

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE FORMIGA – UNIFOR - MG
CURSO DE BACHARELADO DE ENGENHARIA CIVIL
BRUNA LORENA ALVARENGA BARBOSA

**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS DO CONCRETO FABRICADO
COM ADIÇÃO DE CINZAS DE BAGAÇO PROVENIENTE DO PROCESSAMENTO
DE CANA - DE - AÇÚCAR**

FORMIGA- MG

2018

BRUNA LORENA ALVARENGA BARBOSA

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS DO CONCRETO FABRICADO COM
ADIÇÃO DE CINZAS DE BAGAÇO PROVENIENTE DO PROCESSAMENTO DE
CANA - DE - AÇÚCAR

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil do UNIFOR-MG,
como requisito para a obtenção do título de
bacharel em Engenharia Civil.

Orientador (a): Prof. Rosiene Gonzaga de
Jesus Pimenta.

FORMIGA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca UNIFOR-MG

B238 Barbosa, Bruna Lorena Alvarenga.
Características físicas e mecânicas do concreto fabricado com adição
de cinzas de bagaço proveniente do processamento de cana - de - açúcar /
Bruna Lorena Alvarenga Barbosa. – 2018.
52 f.

Orientadora: Rosiene Gonzaga de Jesus Pimenta.
Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Centro
Universitário de Formiga - UNIFOR, Formiga, 2018.

1. Construção Civil. 2. Resíduos Agrícolas. 3. Adição Mineral. I. Título.

CDD 628.44

Catalogação elaborada na fonte pela bibliotecária
Regina Célia Reis Ribeiro – CRB 6-1362

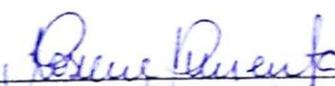
Bruna Lorena Alvarenga Barbosa

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS DO CONCRETO FABRICADO COM
ADIÇÃO DE CINZAS DE BAGAÇO PROVENIENTE DO PROCESSAMENTO DE
CANA - DE - AÇÚCAR

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil do UNIFOR-MG,
como requisito parcial para obtenção do título
de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Rosiene Gonzaga de Jesus Pimenta

BANCA EXAMINADORA



Prof. Rosiene Gonzaga de Jesus Pimenta

Orientador (a)



Prof. Dr. Michael Silveira Thebaldi
UFLA



Bruno César Comitante Leão
Engenheiro Civil

Formiga, 7 de novembro de 2018

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por permitir que eu chegasse até aqui, sou imensamente grata por tantas bênçãos alcançadas, pela oportunidade de estar concluindo o objetivo que almejei a cinco anos e pela família maravilhosa que Ele me concedeu.

Gostaria de agradecer aos meus pais, Francisco e Sandra, e ao meu irmão Breno, por todas as abdições necessárias, e por tantas vezes compreenderem minhas ausências, meus temores e por sonharem comigo, este sonho, sem vocês nada disso seria possível!

Ao meu namorado por me acompanhar nesse percurso, participando e apoiando em todos os momentos.

Aos familiares e amigos que de alguma forma contribuíram e me incentivaram a prosseguir.

Aos professores, por repassarem os seus conhecimentos e se empenharem em formar profissionais qualificados. Em especial, gostaria de agradecer aos meus orientadores, Michael Silveira Thebaldi, que iniciou com muito apreço e dedicação a elaboração desta pesquisa e a Rosiene Gonzaga de Jesus Pimenta que posteriormente empenhou-se para que fosse possível finalizarmos.

RESUMO

Devido ao crescimento populacional e a elevada demanda de consumo, tornam-se cada vez mais necessárias medidas sustentáveis, que gerem menor impacto ambiental e visem a redução da utilização de recursos naturais e do acúmulo de resíduos depositados ao meio ambiente, a fim de garantir uma maior estabilidade para o futuro. Assim, diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade técnica do aproveitamento da cinza de bagaço de cana-de-açúcar, resíduo sólido proveniente da indústria sucroalcooleira, de modo a utilizá-la como adição mineral ao concreto, atuando na substituição parcial do cimento Portland, para, posteriormente, avaliar a consistência, massa específica e resistência à compressão do concreto com diferentes porcentagens de adições. Por meio da realização do ensaio de resistência à compressão, os corpos de prova cilíndricos de concreto que possuíam substituição de 10, 20 e 30% de cimento por cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (CBC), foram rompidos ao completarem 28 dias. Desta forma, pôde-se verificar o abatimento de 40 mm ocasionado pela redução da consistência do concreto a medida em que a substituição de CBC aumentava, ocasionando um concreto com mais trabalhabilidade. Já a massa específica, não apresentou resultados com grandes variações em relação ao concreto convencional, ao contrário da resistência aos 28 dias, que variou significativamente, diferenciando-se em cerca de 9,42 MPa do traço padrão. Desta forma, a utilização de CBC em substituição parcial do concreto Portland é indicada em porcentagem de substituição de até 10% e para fins não estruturais, obtendo-se desta forma um concreto alternativo, ocasionando a destinação correta do resíduo gerado em grande escala no país e minimização do impacto ambiental provocados pela construção civil, além de propiciar vantagens econômicas na produção do concreto.

Palavras-chave: Construção Civil, Resíduos Agrícolas, Adição Mineral.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Ensaio de abatimento do tronco de cone (<i>slump – test</i>).....	27
Figura 2 - Curva de Gauss para resistência do concreto à compressão	29
Figura 3- Morfologia das partículas de CBC.....	34
Figura 4- Realização do teste de abatimento do tronco de cone (Slump Test).....	38

LISTA DE GRÁFICO

Gráfico 1 - Abatimento do tronco de cone alcançado pelo concreto com diferentes traços em razão das diferentes porcentagens de CBC adicionadas em substituição parcial ao concreto Portland.....	41
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de cimentos comercializados no Brasil	18
Tabela 2 - Material aplicado em cada traço de concreto com diferentes porcentagens de CBC.	37
Tabela 3- Resumo da ANOVA para resistência à compressão e massa específica úmida de concretos fabricados com diferentes porcentagens de substituição cimento Portland por CBC	42
Tabela 4- Resumo da ANOVA para a média de resistência a compressão.	42
Tabela 5- Resumo da ANOVA para a média da massa específica	43
Tabela 6- Resultados da Atividade Pozolânica.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABCP- Associação Brasileira de Cimento Portland

A/C- Relação água cimento

Al_2O_3 - Óxido de alumínio

°C- Graus Celsius

Ca- Cálcio

$Ca.2H_2O$ - Sulfato de cálcio hidratado

$CaCO_3$ - Carbonato de cálcio

CaO- Óxido de cálcio

$Ca(OH)_2$ - Hidróxido de cálcio

$CaSO_4$ - Sulfato de cálcio

$C_6AS_3H_{32}$ - Etringita

$CaSO_4.1/2H_2O$ - Hemi-hidratado ou bassanita

$CaSO_4.2H_2O$ - Gipsita

CBC- Cinza de bagaço de cana-de-açúcar

CM- Centímetro

CP- Cimento Portland

CO_2 - Dióxido de carbônico

DM- Decímetro

Fck- Resistência característica à compressão

Fe_2O_3 - Óxido de ferro

H_4SiO_4 - Ácido monossílico

IAP- Índice de atividade pozolânica

KG- Quilogramas

L- Litros

M^3 - Metro cúbico

MM- Milímetro

MPa- Mega Pascal

NBR- Norma Brasileira Regulamentadora

NM- Número

PPM- Partes por milhão

PVC- Policloreto de Polivinila

Si- Silício

SiO₂- Dióxido de silício

μm- Micrometro

2CaO.SiO₂- Silicatos dicálcico

3CaO.Al₂O₃- Aluminatos tricálcico

4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃- Ferroaluminato tetracálcico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS.....	14
2.1	OBJETIVO GERAL	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3	JUSTIFICATIVA.....	15
4	REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
4.1	CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND	16
4.1.1	Elementos constituintes do concreto.....	17
4.1.2	Reações de formação.....	19
4.1.3	Aditivos.....	21
4.1.4	Adições	22
4.1.5	Reação pozolânica	24
4.1.6	Propriedades do concreto fresco e endurecido	26
4.2	USO DE RESÍDUOS NA FABRICAÇÃO DE CONCRETO	31
4.2.1	Cinzas do bagaço de cana-de-açúcar.....	32
4.2.2	Formação e composição química	33
4.2.3	Interação na matriz cimentícia	35
5	MATERIAL E MÉTODOS.....	36
5.1	SLUMP TEST.....	37
5.2	CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	38
5.3	DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA	39
5.4	DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS CORPOS DE PROVA	39
5.5	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	40
5.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA	40
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
7	CONCLUSÕES	45
	REFERÊNCIAS.....	46

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil é imprescindível para o crescimento do país, gerando a infraestrutura necessária a população e a movimentação da economia, produzindo rendas e empregos. Entretanto, devido à grande demanda proveniente do aumento populacional, a utilização dos recursos naturais tornou-se indiscriminada, fazendo-se necessário a busca por métodos voltados para a aplicação racional das matérias-primas e medidas sustentáveis.

Assim, países em desenvolvimento objetivam cada vez mais a utilização de meios menos degradantes e a preservação de fontes esgotáveis, desenvolvendo análises inclinadas ao reaproveitamento de resíduos sólidos procedentes de outros setores, como o das atividades agropecuárias, que na maioria das vezes é descartado.

Dentre a infinidade de produtos que podem ser reutilizados, devido ao Brasil ser um dos maiores produtores mundiais de cana-de-açúcar, destacam-se as CBC, que possuem uma quantidade significativa de sílica em sua composição, podendo ser utilizada como pozolana. Desta maneira, estes resíduos deixam de ser considerados poluidores, e passam a atuar na preservação ambiental.

Neste contexto e a exemplo de outros estudos já desenvolvidos, como o de Paula (2006) e Silva et al. (2016), pretende-se verificar a viabilidade técnica da substituição parcial do cimento Portland pela CBC na produção de um concreto mais sustentável, de modo que o resultado seja satisfatório em termos de resistência, e ainda atenda ao objetivo de redução da extração de recursos naturais, destinação correta ao resíduo e seja economicamente praticável. Enfim, o estudo pretende analisar os benefícios da CBC na construção civil, avaliando requisitos de suma importância para a sua utilização, como sua consistência por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone, o cálculo para a determinação de sua massa específica e a realização do ensaio de compressão axial, onde o corpo de prova receberá cargas, até a sua ruptura, para determinação da sua resistência a compressão.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a viabilidade técnica do uso de cinza de bagaço de cana-de-açúcar como aditivo mineral na produção de concreto de cimento Portland.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o efeito da adição da CBC em substituição ao cimento nos teores de 10%, 20% e 30% no concreto de cimento Portland, por meio do Ensaio de Consistência (Slump Test), e cálculo para determinação da Massa Específica.
- Analisar o comportamento do concreto com a adição da CBC em substituição ao cimento nos teores de 10%, 20% e 30%, por meio do Ensaio de Resistência à compressão.

3 JUSTIFICATIVA

A construção civil é o setor de atividades humanas que mais utiliza recursos naturais e energia, além de produzir quantidades significativas de resíduos sólidos, contribuindo de uma forma intensa para o agravamento do impacto ambiental.

Dessa maneira, faz-se necessária a adoção de medidas sustentáveis em sua concepção, com o intuito de diminuir os impactos provocados no meio ambiente, se tem cada vez mais práticas que envolvam a produção eficiente e ecologicamente correta.

O emprego dos resíduos na construção civil configura uma redução relevante e otimização do uso de insumos e resíduos gerados, além de representar a preservação ambiental.

Em consequência de tais fatos, é perceptível o aumento de investimento em cogeração de energia por meio da queima do bagaço de cana-de-açúcar no setor sucroalcooleiro, assim sendo possível expandir a lucratividade e reduzir o passivo ambiental, conjunto de obrigações em relação ao meio ambiente diante dos danos causados, dando um fim adequado ao bagaço, que mesmo após já ter utilizado, pode gerar lucros na produção de energia e posteriormente, tem suas cinzas também aproveitadas para outros fins.

Desta forma, a aplicação de CBC como adição mineral proporciona ao resíduo uma destinação correta, evitando acúmulos em aterros ou estocagem em pilhas, uma possível substituição na utilização de matérias-primas não renováveis e a redução da emissão de CO₂, em consequência da redução na utilização e, portanto, a redução da quantidade de cimento produzida.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Concreto de cimento Portland

O concreto de cimento Portland ou concreto simples, teve início de sua utilização registrada em 1845, quando era empregado apenas em áreas de jardinagem e floriculturas para construção de calhas de concreto armado. Devido à pouca aplicabilidade, os estudos em torno das propriedades e especificações do concreto só começaram a partir do século XX, quando pesquisadores se dedicaram a pesquisar suas características e propriedades tanto no estado fresco, quanto no endurecido, além do comportamento reológico. Desde então, o uso do concreto passou a ser difundido na construção de grandes obras (SANTOS, 2009).

De acordo com Pedroso (2009) o concreto é o material mais consumido pelo homem e o segundo elemento mais usado no mundo, ficando atrás apenas da água. Seus principais componentes são o cimento Portland, acrescido de água, areia e brita, podendo ainda ter a presença de aditivos. Quando fresco, é maleável e se adapta a diversas formas e imposições do projetista. É descrito como sendo um material capaz de unir fragmentos minerais entre si, de modo a formar um todo compacto, devido suas propriedades ligantes e coesivas (NEVILLE, 2016).

A proporção dos materiais utilizados é chamada de traço, o qual varia de acordo com a necessidade de resistência, trabalhabilidade e durabilidade necessária para sua aplicação, sendo essas propriedades fundamentais do concreto (RIBEIRO; PINTO; STARLING, 2006).

A qualidade do concreto está diretamente ligada a qualidade dos seus materiais constituintes. Outra condição para se obter um concreto com propriedades satisfatórias, é a partir do proporcionamento adequado, fatores como relação entre cimento e agregado, a separação entre agregados miúdos e graúdos e sobretudo a relação água/cimento devem ser considerados, pois influenciam diretamente na uniformidade, característica imprescindível para qualidade. E já para a homogeneidade, é necessário garantir a mistura íntima entre cimento e a água e a distribuição regular da pasta entre os vazios dos agregados já misturados e somente após este processo, o concreto estará pronto para ser transportado, lançado nas formas e posteriormente adensado (PETRUCCI, 1998).

Abundantemente utilizado, é aplicado nas mais diversas construções, podendo ser encontrado desde projetos residenciais a usinas nucleares. A predominância do concreto em relação aos outros materiais, se dá graças ao fato de este danificar-se menos quando em contato direto com a água, mostrando ser mais resistente, além da facilidade de encontrar suas matérias-primas e mão de obra, sendo ainda o valor de mercado mais atrativo (PEDROSO, 2009).

4.1.1 Elementos constituintes do concreto

A palavra cimento tem sua origem do latim *caementu*, sendo uma pedra natural de rochedos. O início da sua utilização se dá na construção de monumentos no Egito antigo, a partir de uma liga formada por mistura de gesso calcinado e posteriormente em obras de grande porte em Roma, como o Panteão e o Coliseu, aplicando solos provenientes de vulcão e com propriedades de endurecimento sob ação da água (VASCONCELOS; AMARAL; MOURA, 2016).

O grande marco no aprimoramento do cimento ocorreu no ano 1824, quando o pedreiro e construtor inglês Joseph Aspdin experimentalmente expôs conjuntamente ao calor pedras calcárias e argila até a extinção de dióxido de carbono (CO_2) obtendo um pó fino de alta resistência, que não se dissolvia na água e após secagem, possuía dureza próxima a de rochas empregadas nas construções da época. Devido a sua semelhança às rochas da ilha britânica de Portland, o cimento recebeu o mesmo nome da ilha (NEVILLE, 2016).

Segundo o mesmo autor, as matérias-primas para a fabricação do cimento Portland são de fácil acesso e encontradas praticamente em todas as regiões do país. O seu processo de fabricação, constitui-se na moagem dos constituintes, e na queima em fornos rotativos a uma temperatura aproximada de $1450\text{ }^\circ\text{C}$. O material é sinterizado e parcialmente fundido, obtendo assim, o clínquer. De acordo com a Associação de Cimento Portland - ABCP (2002), ainda na fase de moagem são adicionadas outras matérias primas como o gesso, escórias de alto forno, materiais pozolânicos e carbonáticos, fazendo a diferenciação de cada tipo de cimento. O resultado é um pó fino conhecido como cimento Portland.

O cimento é o material mais utilizado para a confecção do concreto, constituído de rocha calcária ou o giz, alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3) e sílica (SiO_2), presente na argila (NEVILLE 2016). Após a moagem do clínquer, produto originado a partir da calcinação do calcário e da argila, são dosados e homogeneizados, queimados e então acrescido gesso (CaSO_4), a fim de retardar as possíveis reações de hidratação entre o cimento e a água.

Este material de cor acinzentada e fino, é considerado um material aglomerante e pulverulento, que se hidrata quando interage com a água. Possui diversas propriedades e características, tais como o aumento de sua resistência com o passar do tempo e a facilidade de ser moldado quando em contato com a água (RIBEIRO; PINTO; STARLING 2006).

No mercado, existem vários tipos de cimento, que se diferenciam de acordo com suas propriedades e pelas adições feitas a ele. Os principais tipos normalizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), (TAB.1):

Tabela 1 - Tipos de cimentos comercializados no Brasil

Tipos de cimento	Adição (% em massa)			ABNT,199 1
	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático	
CP I	Cimento Portland comum		-	
CP I-S	Cimento Portland comum com adições		(1-5)	c
CP II-E	Cimento Portland composto com escória	6-34	-	0-10
CP II-Z	Cimento Portland composto com pozolana	-	6-14	0-10
CP II-F	Cimento Portland composto com fíler	-	-	6-10
CP III	Cimento Portland de alto forno	35-70	-	0-5
CP IV	Cimento Portland pozolânico	-	15-50	0-5
CP V- AR I	Cimento Portland de alta resistência inicial	-	-	0-5

Fonte: A autora (2018).

Os cimentos CP I, CP II e CP III são divididos em três classes, de acordo com sua resistência a compressão ao completar 28 dias (YAZIGI, 2009):

- Classe 25: resistência à compressão de 25 MPa
- Classe 32: resistência à compressão de 32 MPa
- Classe 40: resistência a compressão de 40 MPa

Os agregados, que são considerados parcialmente baratos, não reagem quimicamente com a água. São definidos como materiais de enchimento, inertes, naturais, tais como areia, brita e pedregulhos ou ainda artificiais, quando fragmentados por meio de auxílio artificial, como as escórias. Estudos desenvolvidos por pesquisadores, apontam que à medida em que se eleva a resistência do concreto, os agregados passam a influenciar mais na limitação da resistência à compressão (SILVA, 2006).

Desempenham um papel relevante quando aplicados nos concretos, visto que tanto a forma dos agregados, textura da superfície, granulometria e mineralogia interferem sobre a resistência em vários níveis, atuando nas propriedades da zona de transição. Esta sofre influência direta em relação as mudanças de diâmetro máximo, já que quanto maior for o

aumento do diâmetro, maior será as zonas de transição propensas a serem mais fracas e conter mais microfissuras (GALVÃO, 2003).

A classificação dos grãos, varia de acordo com suas dimensões, sendo considerados agregados miúdos, aqueles que passam pela peneira ABNT 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT 0,075 mm. Já os agregados graúdos, passam pela peneira ABNT 76 mm e ficam retidos na peneira ABNT 4,8 mm (RIBEIRO; PINTO; STARLING, 2006).

Já a água de amassamento, é a intitulação dada a água usada para a produção do concreto, exercendo assim influência sobre toda a vida útil deste. A qualidade do concreto produzido está diretamente relacionada à qualidade da água utilizada para sua fabricação, já que a existência de impurezas influenciará dentre outros, no tempo de pega do cimento, na resistência à compressão do concreto e até mesmo na corrosão da armadura (Silva, 2006).

A água de amassamento não deve ter substâncias orgânicas indesejáveis, ou excesso de constituintes inorgânicos. Em algumas especificações, há uma cláusula que determina o padrão de qualidade da água, exigindo que esta seja potável. Como regra geral, a água conterá menos de 1000 partes por milhão (ppm) de sólidos inorgânicos. Em regiões áridas, onde a água potável local é alcalina, é possível existir algumas exceções quanto ao uso da água para o amassamento do concreto (NEVILLE, 2016).

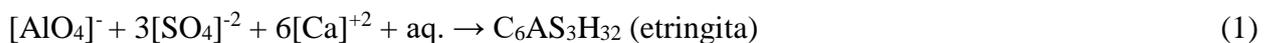
A relação existente entre o peso da água e o peso do cimento em uma proporção de concreto, é conhecida como fator água/cimento (a/c), sendo esta maior influência que o concreto sofrerá ao se associar a água, pois excesso ou falta de água na pasta, estão diretamente ligados a sua resistência. Em caso de excesso de água, após ocorrer toda a hidratação do cimento, a água excedente irá para a parte superior do concreto, formando capilares em seu interior, resultando em uma menor resistência mecânica e um aumento da permeabilidade do concreto. Caso seja usada uma quantidade menor que o necessário, não ocorrerá hidratação de todo o cimento, prejudicando também a sua resistência (MODRO, 2008).

4.1.2 Reações de formação

Como já citado anteriormente, o cimento Portland é um dos principais componentes do concreto, o qual constitui-se de calcário e argila. Devido à presença deste último elemento, sua formação química é composta por silicatos tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) e silicatos dicálcico ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), além de aluminatos tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) e ferroaluminato tetracálcico ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$). Quando em contato com a água, o cimento ocasiona reações que produzem a hidratação destes constituintes, tornando-se um material aglomerante e

promovendo o endurecimento da massa, que passa a oferecer alta resistência mecânica (PETRUCCI, 1998).

No processo de hidratação dos aluminatos, as reações produzidas do $(3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3)$ são instantâneas e liberam uma grande quantidade de calor, promovendo uma pega imediata e o endurecimento precoce, inviabilizando seu uso na construção civil. Para estender o tempo de reação da hidratação do cimento, durante o processo de moagem da massa do clínquer é adicionado sulfato de cálcio hidratado $(\text{Ca}.\text{2H}_2\text{O})$, que regula o tempo de início de pega. Os produtos resultantes dessas reações são as cristalizações, que são como pequenas agulhas prismáticas, chamadas de etringita $(\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32})$ ou alto-sulfato (RIBEIRO JÚNIOR, 2015). O processo de criação dessas agulhas, acontece minutos após a hidratação iniciar, promovendo a pega e o desenvolvimento da resistência inicial do concreto. Após um período de dias, variando conforme a proporção alumina-sulfato presente no cimento, pode ocorrer a instabilidade da etringita, a qual irá se decompor e formar o monossulfato hidratado, tornando a forma mais estável (SILVA, 2005). De acordo com Carvalho (2002) este processo ocorre por causa da diminuição da concentração de sulfatos na pasta, havendo um aumento da quantidade de aluminatos, devido a renovação da hidratação do $(3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3)$ e do $(4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3)$, caracterizando a fase final da hidratação destes compostos. As reações químicas que representam as reações dos aluminatos podem ser expressas da seguinte maneira, por meio da equação 1 e equação 2:



Já na hidratação dos silicatos, ambos os silicatos de cálcio apresentam reações de hidratação semelhantes, diferindo-se apenas na taxa de reação, já que a do $(3\text{CaO}.\text{SiO}_2)$ é superior à do $(2\text{CaO}.\text{SiO}_2)$, exercendo maior influência no processo exotérmico de hidratação e sua fração chegando a compor 50 a 60% dos sólidos presentes no cimento (MEHTA; MONTEIRO). A hidratação dos silicatos ocorre algumas horas depois do início da hidratação do cimento, ocupando os espaços cheios por água e partículas do cimento em dissolução. A reação de hidratação do $(3\text{CaO}.\text{SiO}_2)$ resulta em 61% de $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ e 39% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, já a do $(2\text{CaO}.\text{SiO}_2)$ em 82% de $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ e 18% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Neste processo, para que ocorra a

hidratação dos silicatos, é necessário 24% de água para o $(3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2)$ e 18% para o $(2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2)$. As reações do $(3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2)$ e $(2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2)$ podem ser descritas da seguinte maneira, através da equação 3 e equação 4 (SILVA, 2005):



Ainda segundo Silva (2005), o endurecimento da pasta a princípio é definido pela hidratação dos aluminatos e o desenvolvimento da resistência (enrijecimento) é desempenhado pelos silicatos.

4.1.3 Aditivos

O aditivo mineral é adicionado ao cimento ou a outros aglomerantes

Os aditivos são incorporados ao concreto com a intenção de intensificar a sua eficiência, facilitar seu preparo e uso, mas nunca com a finalidade de correção dos defeitos presentes no concreto, resultantes de dosagens errôneas ou colocação incorreta. Dentre os objetivos para seu uso, os aditivos podem ser utilizados principalmente para aumentar a compacidade, a resistência aos esforços mecânicos, a durabilidade, melhorar a trabalhabilidade, a impermeabilidade, diminuir a retração e retardo ou aceleração da pega (PETRUCCI, 1998).

Os aditivos químicos são produtos incluídos durante a fabricação do concreto, os quais não terão uma adição superior à de 5% em relação a massa cimentícia, com o propósito de alterar suas propriedades, trazendo melhorias para o concreto. Os aditivos químicos se classificam da seguinte maneira de acordo com a NBR 11768 (ABNT, 2011):

- Aditivo redutor de água
 - Plastificante: tem a finalidade de diminuir a quantidade de água presente no concreto quando ainda em estado fresco, sem alterar sua consistência ou alterar a consistência sem alterar a quantidade de água ou ainda, aditivo que desempenha ambos os efeitos conjuntamente.
- Aditivo de alta redução de água

- Superplastificante tipo 1: faz com que haja grande diminuição na quantidade de água, sem alterar a consistência do concreto ou sem alteração da água, mas com grande aumento na fluidez e o abatimento do concreto.
- Aditivo de alta redução de água
 - Superplastificante tipo II: permite uma diminuição ainda maior na quantidade de água no concreto, sem alterar sua consistência ainda em estado fresco.
- Aditivo incorporador de ar: durante o processo de amassamento, acrescenta ao concreto uma quantidade regulada de pequenas bolhas de ar, as quais, continuam no estado endurecido.
- Aditivo acelerador de pega: possui a finalidade de encurtar o tempo de passagem do estado plástico para o estado endurecido do concreto.
- Aditivo retardador de pega: possui a finalidade de aumentar o tempo de passagem do estado plástico para o estado endurecido do concreto.
- Aditivo redutor de água e retardador de pega.
 - Plastificante retardador: tem o objetivo principal de combinar os efeitos de um aditivo redutor de água/plastificante e o objetivo secundário, os efeitos de um aditivo retardador de pega.
- Aditivo de alta redução de água e retardador de pega
 - Superplastificante retardador tipo I e II: tem o objetivo principal de combinar os efeitos de um aditivo de água de alto desempenho/superplastificante e o objetivo secundário, os efeitos de um aditivo retardador de pega.
- Aditivo redutor de água e acelerador de pega
 - Plastificante acelerador: efeito principal de redução de água/plastificante e efeito secundário de acelerador de pega.
- Aditivo de alta redução de água e acelerador de pega.
 - Superplastificante acelerador tipos I e II: efeito principal de redução de água/superplastificante e o efeito secundário de acelerador de pega.

4.1.4 Adições

As adições minerais são consideradas matérias-primas, também sendo utilizadas com o intuito de melhorar algumas propriedades do concreto e despoluição do meio ambiente, já que algumas adições são consideradas resíduos industriais. Elas são as principais responsáveis pela

variação de cada tipo de cimento Portland e são adicionadas ao clínquer ainda na fase de moagem (FURQUIM, 2006). As adições minerais podem ser aplicadas de duas maneiras no cimento, moídas ao mesmo tempo com o clínquer ou acrescentadas ao cimento ao longo do processo de emassamento (PAULA, 2006).

De acordo com a ABCP (2002) as adições minerais são:

- Escória de alto-forno: consideradas um subproduto, são compostas por óxidos de cálcio (CaO), silício (SiO₂) e alumínio (Al₂O₃), a mesma constituição do cimento Portland, no entanto em proporções diferentes. As escórias podem ser classificadas em duas, diferenciando-se por meio da relação CaO/SiO₂, quando possuem esta relação menor que 1, são chamadas de ácidas, as quais são obtidas durante o processo de produção de ferro gusa, e geradas em alto-forno a carvão vegetal, sofrendo um rápido resfriamento após a moagem e são utilizadas na forma de adição mineral. Já as básicas possuem a relação CaO/SiO₂ maior que 1 e são produzidas em alto-fornos a carvão coque e são utilizadas para a fabricação do cimento (GABRICH, 2008). Existem dois tipos de escórias, as cristalinas e as vítreas que são as usadas como adições na construção civil, essas permanecem com suas características hidráulicas desejadas para serem adicionadas aos cimentos, já que seu comportamento termodinâmico é instável e hidráulicamente latente podendo ser ativado graças a sua granulometria em meio a água (MOREIRA, 2006).

- Materiais pozolânicos: sua definição pode ser dada como:

São rochas vulcânicas ou matérias orgânicas fossilizadas encontradas na natureza, certos tipos de argilas queimadas em elevadas temperaturas (550° C a 900° C) e derivados da queima de carvão mineral nas usinas termelétricas, entre outros (ABCP, 2002, p. 7).

A exemplo das escórias de alto-forno quando fragmentados em micropartículas, os materiais pozolânicos passam a apresentar propriedades de ligante hidráulico, apesar de agirem de maneiras distintas. Para que ocorra as reações químicas, é necessário além da presença de água, que se tenha a presença de um outro material, como o clínquer, já que quando ocorre a hidratação, há a liberação de hidróxido de cálcio (cal), o qual reage com a pozolana. Estes materiais podem se apresentar também em forma de cinzas resultante da queima de cascas e de sílica ativa (ABCP, 2002).

- Materiais carbonáticos: Ainda de acordo com a ABCP (2002), estes materiais são originados a partir de rochas trituradas que apresentam carbonato de cálcio (CaCO₃) em sua

composição. Sua aplicação tem como objetivo tornar os concretos e argamassas mais fáceis de se trabalhar, agindo como um lubrificante, já que seus grãos conseguem se encaixar dentre as demais partículas do cimento. Quando são utilizados no cimento, são denominados também como fíler calcário.

- Gesso: encontrado em grandes proporções na natureza, está presente nas jazidas sedimentares, também conhecido por evaporitos sob a forma de gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), hemi-hidratado ou bassanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) e anidrita (CaSO_4), sendo a gipsita a forma mais usual na construção civil. É utilizado já na parte final do processo de fabricação da pasta (LIMA, 2011).

Considerado um aglomerante, o gesso é usado para estender o tempo de pega, já que sem a adição deste, a mistura entre o clínquer moído e água endureceria quase em imediato, impossibilitando seu uso nas construções. Por este motivo, esta adição é aplicada em todos os tipos de cimento Portland, em uma média de 3% para 97% de clínquer presentes na massa (ABCP, 2002).

Segundo Ribeiro, Pinto e Starling (2006), a cal é um aglomerante genérico proveniente de rochas calcárias que apresentam em sua composição carbonato de cálcio que após passar por processos de extração, é exposta ao calor, chegando a temperaturas de até 1200°C , fazendo com que ocorra a calcinação e conseqüentemente, o desprendimento do gás carbônico (CO_2).

De acordo com Furquim (2006) a aplicação de cal hidratada no concreto, tem como objetivo a reposição total ou parcial de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) nas reações pozolânicas e ainda restabelecer a reserva alcalina no mesmo, que sofre variações de acordo com as adições feitas a ele. É viável a sua utilização em concretos que possuam altas quantidades de adições, já que a cal hidratada possui um teor elevado de óxido de cálcio (CaO), fazendo com que a porosidade reduza drasticamente e a estrutura se torne mais compacta, além de encurtar o tempo necessário para a hidratação do mesmo.

4.1.5 Reação pozolânica

As reações de hidratação dos silicatos: ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) e ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) originam o silicato de cálcio hidratado e o hidróxido de cálcio, sendo que o silicato de cálcio hidratado além de não possuir composição fixa é o responsável pela resistência. Já o hidróxido de cálcio é solúvel e exerce influência na durabilidade da pasta de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

O silicato de cálcio hidratado resultante da hidratação do cimento apresenta relação Ca/Si em torno de 1,7 a 1,8 variando de acordo com a idade. A presença de sílica ativa como aditivo mineral (20% microsilica em relação a massa cimentícia - material empregado pelo

autor) faz com que o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ resultante da hidratação seja consumido, fazendo com que exista uma nova razão Ca/Si do silicato de cálcio hidratado de modo que diminua e passe a ser de 0,7 a 0,8, resultante da nucleação, que como consequência há redução da quantidade de íons Ca^{2+} que estão disponíveis na hidratação (PAULA, 2006).

De acordo com Rodrigues (2004) as partículas de microssílica continuam na pasta mesmo após passarem 180 dias da hidratação, sendo que a parte interna das partículas, permanecem com alto teor de Si em relação ao Ca, fazendo com que $\text{Si}/\text{Ca}=3$, já as regiões periféricas possuem valores inferiores, $\text{Si}/\text{Ca}=0,5$.

Ainda de acordo com o mesmo autor, desta forma, assume-se que a reação pozolânica ocorra na parte superior das partículas do aditivo, de modo a formar uma película protetora de silicato de cálcio hidratado que impede a reação pozolânica de se estender no interior das partículas com o mesmo desempenho que ocorre na superfície.

O clínquer e a pozolana possuem processos de reação distintos, de modo que reagem em diferentes estágios da hidratação. A reação pozolânica inicia-se no período de 7 e 15 dias após a mistura, ocorrendo diante da hidratação do cimento já desenvolvida. Tal fato, permite que as reações do clínquer e da pozolana exerçam influências mútuas dos dois processos. Após o primeiro dia, a hidratação do cimento com adições minerais abrange apenas o clínquer, de modo que as partículas do aditivo comportem-se como regiões de nucleação para o crescimento dos produtos de hidratação. Já em estágios mais evoluídos, a parte superior externa destas partículas altera-se, consumindo-as. Inicialmente, as partículas são recobertas por uma camada fina de composição diversa das partículas, posteriormente e de modo gradual, essa camada é substituída por agulhas de silicato de cálcio hidratado que crescem de modo perpendicular à superfície (PAULA, 2006).

Para Mehta e Monteiro (2008) a principal diferença entre a reação pozolânica e as reações de hidratação do cimento Portland de modo isolado, não são em relação aos componentes de hidratação e sim pela taxa em que eles são formados.

Segundo Mantuano Netto (2006) ao se hidratar uma pasta de cimento com adição de pozolana, ocorrerá uma diminuição gradual com o tempo do teor de hidróxido de cálcio livre, devido ao progresso da reação pozolânica.

Ainda de acordo com o mesmo autor, a reação física da reação pozolânica é considerada por muitos autores a reação mais importante, já que envolve o refinamento dos poros da pasta de cimento, exercendo a maior influência para o aumento da durabilidade química e resistência mecânica do concreto.

4.1.6 Propriedades do concreto fresco e endurecido

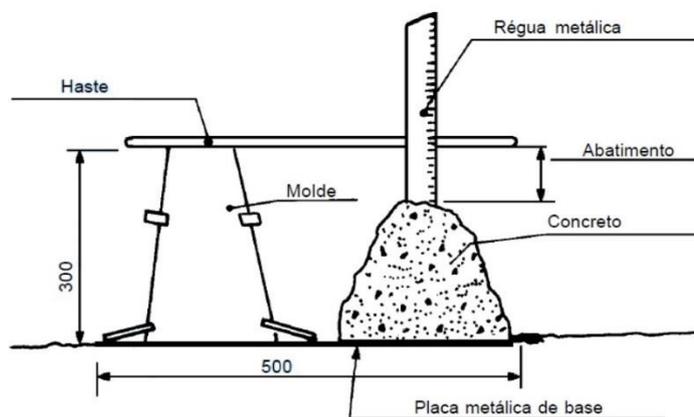
Para a obtenção de um concreto com boa resistência, é necessário que este seja em sua maioria sólido e com poucos vazios, já que mesmo após o processo de endurecimento, o concreto ainda é considerado um material heterogêneo, possuindo elementos em todas as fases, como gases, líquidos, gel e sólidos. A obtenção do concreto se dá por meio da hidratação correta do cimento, de maneira que os sólidos constituintes sejam envoltos pela pasta, pelo adensamento, a fim de que não haja vazios e nem segregação dos materiais e por fim, através da cura, processo que ocorre entre o adensamento e princípio da pega. As principais propriedades do concreto fresco são trabalhabilidade, consistência e homogeneidade (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2016):

A trabalhabilidade é a propriedade que estabelece a facilidade com que um concreto pode ser manipulado de modo que ele continue sendo homogêneo, ou seja, sem que haja a segregação entre suas partículas e nem mesmo exsudação, fazendo com que parte da água de amassamento venha à sua superfície. Desta maneira, o concreto poderá ser lançado e adensado sem que ocorra a perda de sua resistência e durabilidade (DURAN; FRACARO, 2011).

De acordo com Bauer (2011) a trabalhabilidade depende de dois fatores, os intrínsecos, estes são definidos conforme a relação água/cimento, granulometria do agregado além da textura e porosidade da sua superfície e se contém ou não agentes plastificantes, e os extrínsecos, que variam de acordo com a capacidade e conservação dos equipamentos utilizados.

Já a consistência pode ser definida como a facilidade com que o concreto em estado fresco tem de se deformar, estando correlacionado com o processo de transporte, lançamento e adensamento sofrido por ele, além de sofrer influência da quantidade de água, granulometria dos agregados e aditivos utilizados. Concretos que possuem baixa consistência, devem ser usados em elementos que possuem maior taxa de armadura, pois manifestam maior complexidade para serem adensados. Caso não necessite de taxa de armadura, é mais viável a produção de concretos mais consistentes, utilizando uma menor quantidade de água. Para a determinação da consistência usualmente é empregado o ensaio de abatimento do tronco de cone, também conhecido como *slump-test*, o qual consiste em medir a redução que uma quantidade estipulada de massa, inserida em um cone metálico terá após a retirada do molde como mostra a FIG. 1 (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2016).

Figura 1- Ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump – test*)



Fonte: Adaptado da NBR NM 67 (1998).

A homogeneidade é a regularidade dos componentes do concreto, que permanecem na massa de maneira uniforme, garantindo assim a resistência e evitando que ocorra a retração. Portanto, uma homogeneidade satisfatória pode ser obtida através do lançamento bem feito e a vibração correta, impedindo que ocorra a exsudação, e conseqüentemente o surgimento de vazios, além de não permitir a separação da pasta e da argamassa (SANTOS, 2009).

O processo de endurecimento do concreto Portland se dá após sua hidratação, com este passando do estado fluido para o estado plástico e em seguida, para o estado sólido, o qual estará apto a receber esforços (CUNHA, 2014). De acordo com Santos (2009) quando já em estado endurecido, o concreto possui características bem definidas, já que sua massa se encontra rígida, sem plasticidade ou fluidez.

A massa específica é uma das propriedades do concreto endurecido, sendo definida como a massa da unidade de volume, incluindo os vazios, a qual pode ser definida de acordo com a (ABNT, 1987): Concreto leve: possui massa específica inferior à 2000 kg/m^3 , quando seco em estufa; Concreto normal: possui massa específica entre 2000 e 2800 kg/m^3 , quando seco em estufa; e Concreto pesado: possui massa específica superior à 2800 Kg/m^3 , quando seco em estufa.

A resistência mecânica pode ser caracterizada como a capacidade do concreto de suportar às variadas condições de carregamento a que pode ser exposto, sendo as principais resistências a compressão, a tração, à flexão e ao cisalhamento. A resistência mecânica aumenta com o passar do tempo, já que o processo de endurecimento do concreto é longo, podendo levar até 2 anos para finalizar se. Porém, aos 28 dias, ele já atinge cerca de 75 a 90% da sua resistência

total, resistência essa que é levada em consideração para os cálculos estruturais (MELADO, 2014).

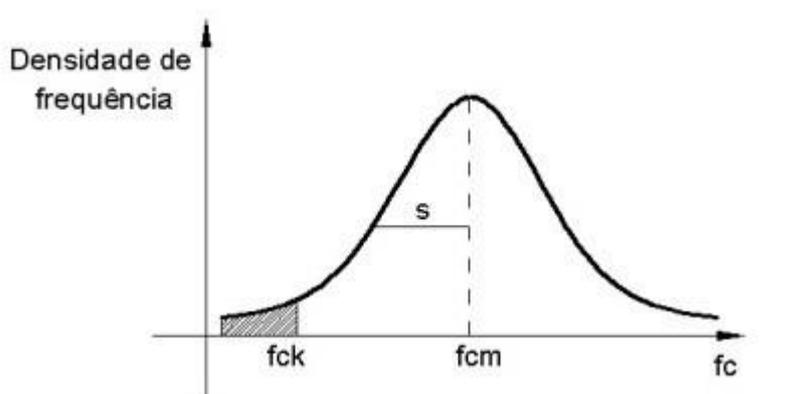
Para Duran e Fracaro (2011) diversos fatores influenciam na resistência mecânica, tais como:

- Fator água/cimento: quanto menor este fator, maior a resistência, ou seja, utilizando apenas a quantidade necessária, o concreto terá uma resistência mais elevada;
- Idade: é diretamente associada a resistência da pasta, a qual é definida pelo tipo de cimento utilizado;
- Forma e granulometria dos agregados: a forma e a textura influenciam a área específica dos agregados, tendo relação na ligação entre pasta/agregado. Elementos que possuem o formato cúbico, possuem área específica maior e os de superfície rugosa, proporciona o aumento da resistência mecânica no concreto;
- Tipo de cimento: influencia diretamente na porosidade da pasta; e
- Condições de cura: processo que favorece a hidratação do cimento. Constitui em controlar a temperatura e o movimento da água de dentro para fora e de fora para dentro do concreto, fator de suma importância para a resistência.

De acordo com Neville (2016), a resistência à compressão é tida como uma das mais importantes resistências, já que é fundamental na elaboração de projetos estruturais. Sua medição é feita através de ensaios laboratoriais, os quais são de fácil realização e normalizados de modo que incluam o adensamento e cura úmida por um período de tempo definido, ao final do qual é possível determinar a qualidade potencial do concreto. Os ensaios geralmente são feitos em corpos de prova cilíndricos de ferro fundido ou aço, possuindo dimensões padrões estipuladas em 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura e são rompidos quando atingem a idade de 28 dias e os ensaios adicionais realizados quando atingem 3 e 7 dias.

Para um resultado confiável, é necessário que o ensaio seja realizado em uma quantidade significativa de corpos de prova e mesmo após sofrerem os mesmos procedimentos de fabricação e moldagem, apresentaram valores de resistência à compressão diferentes. Com base nessas informações, é possível obter um gráfico com resultados obtidos de f_c versus a quantidade de corpos de provas relativos a determinado valor de f_c , conhecido como densidade de frequência. A curva encontrada, recebe o nome de Curva Estatística de Gauss ou Curva de Distribuição Normal, representada na FIG. 2 (PINHEIRO et al., 2010):

Figura 2 - Curva de Gauss para resistência do concreto à compressão



Fonte: (PINHEIRO et al., 2010).

Através da Curva de Gauss é possível encontrar dois valores fundamentais, sendo eles a resistência média do concreto à compressão, f_{cm} , que representa a média aritmética dos valores de f_c para a totalidade de corpos de prova ensaiados, e é usado para determinar a resistência característica do concreto à compressão, f_{ck} , como mostrado através da equação 5:

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,65s \quad (5)$$

Sendo que:

S: representa a distância entre a abscissa de f_{cm} do ponto de inflexão da curva (ponto onde altera a concavidade).

1,65: corresponde a porcentagem de 5% que possui a possibilidade de não alcançar o valor de resistência característica à compressão do concreto, sendo então que 95% dos corpos de prova possuem $f_c \geq f_{ck}$.

Em obras, devido à falta de possibilidade de se ensaiar uma quantidade significativa de corpos de prova, faz o uso do valor estimado da resistência característica do concreto à compressão, calculando, portanto, o valor de $f_{ck, est}$ (PINHEIRO et al., 2010).

Em relação a resistência à tração, devido ao concreto não reagir bem, essa resistência normalmente é desprezada em projetos estruturais, apesar disso, possui relativa importância em relação as propriedades do concreto, pois interfere na fissuração e na resistência ao cisalhamento e ancoragem de armaduras (SANTOS, 2009).

Quanto às deformações, para Magalhães (2013) o concreto é considerado um material sólido que possui poros em seu interior. Quando estes se encontram totalmente secos ou saturados, o concreto é analisado como um sólido comum, mas quando os possui preenchidos

apenas parcialmente, ocorre as tensões capilares, ocasionando ao concreto diferentes deformações, passando a ser considerado um material *pseudo-sólido*. Em consequência destas deformações, ocorrem as variações no volume, que são responsáveis pelo aparecimento de possíveis fissuras que atuam no ponto mais frágil da estrutura e permitem a entrada de agentes corrosivos, podendo levar ao colapso.

De acordo com Fernandes (1996), as deformações do concreto se classificam em duas: causadas por variações das condições do ambiente: devido a umidade e temperatura, a exemplo, a retração; e provocadas por causas externas: aplicação de forças às estruturas de concreto, podendo ser deformações imediatas, que ocorrem no momento da aplicação da carga, e as lentas ou fluência, que acontecem quando a tensão é mantida.

A retração é caracterizada pela deformação por perda de água e por estar interligada à diversos fatores, variando de acordo com a umidade do meio ambiente, as características do cimento usado, a retração que a pasta sofrerá e o quantitativo de cimento utilizado, de modo que quanto mais cimento utilizar, maior será a quantidade de água necessária e em consequência disto, maior a retração para um mesmo fator a/c e variando ainda, em relação aos sais solúveis utilizados no concreto (BAUER, 2011).

Por conseguinte, a expansão é definida como o processo em que ocorre a expansão no volume do concreto em peças submersas e tracionadas devido a fluência (PINHEIRO et al., 2010). Em peças submersas, a princípio ocorre a retração química, mas como o fluxo de água é de fora para dentro, as tensões capilares existentes, interrompem o processo de retração química e geram a expansão da peça. A expansão do concreto pode ocasionar sua fissuração, promovendo o aumento da permeabilidade e fragilidade para a absorção de águas agressivas (LAPA, 2008).

A Deformação imediata é considerada uma deformação que ocorre devido a presença de forças externas, ocorre no momento em que é feita a aplicação de cargas, de maneira que os cristais que compõem o material, se acomodam a ponto de acontecer a deformação instantânea (FERNANDES, 1996).

Bauer (2011) define a fluência como um fenômeno causado pela aplicação de carga ao longo de um período, sendo acrescida a deformação natural que o concreto sofre. Quando se trata de cargas permanentes, as deformações plásticas, que não são mais reversíveis, causadas por elas, se sobrepõem as deformações elásticas. Com o passar do tempo e a continuidade dessas cargas permanentes, ocorrerá a diminuição dos capilares, causando o aumento da tensão superficial, da evaporação e ocasionando a fluência no concreto (PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS, 2004).

A permeabilidade pode ser definida como o movimento dos fluídos no interior de um meio poroso, devido a uma diferença de pressão existente. Os vazios presentes, além de reduzirem a resistência do concreto, são a maneira conducente para a percolação dos fluídos no interior do mesmo (REBMANN, 2011).

A permeabilidade é considerada um fator que influencia diretamente na durabilidade, já que quanto mais impermeável o concreto for, menos efeito de agentes agressivos ele sofrerá, além de estar associada a porosidade da pasta, pois quanto menos porosa mais impermeável a pasta e, posteriormente, o concreto. A porosidade, está ligada a dois fatores principais: relação água/cimento e do grau de hidratação da pasta (MELADO, 2014).

4.2 Uso de resíduos na fabricação de concreto

A produção em grande escala de resíduos sólidos é um problema mundial, já que grande parte destes resíduos produzidos por indústrias, residências, e obras, por exemplo, são descartados e destinados de maneira incorreta, trazendo grandes prejuízos para o meio ambiente. Em consequência de tais ações, os resíduos gerados poluem os recursos hídricos, solo e influenciam na criação de problemas socioeconômicos, tornando necessário a criação de medidas preventivas (KOLLER et al., 2007).

Neste contexto, a indústria cimentícia brasileira há algumas décadas persiste na busca por uma produção sustentável, visando ações que gerem menos impactos ambientais. A criação de medidas inclinadas para a sustentabilidade, garantiram ao Brasil o título de referência mundial nas emissões específicas de CO₂ (gás carbônico) por tonelada de cimento. Além de ter 70% da sua produção pertencente a Iniciativa de Sustentabilidade do Cimento (CSI) em parceria com o WBSCD (sigla em inglês do Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável), movimento que promove o desenvolvimento de maneira sustentável na indústria de cimento mundial (LAUDONIO, 2013).

De acordo com o mesmo autor, estas indústrias investem cada vez mais em equipamentos que possuam um desempenho energético melhor, poluam menos e ainda utilizam de matérias-primas alternativas, como o reaproveitamento de subprodutos de outros setores, poupando os recursos naturais não renováveis. Tais medidas, visam a diminuição da geração de resíduos, já que é utilizado o coprocessamento, atividade que usa os fornos das indústrias cimentícias para a extinção dos resíduos e os aplica na substituição parcial de matérias-primas e combustíveis tradicionais utilizando-os para a fabricação do cimento.

Dito isso, um bom exemplo de grande gerador de resíduos, é o meio rural, já que é possível observar que, além das atividades agropecuárias e florestais, há a presença de diversas atividades industriais, como a fabricação de açúcar, álcool, mineração e abate de animais. Nestas, grande parte dos resíduos gerados podem ser reaproveitados e reutilizados, podendo ser transformados e incorporados, de modo que estejam presentes na produção de novos materiais construtivos, cooperando para a produção sustentável e ainda atender a população com renda mais baixa, com produtos de qualidade e preço inferior (PAULA, 2006).

Os materiais utilizados como resíduos são classificados segundo o CONAMA (2002), em quatro classes:

- Classe A: todos os resíduos que poderão ser reutilizados como agregados;
- Classe B: resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, metais, vidros, madeira;
- Classe C: resíduos que não possuem tecnologias ou aplicação economicamente viável para sua reciclagem; e
- Classe D: resíduos perigosos.

4.2.1 Cinzas do bagaço de cana-de-açúcar

A indústria e comercialização de açúcar são as atividades econômicas mais antigas do Brasil. Seu desenvolvimento está associado aos principais eventos históricos do país, desta forma, o Brasil tornou-se o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, maior produtor de açúcar e álcool, além de maior exportador dos seus derivados (PAULA, 2006).

Devido ao crescimento pela demanda de cana-de-açúcar, principalmente para ser utilizada como combustível, ocorreu o aumento do volume de resíduos gerados, como o bagaço proveniente do processo de fabricação do açúcar. A princípio, o bagaço era visto como um obstáculo, sendo utilizado apenas em pequenas quantidades e somente para alimentação de animais confinados e em forma de adubo mesmo não possuindo ação fertilizante, tornando-se um problema ambiental (REZENDE, 2016).

Ainda de acordo com o mesmo autor, em virtude das buscas por alternativas sustentáveis e expansão nos rendimentos, surgiu o interesse do aproveitamento destes resíduos industriais, que antes não possuíam grande valor comercial, fazendo com que atualmente sejam considerados fontes de renda e de geração de energia, como é o caso do bagaço de cana-de-açúcar.

Ao fazer a moagem da cana para extração do seu caldo, cerca de 30% do que foi processado vira bagaço, uma quantidade significativa de resíduos. Grande parte do que é gerado, é incinerado por caldeiras no intuito de se obter o vapor, e conseqüentemente é produzida a cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC), que pode ser usada como adição mineral, graças a grande porcentagem de sílica presente, sendo utilizada como pozolana, substituindo uma parte do cimento em argamassas e concretos (PAULA et al., 2009).

Parte das cinzas são consideradas pesadas, as quais são colocadas em um cinzeiro localizado na parte inferior da grelha da caldeira, e o remanescente que possui granulometria mais fina, é chamado de cinza volante ou leve, passa por procedimentos de limpeza dos gases e são dispersados na atmosfera pela chaminé (CASTRO; MARTINS, 2016).

Desta forma, o material que antes era considerado um poluidor em potencial, passa a receber destinação adequada, além de contribuir para a redução da exploração de matérias-primas de fontes esgotáveis, como o clínquer e conseqüentemente a redução do CO₂ gerado pela sua fabricação, reduz o consumo de energia, gastos com transporte e o volume dos aterros, ocasionando uma diminuição do impacto ambiental (LOPES, 2014).

4.2.2 Formação e composição química

As cinzas de cana-de-açúcar dividem-se em dois tipos, sendo esta diferenciação realizada por meio das características mineralógicas, podendo ter sua sílica encontrada na forma amorfa ou cristalina (REZENDE, 2016).

De acordo com Freitas et al. (1998), no seu processo de formação para se tornar adição mineral, a CBC deve atender a dois critérios: quanto ao seu rendimento (cerca de 15%) e quanto a sua constituição química (cerca de 80% de SiO₂).

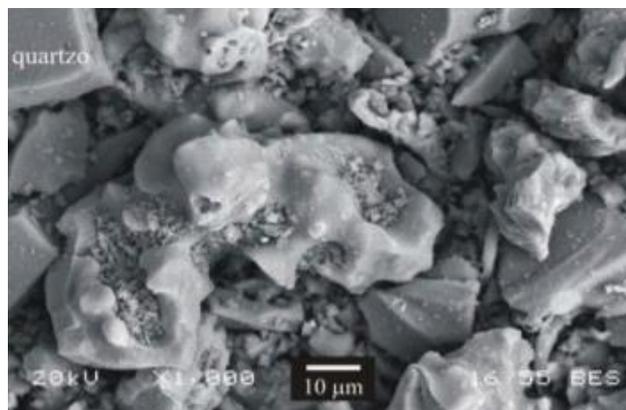
Quanto ao seu processo de produção, varia de acordo com o processo de queima que ela sofre e as transformações ocorridas por ela, podendo ser descritas da seguinte forma: à temperatura de 100 °C ocorre perda de massa devido a evaporação da água presente, ao atingir 350 °C acontece a combustão dos elementos mais voláteis, promovendo a queima do bagaço da cana-de-açúcar. Para temperaturas entre 400 e 500 °C acontece a oxidação do carbono residual, sendo possível notar a maior perda residual da massa e posteriormente a esse processo, a cinza se torna rica em sílica amorfa. E por fim, quando se utiliza temperaturas acima de 700 °C ocorre a formação de quartzo, já em temperaturas acima de 800 °C a sílica que se encontra na CBC é totalmente cristalina (PAULA, 2006).

Já em relação a composição química das cinzas é possível afirmar que existe a predominância de SiO_2 e de óxido de alumínio (Al_2O_3). Dependendo das condições de queima, as cinzas podem apresentar estruturas amorfas e desenvolverem condições favoráveis às reações pozolânicas, sendo que a presença de carbono não interfere nas reações de hidratação que ocorrem na pasta cimentícia (POGGIALI et al., 2012). Adicionalmente, Paula (2006) cita que além dos elementos predominantes, a CBC é constituída de álcalis e traços de óxido de ferro, cálcio e magnésio.

O silício encontrado na composição química das CBC é proveniente da absorção pelas raízes da cultura, sendo encontrado na forma de ácido monossílico (H_4SiO_4) ou ainda por meio da areia (quartzo), procedente da lavoura, não sendo retirado totalmente após a lavagem da cana-de-açúcar (VANDERLEI, 2014).

Já o quartzo caracteriza a fase cristalina, deixando o material com menos reatividade, que é influenciada diretamente pela granulometria dos grãos, já que a reação pozolânica ocorre nos elementos em estado sólido (pozolana), aumentando sua taxa através da moagem da cinza e do contato da superfície com os componentes que provocam a hidratação do cimento, ocasionando o aumento da resistência mecânica e físicas das argamassas e concretos (REZENDE, 2016). Por meio da (FIG. 3), através da microscopia é possível observar a morfologia das partículas de CBC, que apresentam partículas de quartzo (CORDEIRO, 2006).

Figura 3- Morfologia das partículas de CBC



Fonte: Cordeiro, 2006, p.50.

4.2.3 Interação na matriz cimentícia

Segundo Vanderlei (2014), as pesquisas sobre concreto sempre possuíram o intuito de chegar em resultados de concretos que possuíssem maior qualidade, e por meio da adição das cinzas, é possível obter melhorias por meio da diminuição da corrosão induzida por íons de cloreto e sulfato e da segregação, podendo ainda proporcionar maior rigidez ao concreto. Entretanto, ressalta-se que as pastas de cimento que possuem a adição das CBC necessitam de um tempo maior para se hidratarem, causando a maior absorção de água e retratibilidade devido à presença das cinzas.

De acordo com o mesmo autor, com a utilização das CBC é possível produzir um concreto de alto desempenho tecnológico e que possua as mesmas propriedades mecânicas de durabilidade e propriedades reológicas.

Para Alcantara e Santos (2012), a adição das cinzas nos concretos geram um efeito positivo, trazendo benefícios através do aumento da sua resistência, proporcionando maior rigidez com o passar do tempo, e contribuindo para o tornar menos permeável.

O acréscimo das CBC pode ser feito de duas maneiras na fabricação do concreto: sendo incorporadas como adição mineral, alterando as suas características aglomerantes e melhorando seu desempenho ou ainda ter sua incorporação junto ao cimento, proporcionando a redução do consumo de clínquer por m³. Em ambos os casos, a adição das cinzas torna se benéfica e fornece benefícios à população e ao meio ambiente, ocasionando uma redução nos impactos ambientais (PAULA, 2006).

5 MATERIAL E METÓDOS

A metodologia foi desenvolvida a partir dos ensaios necessários para a verificação da consistência, resistência e massa do concreto sustentável, afim de avaliar o seu comportamento em relação ao concreto convencional, além da determinação do índice de atividade pozolânica das CBC, para que posteriormente, as mesmas pudessem ser avaliadas como material pozolânico.

Para a produção do concreto, o traço padrão utilizado foi o de 1:2:3 (cimento, areia, agregado graúdo) e adotou-se uma relação de água/cimento de 0,48, os quais foram empregados de acordo com o trabalho desenvolvido por Silva et al. (2016). Em todos os ensaios realizados, o volume da massa total, agregado miúdo, graúdo e água foram constantes, variando-se apenas as proporções de cimento e as porcentagens da CBC adicionadas, em substituição parcial do cimento em 10, 20 e 30%, fundamentando-se na escolha das porcentagens da dissertação de autoria de Paula (2006).

Os procedimentos experimentais foram realizados no Laboratório de Ciências da Terra, localizado no Centro Universitário de Formiga (UNIFOR – MG). Para a fabricação dos diferentes concretos avaliados, foi utilizado como aglomerante o cimento CP II F – 32 da marca Campeão, por ser um cimento com uma quantidade pequena de adições, para melhor verificação do efeito da adição da cinza. Como agregado miúdo e graúdo, a areia fina e a brita nº 0, respectivamente. Todos os materiais foram adquiridos em casa de material de construção localizada em Formiga – MG e selecionada de maneira aleatória. Já como adição mineral, diferentes porcentagens de CBC, proveniente de um alambique de fabricação de aguardente de cana-de-açúcar situado no município de Córrego Fundo – MG.

Para definir a quantidade de material que seria necessária para o traço, a princípio, calculou-se o volume de concreto acrescido em cada molde, por meio da Equação 6:

$$V = h \times \pi \times r^2 \quad (6)$$

em que:

V = é o volume do corpo de prova, dm³;

h = é a altura do corpo de prova, dm; e

r = é o raio do corpo de prova, dm.

Após determinado o volume de cada corpo de prova, multiplicou-se este pela quantidade total de corpos de provas produzidos para a realização do experimento para cada traço avaliado, sendo possível encontrar o valor total do volume de concreto a ser utilizado. Posteriormente, foi possível dosar a quantidade correta de material necessário para o traço por meio da Equação 7:

$$C = \frac{V}{\frac{1}{\rho_c} + \frac{2}{\rho_a} + \frac{3}{\rho_b} + 0,48} \quad (7)$$

em que:

C = é o consumo de cimento, kg;

V = é o volume de concreto, dm³;

ρ_c , ρ_a e ρ_b = são as massas específicas reais do cimento, areia e brita respectivamente, kg/dm³.

Assim, ao multiplicar o valor encontrado pelos valores do traço, obtém-se a quantidade exata de cada material a ser aplicado (TAB. 2).

Tabela 2 - Material aplicado em cada traço de concreto com diferentes porcentagens de CBC.

Traço	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita 0 (kg)	CBC (kg)	Água (l)
0%	2,33	4,67	7,00	0	1,12
10%	2,10	4,67	7,00	0,23	1,12
20%	1,87	4,67	7,00	0,47	1,12
30%	1,64	4,67	7,00	0,70	1,12

Fonte: A autora (2018).

Para iniciar o procedimento, por meio do peneiramento, certificou-se que as CBC estavam em conformidade em relação a finura estabelecida pela NBR 12653 (ABNT, 2012) verificando-se que o material atendia a porcentagem retida na peneira nº 325, com 45 µm de abertura de malha. Posteriormente, foi necessário que cada material fosse pesado e adicionando individualmente, de forma manual, para que o traço fosse atendido, formando a massa.

5.1 Slump Test

Para determinar a consistência do concreto ainda no estado fresco, foi realizado o Slump Test, ou Teste do Abatimento do Tronco de Cone, conforme preconizado pela NBR NM 67

(ABNT, 1998). Para sua execução, foi utilizado um molde em formato cônico, que possui 30 cm de altura, 20 cm de base inferior e 10 cm de base superior.

Para o cumprimento do teste, foi necessário que o molde estivesse sob uma placa metálica e ambos terem sido umedecidos anteriormente, feito isso, foi realizado o preenchimento do molde em 3 camadas de concreto, cada uma ocupando cerca de um terço da altura e compactadas com 25 golpes pela haste de socamento.

Ao final, o molde foi retirado verticalmente, de maneira cuidadosa em um tempo que permanecesse entre 5 e 10 segundos e posicionado ao lado do concreto para servir como referência para sua aferição. Posteriormente, a haste foi disposta sobre o centro do molde e com a utilização da régua foi realizada a medição do abatimento do concreto, determinando a diferença de altura entre a altura do molde e o eixo do corpo de prova, de acordo com a (FIG. 4).

Figura 4- Realização do teste de abatimento do tronco de cone (*Slump Test*)



Fonte: A autora (2018).

5.2 Confeção dos corpos de prova

Para a preparação dos corpos de prova foram utilizados tubos de PVC com medidas conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015), possuindo o valor da altura igual ao dobro do diâmetro, sendo respectivamente 20 e 10 cm. Foram produzidos 12 moldes, sendo utilizados três para

cada traço e mais três usados como testemunhas, os quais possuíam a dimensão mínima de 100 mm, comprimento de 350 mm e vão de ensaio de 300 mm, tiveram o concreto introduzido em 2 camadas e foram adensados manualmente, recebendo 12 golpes em cada camada.

Após serem moldados, os corpos de prova permaneceram em local apropriado, de maneira que não houvesse contato com intemperes ou vibrações, os quais permaneceram no local por 24 horas antes de serem desmoldados.

Em seguida, os corpos de prova receberam identificação e ficaram armazenados, em tanque que continha solução de hidróxido de cálcio, aonde permaneceram até 24 horas antes que ocorresse o ensaio, a uma temperatura aproximada de 23 °C de acordo com a NBR 9479 (ABNT, 1994), completando os 28 dias de cura.

5.3 Determinação do índice de atividade pozolânica

Para avaliação da atividade pozolânica da CBC, foi calculado o índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland (Equação 8), conforme a NBR 5752 (ABNT, 2014).

$$IAP = \frac{f_{cp}}{f_{cc}} \times 100 \quad (8)$$

em que:

I = índice de desempenho do cimento Portland, que deve ser arredondado ao inteiro e expresso em porcentagem (%).

f_{cp} = resistência média dos corpos de prova à compressão, aos 28 dias, moldados com cimento Portland e CBC (material pozolânico), arredondado ao décimo e expresso em MPa.

f_{cc} = resistência média dos corpos de prova à compressão, aos 28 dias, moldados apenas com cimento Portland, arredondado ao décimo e expresso em MPa.

5.4 Determinação da massa específica dos corpos de prova

Para realização do cálculo da massa específica (Equação 9), antes que ocorresse o rompimento dos corpos de prova, foi necessário os submeter a pesagem individual, e como o volume já era conhecido por meio da Equação 6, necessário para a dosagem do material, realizou-se o cálculo para determinação da massa específica.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (9)$$

em que:

ρ = massa específica do corpo de prova, kg/m³;

M = massa do corpo de prova, kg; e

V = volume do corpo de prova, m³.

5.5 Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão dos 12 corpos de prova correspondentes aos diferentes tratamentos foram realizados utilizando uma máquina universal de ensaios modelo WAW-1000 da marca SOLOCAP e executado de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007) com os corpos de prova sendo rompidos aos 28 dias.

Para realização do ensaio, cada corpo de prova foi disposto e centralizado individualmente no prato inferior e posteriormente recebeu o carregamento de maneira e velocidade contínua e sem choques, cessando apenas quando ocorreu a sua ruptura. Com os valores obtidos, foi possível calcular a resistência pela Equação 10:

$$f_c = \frac{4 \times F}{\pi \times D^2} \quad (10)$$

em que:

f_c = é a resistência à compressão, MPa;

F = é a força máxima alcançada, N; e

D = diâmetro do corpo de prova, mm.

Posteriormente ao rompimento, foram realizados os cálculos e os resultados obtidos foram utilizados para a comparação com o valor de resistência esperada, efetuando a comparação e utilizando da média do traço sem adição e dos traços com adição, para obtenção do resultado da IAP.

5.6 Análise estatística

Para a determinação da análise estatística, foi elaborado um experimento totalmente casualizado, constituindo-se da porcentagem de substituição parcial do cimento Portland pela CBC em quatro diferentes níveis (0, 10, 20 e 30%) realizado em três repetições, sendo que as variáveis representam a resposta a massa específica úmida e a resistência a compressão do

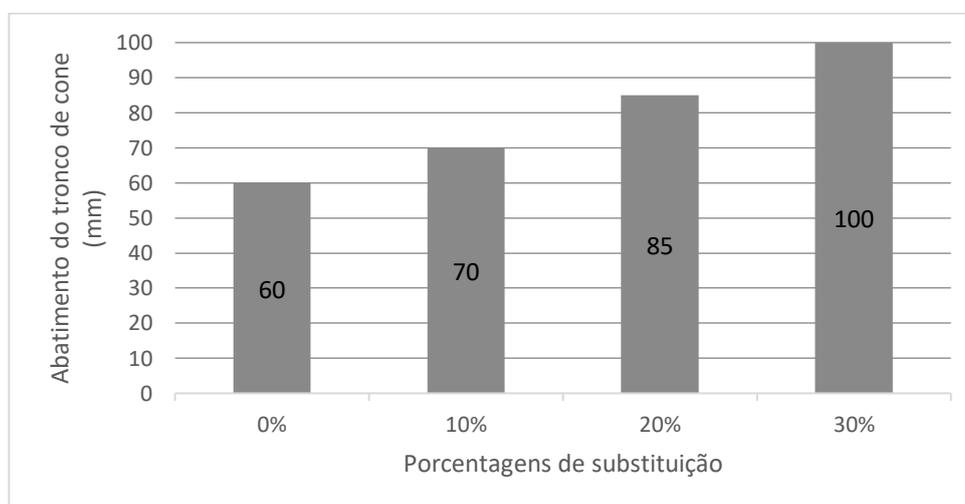
concreto. Os mesmos, foram comparados pelo teste F a 5% de significância, por meio da utilização do software Agroestat (BARBOSA; MALDONADO JÚNIOR, 2015).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos por meios dos ensaios e determinações são apresentados a seguir, e posteriormente as análises feitas de acordo com os valores encontrados.

O concreto apresentou variados resultados do ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone, distintos em função da porcentagem de cinzas adicionadas em substituição ao cimento Portland, como pode ser visto no GRAF. 1.

Gráfico 1 - Abatimento do tronco de cone alcançado pelo concreto com diferentes traços em razão das diferentes porcentagens de CBC adicionadas em substituição parcial ao concreto Portland.



Fonte: A autora (2018).

Pode-se destacar que quanto maior a quantidade de CBC adicionada ao concreto menos consistente o mesmo torna-se, adquirindo cada vez mais trabalhabilidade e fluidez. Os resultados obtidos assemelharam-se com os atingidos por Cordeiro et al. (2009), que apresentou um acréscimo médio de 8 mm no abatimento, após adicionar-se as cinzas.

De acordo com Mantuano Netto (2006) tais fatos ocorrem devido a elevada superfície específica da CBC, do grande teor de carbono, e em decorrência do clínquer e a pozolana apresentarem processos de reação distintos, em que a reação de hidratação acontece em estágios diferentes, acarretando em uma menor absorção de água por parte das cinzas. Assim, a

utilização da CBC é indicada quando for necessário obter-se um concreto mais trabalhável, mantendo o traço já escolhido anteriormente, ou ainda, quando priorizar-se métodos mais sustentáveis, diminuindo a quantidade de água utilizada, e desta forma, preservando este recurso natural.

Em sequência, é apresentado por meio da TAB. 3 os resultados obtidos a partir das análises de variância ANOVA para os parâmetros de massa específica do concreto e da resistência a compressão.

Tabela 3 - Resumo da ANOVA para resistência à compressão e massa específica úmida de concretos fabricados com diferentes porcentagens de substituição cimento Portland por CBC

Fonte de variação	GL	Quadrado Médio	
		Resistência à compressão	Massa específica úmida
% CBC	3	50,90**	13092,71**
Erro	8	3,92	267,84
Total	11		
cv (%)		17,37	0,78
Média geral		11,40	2102,27

Fonte: A autora (2018). Em que: **Significativo a 1% de probabilidade estatística pelo Teste F; CV: coeficiente de variação; GL: grau de liberdade.

A partir do exposto na TAB. 3, pode-se afirmar que ao menos uma média dentre as obtidas tanto para massa específica quanto para a resistência a compressão do concreto, diferiram entre si, sendo então, necessária a realização de teste de média para verificação das diferenças.

Assim, na TAB. 4, são apresentados os valores para as médias da resistência a compressão do concreto com substituição parcial do cimento Portland por CBC.

Tabela 4 - Médias de resistência a compressão de concreto com diferentes porcentagens de cinza de bagaço de cana

% de CBC	fc (MPa)
0	15,98 a
10	13,32 a
20	9,73 b
30	6,56 b

Fonte: A autora (2018). Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade estatística pelo teste de Scott – Knott.

Pôde-se verificar que todos os traços, atingiram valores superior a resistência mínima de 6,0 MPa preconizada pela NBR 12653 (ABNT, 2012) e desta forma, podem ser classificados a princípio como materiais pozolânicos. Por meio da análise de variância, foi possível constatar que a substituição de 10% não apresentou perda de resistência, estatisticamente, comparada ao traço padrão, ao contrário das outras substituições, em que ocorreram reduções significativas e inversamente proporcionais aos teores de CBC adicionados. Tal fato, pode ser justificado de acordo com Paula (2006), devido a maior porosidade ocasionada pela cinza, afetando diretamente sua resistência.

Posteriormente, na TAB. 5, são mostrados os resultados referentes aos valores das médias das massas específicas do concreto com diferentes porcentagens de CBC.

Tabela 5 - Médias de massa específica de concreto com diferentes porcentagens de cinza de bagaço de cana

% de CBC	Massa específica (kg/m ³)
0	2185,42 a
10	2118,05 b
20	2073,03 c
30	2031,42 d

Fonte: A autora (2018). Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade estatística pelo teste de Scott – Knott.

Em relação a massa específica, todos os valores demonstraram variações, diferenciando os entre si a 5% de probabilidade estatística, tornando-se visível que a substituição parcial do cimento Portland pela CBC acarreta em redução da massa específica, e que estas variam proporcionalmente com o aumento dos valores das porcentagens substituídas. De acordo com Cordeiro (2006), as variações das massas específicas podem ocorrer devido ao efeito de empacotamento (perda da massa que transforma-se em energia) da CBC no concreto. As adições minerais podem exercer influência nas propriedades das matrizes cimentícias em razão das reações entre os silicatos amorfos e o hidróxido de cálcio, da nucleação e da dissolução do cimento Portland pela finura das partículas da adição.

Os resultados consequentes do índice de atividade pozolânica para cada porcentagem de substituição, são apresentados na TAB. 6. Os ensaios foram realizados de acordo com a NBR 5752 (ABNT, 2014).

Tabela 6 - Atividade Pozolânica de concreto com diferentes porcentagens de CBC

Porcentagem de CBC adicionada (%)	Resistência média (MPa)	Atividade pozolânica (%)
0	16,00	100,00
10	13,30	84,00
20	9,70	61,00
30	6,60	42,00

*Média de 3 corpos de prova.

Fonte: A autora (2018).

Os valores apontados pela tabela indicaram que os índices de atividade pozolânica atingidos pelos traços com adição de CBC igual e superior a 20%, são valores inferiores ao valor mínimo de 75% especificado pela 5752 (ABNT, 2014), sendo assim, o material não atende o critério estabelecido para ser considerado pozolana.

Os resultados da resistência a compressão e índice de atividade pozolânica, foram contrários aos encontrados por Gobbi (2014) que apresentaram valores satisfatórios para o IAP, mas não superou a resistência mínima necessária pela norma e semelhantes ao de Lopes et al. (2014), que obteve valores de resistência aceitáveis e declinantes em relação ao aumento do valor de substituição e apesar de IAP apresentar resultados admissíveis, a quantia de silicatos de cálcio hidratados produzidos pelas reações entre os óxidos presentes na CBC com o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento foram insuficientes em algumas amostras.

Já em relação ao IAP, é explicado pela qualidade contestável das CBC utilizadas no experimento e por estas apresentarem indícios de pouca atividade pozolânica em sua formação, fatos estes, que só poderiam ser verificados apenas após a realização do ensaio de resistência a compressão, desta forma, desfavorecendo a atividade química entre o hidróxido de cálcio e os demais materiais.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio da inserção das CBC como adição mineral ao concreto, é possível viabilizar a redução do consumo de clínquer e conseqüentemente a emissão de CO₂, originado pelas indústrias cimenteiras. E ainda alterar algumas de suas características, como a fluidez e trabalhabilidade, ocasionando um concreto mais trabalhável que o convencional.

A presença do resíduo em substituição de 10% ao cimento Portland, não causou variações estatísticas significativas na resistência do concreto úmido, ao contrário de sua massa específica que alterou de acordo com o aumento da substituição, sofrendo uma redução máxima de 154 kg/ m³.

Desta forma, o uso da CBC com índice de atividade pozolânica comprovada, torna-se viável tanto em relações técnicas, ecológicas e econômicas, já que por se tratar de um resíduo sólido, em que na sua maioria não é aproveitado e é descartado de forma incorreta, causa danos ao meio ambiente. Por meio do seu reaproveitamento, os gastos dos os produtores de cana-de-açúcar com transportes para destinação deste insumo, podem ser eliminados por meio da sua doação, tornando-se totalmente viável para ambas as partes.

Entretanto, para a sua aplicação ainda são necessários estudos aprofundados, não sendo recomendado para fins estruturais.

REFERÊNCIAS

ALCANTARA, M. A. M.; SANTOS, B. V. Concreto auto adensável com cinzas de bagaço de cana como finos: reologia do concreto fresco e comportamento no estado endurecido. **REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Goiás- Go, v.5, n.1, 17-35 p, semestral. 2012.

ARAUJO, S. S.; GUIMARÃES, G. N.; GEYER, A. L. B. **Influência do tipo de medição na determinação do módulo estático de elasticidade do concreto.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 7. ed. São Paulo-SP, 2002. 28 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732 c**: Cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 1991. 2 p.

_____. **NBR 5735 e**: Cimento Portland de alto forno. Rio de Janeiro, 1991. 1 p.

_____. **NBR 5736 f**: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1991. 2 p.

_____. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014. 3 p.

_____. **NBR 8522**: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro, 2003. 9 p.

_____. **NBR 9479**: Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova de argamassa e concreto. Rio de Janeiro, 1994. 2 p.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987. 2 p.

_____. **NBR 11578 b**: Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991. 2 p.

_____. **NBR 11768 a**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2011. 2 p.

_____. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2012. 3 p.

_____. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. 8 p.

_____. **CONAMA 307**: Gestão de resíduos e produtos perigosos – 5 de julho de 2002. 95-96 p.

BARBOSA, J. C; MALDONADO JÚNIOR W. **AgroEstat: sistema para análises estatísticas de ensaios agrônômicos**. FCAV/UNESP, Jaboticabal, versão 1.0.694 (2011).

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção** 1. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 488 p.

BRASIL. Ministério do meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **RESOLUÇÃO nº 307**. Diário Oficial da União, 05 de julho de 2002.

CARVALHO, A. G. **Energia de ativação do concreto: experimentação e modelagem**. 2002. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

CARVALHO, R. C; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Concreto Armado**. 4. ed. São Carlos: EdUFCar, 1975. 415 p.

CASTRO, T. R.; MARTINS, C. H. Avaliação da adição de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar em argamassas mistas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre-RS, v. 16, n. 3, 137-151 p, jul./set. 2016.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 2006.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D. REGO, E.M. Ambiente Construído. **Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, Porto Alegre -RS, v. 9, n. 4, p. 99-107, out./dez. 2009.

CUNHA, A.V. **Concreto de cimento Portland: abordagem da qualidade com ênfase em métodos estatísticos**. 2014. 74 f. Dissertação (Bacharelado) – Centro Universitário de Formiga, Formiga – MG, 2014.

DURAN, A. P; FRACARO, D. **Verificação das propriedades básicas do concreto industrializado fornecido em embalagens de 30Kg.** 2011. 64 f. Dissertação (Tecnólogo) – Curso Superior de Tecnologia em Concreto do Departamento Acadêmico de Construção Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba – PR, 2011.

FARIA, E. F. **Predição da exotermia da reação de hidratação do concreto através de modelo termo-químico e modelo de dados.** 2004. 130 f. Tese (Mestrado) – Curso de Ciências em Engenharia Civil - Programa de pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

FERNANDES, S. A. **Análise das deformações do concreto e do comportamento de vigas submetidas à flexão simples.** 1996. 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, SP 1996.

FURQUIM, P. R.V. **Estudo estatístico de produção de concretos com adições minerais.** 2006. 187 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Materiais de Construção Civil – Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), Santa Maria – RS, 2006.

FREITAS, E. G. A.; RODRIGUES; E. H. V.; ARAUJO; R. C. L.; FAY; I. **Efeito da adição de cinzas de bagaço de cana na resistência à compressão de argamassa normal.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998. Poços de Caldas-MG. Anais... Lavras: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1998. V.4, P.219-21

GABRICH, M. F. **Estudo da influência das adições minerais no comportamento do concreto sob ação do fogo.** 2008. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Materiais de Construção Civil – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 2008.

GALVÃO, J. C.A. **Estudo das propriedades dos concretos confeccionados com cimento CP V – ARI e CP II – F 32, sob diferentes temperaturas de mistura e métodos de cura.** 2003. 95f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e Processos) – Setor de Tecnologia– Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

GIONGO, J. S. **Concreto armado:** introdução e propriedade dos materiais. 2007.

GOBBI, A. **Atividade pozolânica de adições minerais pelas NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012: uma análise crítica a partir de métodos complementares.** 2014. 143 f. Tese (Mestrado) - programa de pós-graduação em engenharia de construção civil – PPGCEC - Universidade Federal do Paraná.

KOLLER, D. R. P.; PILECCO, D. S.; BOHRER, D.; GODOY, J.; FENSTERSEIFER, C. A. J. BARROSO, L. B. Avaliação da resistência à compressão de argamassa produzidas com vidro moído. **Disc. Scientia**. Série: Ciências Naturais e Tecnológicas, S. Maria, v. 8, n. 1, 17-23 p, 2007.

LAPA, J. S. **Patologia, recuperação e reparo das estruturas de concreto**. 2008. 56 f. Monografia-Especialização em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte- MG, 2008.

LAUDONIO, F. Cimento: produto é um dos itens mais importantes em uma construção. **Revista 14139 Engenharia Civil**, São Paulo-SP, v. n. 15, 1 p, dezembro. 2013.

LIMA, A. B. **O processo produtivo do cimento Portland**. 2011. 39 f. Monografia – Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, 2011.

LOPES, B. C. S.; BRITTO, A. F. S.; SARMENTO, A. P.; DELALIBERA, R.G. Análise da viabilidade da utilização da cinza de bagaço de cana-de-açúcar como substituição parcial do cimento Portland. **REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Goiás- Go, v.9, n.3, 32-40 p, semestral. 2014.

MANTUANO, R. N. **Materiais pozolânicos**. 2006. 148 f. Dissertação (Especialização) Construção Civil - Escola de Engenharia - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

MELADO, B. A. M. **Concretos**. 2014.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 782 p.

MODRO, N.L.R. **Desenvolvimento e caracterização de concreto de cimento Portland contendo resíduos poliméricos de pet**. 2008. 87 f. Dissertação (Mestrado) em Engenharia de Processos - Universidade da Região de Joinville, Joinville, 2008.

MOREIRA, C. C. **Características e desempenho da escória de alto forno como agregado para utilização em camadas granulares de pavimentos**. 2006. 13 f. Trabalho Técnico, Goiânia – GO, 2006.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888 p.

PAULA, M. O. **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland**. 2008. 60 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2006.

PAULA, M. O.; TINÔCO; I. F. F.; RODRIGUES; C.S.; SILVA; E. N.; SOUZA; C. F. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v. 13, n. 3, 353-357 p, outubro. 2008.

PEDROSO, F. L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Revista Concreto & Construções**, São Paulo-SP, v. n. 53, 1 p, jan./fev./mar. 2009.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. 13. ed. São Paulo: Globo, 1998. 307 p

PINHEIRO, L. M.; MUZARDO, C. D.; SANTOS, S. P.; CATOIA, T.; CATOIA, B. **Estruturas de concreto**. 2010.

PINHEIRO, L. M.; MUZARDO, C. D.; SANTOS, S. P. **Estruturas de concreto**. 2004.

POGGIALI, F. S. J.; SOARES, M. M. N.; BEZERRA, A. C. S.; PÁDUA, P. G. L. **Caracterização físico-química de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 2013, Gramado, RS Anais do 20º CBECIMAT- Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais, Joinville, SC, 2013.

REBMANN, M. S. **Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência**. 2011. 185 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos, 2011.

REZENDE, M. F. **Uso de cinza de bagaço de cana-de-açúcar em cimento Portland como mecanismo de desenvolvimento limpo**. 2006. 118 f. Tese (Doutorado) - Área de concentração: Análise e Seleção de Materiais – Universidade Federal de Ouro Preto -Escola de Minas - Rede Temática em Engenharia de Materiais - REDEMAT, Ouro Preto– Mg, 2016.

RIBEIRO, C.C.; PINTO, J. D.S.; STARLING, T. **Materiais de Construção Civil**. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2006. 101 p.

RIBEIRO, E. J. Propriedades dos materiais constituintes do concreto. **Revista Especialize Online IPOG**, Goiânia-GO, v. 01/2015 n. 10, dezembro. 2005.

RODRIGUES, C. S. **Efeito da adição da cinza de casca de arroz no comportamento de compósitos cimentícios reforçados por polpa de bambu.** 2008. 60 f. Tese (Doutorado) -Área de concentração: Estruturas – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, 2004.

SANTOS, A. M.; CABRAL, L. M. C.; MONTEIRO, E. B.; HELENE, P. R. L. Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico para diferentes dosagens de concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 2013, Gramado, RS **Anais do 55º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2013**, Gramado, RS: Instituto Brasileiro de Concreto, 2013.

SANTOS, L. R. G. **Estudo sobre o comportamento à tração na flexão de concretos reforçados com fibras de aço.** 2009. 76 f. Dissertação (Bacharelado) – Departamento de Tecnologia – Área de Materiais de Construção e Tecnologia das Construções– Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana – BA, 2009.

SILVA, D. R. **Estudo de inibidores de corrosão em concreto armado, visando a melhoria na sua durabilidade.** 2006. 194 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PPGCEM, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Natal - RN, 2006.

SILVA, G. J. B. **Estudo do Comportamento do Concreto de Cimento Portland produzido com a Adição do Resíduo de Polimento do Porcelanato.** 2005. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

SILVA, L. S.; FONSECA, J. M. M.; SOUZA, R. R.; OLIVEIRA, A. A.; BARRETO, E. C. M. **Viabilidade do uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em parcial substituição de cimento Portland.** In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA (CONTECC' 2016), 73., 2016. Foz do Iguaçu-PR.

VANDERLEI, R. D.; PEINADO, H. S.; NAGANO, M. F.; MOLIN FILHO, R. G. D. Cinza do bagaço de cana-de-açúcar como agregado em concretos e argamassas. **REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Goiás- Go, v.8, n.1, 21-31 p, semestral. 2014.

VASCONCELOS, E. J. O; AMARAL, R. C. R; MOURA, L. M. **GESTÃO AMBIENTAL: estudo de caso sobre a indústria de cimentos no município de Vespasiano.** 2016. Disponível em:

YAZIGI, W. **A Técnica de Edificar: Revista e Atualizada**. 10. ed. São Paulo: Pini, 2009. 769 p