIGUES, Clarissa Ribeiro de Sá; FUCALE, Stela. Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil. **Ambient. constr.**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 99-111, mar. 2014.

RODRIGUES, Edmilson Correia. **Concreto fresco e suas propriedades.** 2005. 6f. Artigo (Curso de Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte.

RODRIGUES, Klinger Jucier Targino. **Concreto com resíduo de borracha e brita granítica.** 2013. 55. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil) - Departamento de Ambientais e Tecnológicas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró.

ROMANO, Roberto Cesar de Oliveira; CINCOTTO, Maria Alba; PILEGGI, Rafael Giuliano. Incorporação de ar em materiais cimentícios: uma nova abordagem para o desenvolvimento de argamassas de revestimento. **Ambient. constr.**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 289-308, abr. 2018.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 3): gasification technologies. **Bioresource Technology**, v. 83, n. 1, p. 55–63, 2002.

SALES, Angela Teresa Costa; ALFERES FILHO, Ricardo dos Santos. Efeito do pó de resíduo cerâmico como adição ativa para o concreto. **Ambient. constr.**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 113-125, mar. 2014.

SANTOS, Leandro Bruno. Ascensão das multilatinas cimenteiras na economia global. **Mercator**, Fortaleza, v. 14, n. 3, p. 45-60, dez. 2015.

SEFFF, L.; HOTZA, D.; REPETTE, W.L.. Comportamento reológico de pastas de cimento com adição de sílica ativa, nanossílica e dispersante policarboxílico. **Matéria (Rio J.)**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 1, p. 12-20, 2010.

SEO, Y.-C.; ALAM, M. T.; YANG, W.-S. Gasification of Municipal Solid Waste. Gasification for Low-grade Feedstock, 2018.

SILVA, E. et al. Gaseificação e pirólise para conversão da biomassa em eletricidade e biocombustíveis. Biocombustíveis - Volume 1, n. January, p. 412-498, 2012.

SILVA, Francisco Gabriel Santos; ANDRADE, Heloysa Martins Carvalho; GONCALVES, Jardel Pereira. Estudo do comportamento reológico de pastas de cimento contendo resíduo catalítico de petróleo por squeeze-flow e reometria rotacional. **Ambient. constr.**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 343-363, abr. 2018.

ULHOA, M.B. **Conqueificação em baterias de fornos horizontais.** São Paulo: ABM, 2005.

Mineral Commodity Summaries 2019. U.S. Geological Survey, 2019, Mineral commodity summaries 2019: U.S. Geological Survey, 200 p., <https://doi.org/10.3133/70202434>. Disponível em www.usgs.gov. Acesso em Março de 2019.

VERZEGNASSI, Emerson. **Estudo das propriedades no estado fresco e endurecido do concreto leve autoadensável**. 2015. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) - Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas, Limeira.

WESTPHAL, T. et al. Using exploratory factor analysis to examine consecutive in-situ X-ray diffraction measurements. **Powder Diffraction**, v. 30, n. 04, p. 340–348, 2015.

YAZIGI, Walid. *A Técnica de Edificar*. São Paulo: Pini 2007.

YAKUBU, Y. et al. Potential industrial utilization of pre-treated municipal solid waste incineration fly ash. *Waste Management and Research*, v. 36, n. 7, p. 635–644, 2018.