

CIMENTO PORTLAND E AS ADIÇÕES DE POZOLONAS ARTIFICIAIS

Amanda de Oliveira Aguiar

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY
RIBEIRO**

Campos dos Goytacazes/RJ
Março / 2015

CIMENTO PORTLAND E AS ADIÇÕES DE POZOLONAS ARTIFICIAIS

Amanda de Oliveira Aguiar

Monografia apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para conclusão do curso de Licenciatura em Química.

Orientador: Prof. Dr. Luis César Passoni.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

MARÇO – 2015

CIMENTO PORTLAND E AS ADIÇÕES DE POZOLONAS ARTIFICIAS

Amanda de Oliveira Aguiar

Monografia apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para conclusão do curso de Licenciatura em Química.

Aprovada em 01/04/2015

Comissão Examinadora:

Prof. Me. Camila Ramos de Oliveira Nunes – IF Fluminense *campus* Itaperuna

Prof. Dra. Izabel de Souza Ramos – UNESA *campus* Campos dos Goytacazes

Prof. Dr. Luis César Passoni – LCQUI/CCT/UENF
(Orientador)

À minha família pela paciência

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família. Minha mãe Cláudia e meu pai Samuel, pelo amor, carinho e apoio que dedicaram à minha criação. Por me ensinar os valores e ter dado toda a estrutura pra seguir meus sonhos, ainda que no meio do caminho eu possa ter ficado perdida, mas o apoio em nenhum momento foi falho.

Às minhas irmãs Natália e Vanessa, só nós sabemos todos os perrengues vividos aqui, longe de toda nossa família. À minha avó Maria das Graças, que tornava a estadia aqui em Campos mais deliciosa, sempre mandando bolo e biscoitinhos. Ao meu afilhado Gabriel que entende a ausência da sua dinda e sabe que é por um bem maior.

Agradeço ao professor Luis Passoni, por ter sabiamente me orientado, mesmo com o meu tempo exíguo.

Às professoras Camila e Izabel por gentilmente participarem como membros da banca.

Sou particularmente agradecida ao meu namorado Marcelo pelo apoio, cumplicidade e compreensão durante todos esses anos (tá na hora de casar!!), e principalmente toda a sua família que me adotou como se fosse da mesma, a Martinha que cuidava de mim quando passava mal e me enche de presentes até hoje, ao meu sogro Marcelo que faz aquele churrasco que só ele sabe fazer, aos meus cunhados, muito obrigada.

Aos meus amigos que mesmo de longe me apoiaram e me deram força pra continuar, e acreditaram em mim nos momentos que até eu mesma duvidava da minha capacidade, obrigada Dani, Luciano e André.

Agradeço às minhas grandes amigas Camila e Kalyne, por deixarem minha graduação mais animada, obrigada pelo apoio e compreensão de vocês.

Obrigada a Deus por me dar força, coragem e perseverança que tanto pedi durante todos os meus longos dias longe da minha família e das pessoas queridas.

RESUMO

A procura cada vez maior de produtos industrializados tem aumentado exponencialmente a demanda por matérias-primas, e conseqüentemente a geração de resíduos sólidos. Esse fato exige um gerenciamento eficaz desses resíduos para assim minimizar o impacto ambiental. Foi realizada uma revisão bibliográfica de forma a apresentar soluções para a destinação de resíduos provenientes da agricultura juntamente com cimento Portland na construção civil, seja na adição do resíduo na fabricação do cimento Portland, ou na substituição do cimento Portland por esses resíduos na fabricação de concreto. As cinzas do bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz e folha de bananeira, possuem alto teor de dióxido de silício, o que as caracteriza como pozolanas artificiais, conforme vários estudos já demonstraram.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Consumo mundial de cimento (www.snic.com.br).....	10
Figura 2. Etapas de fabricação do cimento Portland. (www.quimicamix.blogspot.com.br)	14
Figura 3. O clínquer, antes da moagem. (www.quimicamix.blogspot.com.br).....	15
Figura 4. Curvas de resistência à compressão de pastas puras obtidas com os principais compostos do cimento Portland (Zampieri, 1989).	18
Figura 5. Evolução da hidratação dos compostos do cimento Portland, em estado puro. (Neville, 1997).....	19
Figura 6. Prensa hidráulica digital Fonte:(www.equipedebra.pini.com.br)	21
Figura 7. Evolução média de resistência à compressão dos distintos tipos de cimento Portland Fonte: www.abcp.org.br (acessado em 16/02/2015).	23
Figura 8. (a) Pasta de cimento sem aditivos, (b) Aditivo super plastificante, (c) Aditivo super plastificante e aditivo mineral de elevada finura. Adaptado de Mehta e Monteiro (2008)	24
Figura 9. Representação esquemática das formas cristalinas e amorfa da sílica – (a) cristalina; (b) amorfa. Fonte: Pouey, 2006.	33
Figura 10. Vista de um aterro com cinza de casca de arroz residual. Fonte: Pouey (2006).	35
Figura 11. Resistência a compressão simples dos corpos de prova das argamassas incorporadas com CCA para o traço 1:2:9, após períodos de cura de 28, 63 e 91 dias. Fonte: Bezerra et al 2011.....	37
Figura 12. Plantação da cana-de-açúcar em território nacional Fonte: http://meioambiente.culturamix.com/agricultura (acessado em 09/01/2013)	40
Figura 13. Resistência à compressão de argamassas com diferentes teores de cinza do bagaço de cana-de-açúcar em substituição ao cimento Portland. (Freitas et, al. 1998.)	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais compostos do cimento Portland.....	17
Tabela 2. Principais tipos de cimento Portland.....	22
Tabela 3. Classificação das pozolanas.	28
Tabela 4. Composição química do forno da empresa ArcelorMittal Tubarão.....	32
Tabela 5. Quantidade de cinza produzida para cada material queimado.....	33
Tabela 6. Composição química da CBC realizada por espectroscopia de fluorescência de raios X.....	42

LISTA DE ABREVIATURAS

a/c – Relação água/cimento em massas

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ARI – Alta Resistência Inicial

CAD – Concreto de Alto Desempenho

CBCA – Cinza do Bagaço da Cana-De-Áçúcar

CCA – Cinza de Casca de Arroz

C-S-H – Silicato de Cálcio Hidratado

C₃S – Silicato Tricálcico

C₂S – Silicato Bicálcico

C₃A – Aluminato Tricálcico

C₄AF – Ferroaluminato tetracálcico

CP – Cimento Portland

f_{ck} – Resistência Característica do Concreto à Compressão Especificada no Projeto Estrutural

NBR – Norma Brasileira Registrada

MPa – Mega Pascal

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	12
3. CIMENTO PORTLAND	13
3.1 A História	13
3.2 A Fabricação	14
3.3 Composição Química	15
3.3.1 Propriedades Químicas	17
3.3.2 Propriedades Físicas	20
3.4 Tipos de Cimento Portland	21
3.4.1 Adições minerais	23
4. POZOLANA	26
4.1 Materiais pozolânicos naturais e artificiais	27
4.1.1 Rochas vulcânicas.....	27
4.1.2 Argilas calcinadas.....	28
4.1.3 Metacaulim	28
4.1.4 Cinzas volantes – subproduto industrial	29
4.1.5 Escória de alto forno	30
4.1.5 Cinzas de subproduto da agricultura	32
5. SÍLICA – SiO₂	33
6. CINZA DA CASCA DE ARROZ	35
7. CINZA DA FOLHA DE BANANEIRA	38
8. CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR - CBCA	40
9. CONCLUSÃO	45
11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

1. INTRODUÇÃO

Para minimizar os impactos ambientais, ocasionados pelo consumo excessivo de matérias-primas e energia, estudos relacionados com questões ambientais estão cada vez mais em evidência. Diversas pesquisas estão sendo executadas com intuito de encontrar soluções para os resíduos gerados em diversos âmbitos, dando assim uma continuidade no resíduo, e evitando a disposição final do mesmo em aterros, ou qualquer outra forma de descarte, reduzindo assim o impacto ambiental (Calheiro, 2011).

Um dos principais materiais utilizados na engenharia, o concreto, é um dos maiores poluidores do meio. Um artigo publicado em 1964 por Brunauer e Copeland condicionava o concreto ao segundo material mais consumido pelo homem, sendo superado apenas pela água (Calheiro, 2011).

De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – SNIC em 2013 foram produzidos 70.160.775 toneladas de cimento no Brasil, sendo a Região Sudeste responsável por 47,71% dessa produção. A seguir tem-se um gráfico com o crescimento mundial do cimento, evidenciando o Brasil numa posição de destaque na produção de cimento perante o cenário mundial.

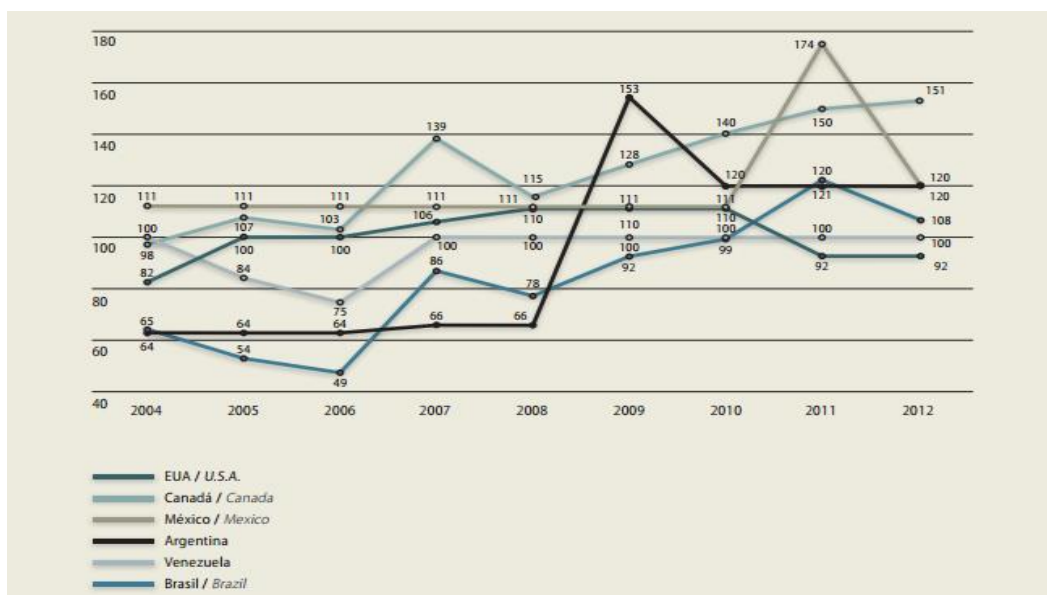


Figura 1. Consumo mundial de cimento (www.snic.com.br)

Devido ao crescimento populacional e ascensão social, observa-se um aumento na demanda por habitação, logo, por materiais de construção, cimento e concreto inclusive, levando à busca por alternativas, seja na redução do consumo ou no aproveitamento de subprodutos.

A construção civil é certamente um dos maiores geradores de resíduos de toda a sociedade. É considerada responsável por entre 15 e 50% do consumo dos recursos naturais extraídos do meio ambiente. Além da extração desses recursos, a própria produção dos materiais utilizados na construção também gera poluição, como poeira, CO₂ etc. Um dos materiais mais utilizados na construção civil, o cimento, gera CO₂ em sua produção, gás de grande importância para o efeito estufa, aproximadamente para cada tonelada de clínquer produzido mais de 600 kg de CO₂ são gerados e destinados ao meio ambiente (www.reciclagem.pcc.usp.br).

Para que uma construção seja considerada sustentável, ela deve basear-se na prevenção e redução dos resíduos pelo desenvolvimento de tecnologias limpas, no uso de materiais recicláveis ou reutilizáveis. Uma das maneiras viáveis de redução dos impactos está relacionada à produção de cimento Portland, que pode ser feito por meio de adição de subprodutos, como resíduos da agricultura e materiais reciclados no cimento (Calheiro, 2011).

Incorporando resíduos ao cimento Portland, suas características aglomerantes serão alteradas, todavia, nas devidas condições elas podem ser preservadas ou até mesmo aprimoradas. De acordo com a incorporação de resíduos ao cimento, seria possível uma redução de clínquer, dessa forma há uma diminuição nos impactos gerados pela indústria cimenteira, crucialmente os provenientes da emissão de CO₂ e energia de produção.

Há uma gama de subprodutos de origem renovável com alto potencial para geração de energia através da queima que podem ser utilizados nesse processo de produção do cimento Portland, entretanto não são tão explorados como deveriam. Alguns desses resíduos geram quantidades de cinza que possuem as condições específicas, como altas porcentagens de sílica e de outros óxidos, que possuem características pozolânicas.

2. OBJETIVOS

O presente estudo baseia-se numa revisão bibliográfica, o qual tem como objetivo apresentar opiniões de diversos autores sobre o cimento Portland e a adição de pozolanas artificiais na fabricação do cimento Portland, reduzindo assim a emissão de CO₂ no planeta, ou adicionando as cinzas no concreto, como parte do cimento, dessa forma, gastando menos do mesmo e conseqüentemente e conforme a adição anterior, ajuda na redução de CO₂, contribuindo assim para um mundo mais sustentável.

3. CIMENTO PORTLAND

3.1 A História

A origem do cimento inicia-se há cerca de 4.000 anos, grandes monumentos já utilizavam ligas compostas por mistura de gesso calcinado, como no Egito antigo. Já as grandes obras gregas e romanas foram construídas com solos de origem vulcânica, da ilha grega de Santorino, visto que eles possuíam propriedades de endurecimento a partir da ação da água. A palavra cimento é originada do latim *CAEMENTU*, que na Roma antiga era considerada uma espécie de pedra natural de rochedos. (ABCP, 2015).

De acordo com pesquisas realizadas pelo inglês John Smeaton, em 1756, obteve-se um produto de alta resistência por meio de calcinação de calcários moles e argilosos, da mesma forma o francês Vicat chegou ao mesmo produto e é considerado o inventor do cimento artificial. Em 1824, Joseph Aspdin construtor inglês, queimou pedras calcárias e argila, transformando-as num pó fino, e logo em seguida percebeu-se que a mistura tornava-se tão dura quanto pedras e não dissolvia em água, Joseph patenteou como cimento Portland, recebeu esse nome devido às características e propriedades de durabilidade e solidez próximas às rochas da ilha britânica de Portland. (ABCP, 2015).

O Brasil teve sua primeira fábrica de cimento instalada em 1892, com a produção do cimento “Santo Antônio”, mas o verdadeiro marco na história do país foi em 1926, quando os empresários brasileiros conseguiram desbancar a concorrência estrangeira com produtos nacionais de qualidade. (SNIC, 2015)

3.2 A Fabricação

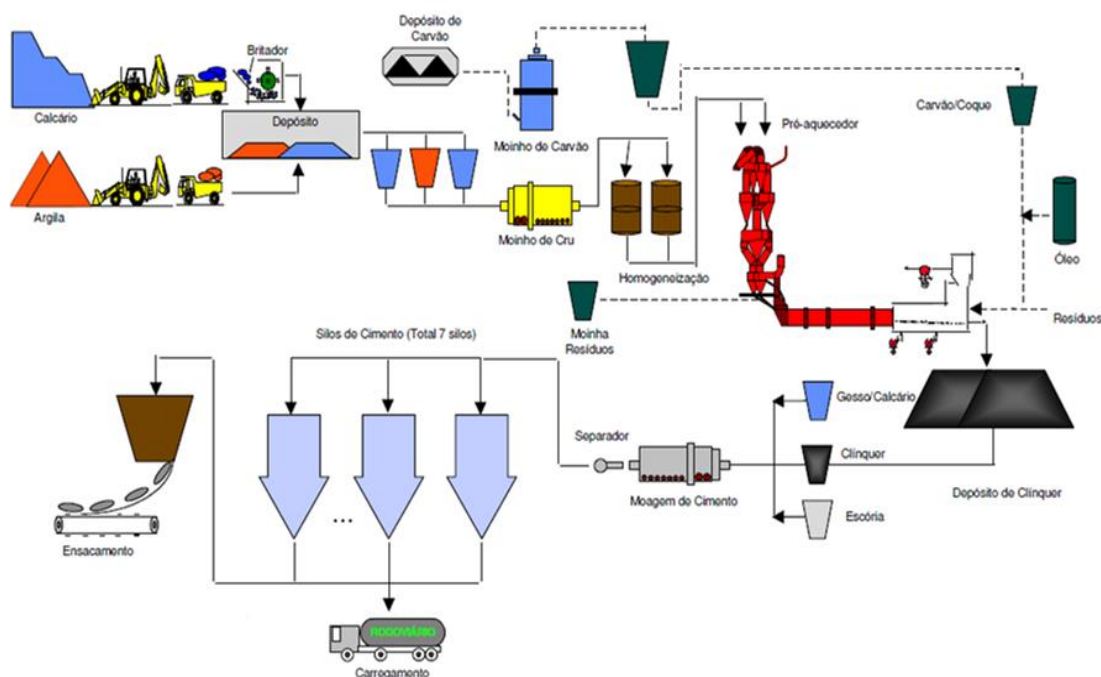


Figura 2. Etapas de fabricação do cimento Portland. (www.quimicamix.blogspot.com.br)

A fabricação pode ser descrita basicamente em seis principais etapas, sendo elas: extração da matéria-prima, britagem, moagem e homogeneização, queima/calцинаção, moagem do clínquer e estocagem.

A extração da matéria-prima pode ser feita pelas técnicas usuais de exploração de pedreiras, como detonação para rochas, técnicas de movimentação de terra por escavação para argilas.

As rochas retiradas são submetidas à britagem, com o intuito de reduzir o material a grãos, tornando-os num tamanho ideal para o processo. Em seguida o material britado é encaminhado para armazenamento em silos onde serão processados, e nessa etapa há duas formas de prosseguir, a via seca e a via úmida.

No processo de via seca, a matéria-prima é conduzida ao forno onde é devidamente seca, e posteriormente encaminhada para moagem, transformando o material granular em pulverulento homogêneo. Já no processo de via úmida há a adição de água no material granular, formando uma pasta, que é submetida a moinhos fazendo com que a pasta fique homogênea. Ainda que sejam feitos de

maneira diferente nesta etapa, a próxima etapa e as demais são realizadas de forma similar.



Figura 3. O clínquer, antes da moagem. (www.quimicamix.blogspot.com.br)

O material pulverulento ou a pasta são encaminhados para os fornos alimentados por óleo, gás ou carvão, que chegam à temperatura de 1450°C, transformando o material inicial em clínquer, que nada mais é que o cimento Portland em bolas, faltando ainda o processo de moagem e adições. O produto então acabado é ensacado e distribuído.

3.3 Composição Química

A Norma NBR 5732/1991 define o cimento Portland comum como “Aglomerante hidráulico obtido pela moagem do clínquer Portland ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos em teores especificados pela Norma”. (ABNT, 1991)

O cimento Portland é um material pulverulento, aglomerante hidráulico, composto basicamente de silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio que misturados à água se hidratam e depois de endurecidos, mesmo que sejam submetidos novamente à ação da água não se decompõe. (Petrucci, 1998)

Os constituintes fundamentais do cimento Portland são a cal (CaO), a sílica (SiO₂), a alumina (Al₂O₃), óxido de ferro (Fe₂O₃) e uma proporção de magnésia (MgO), há também outros constituintes menores e impurezas.

A cal, sílica e óxido de ferro são os componentes cruciais do cimento Portland, eles constituem geralmente 95 a 96% do total na análise de óxidos. A magnésia possui um limite máximo de 6,4% e óxidos menores apresentam uma proporção inferior a 1% e esporadicamente no máximo 2%.

As combinações químicas ocorrem na calcinação, devido à mistura de matérias-primas nas proporções convenientes. E formam os seguintes compostos relacionados abaixo:



Tabela 1. Principais compostos do cimento Portland

Nome do composto	Composição	Abreviação
Silicato Tricálcio (<i>alita</i>)	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
Silicato dicálcio (<i>belita</i>)	2CaO.SiO ₂	C ₂ S
Aluminato tricálcio	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
Ferroaluminato tetracálcio (<i>ferrita</i>)	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro 2008

A análise química dos cimentos Portland resulta na determinação das proporções dos óxidos inicialmente mencionados. As propriedades do cimento são diretamente relacionadas com as proporções dos silicatos e aluminatos, e as determinações dessas proporções podem ser realizadas através de uma operação chamada método de Bogue (Mehta e Monteiro, 2008).

O método de Bogue calcula parte da proporção total de cal, deduzindo-se, a princípio, as parcelas necessárias à formação do sulfato de cálcio e a cal livre, eventualmente encontrada. Determinam-se a seguir as proporções de cal necessária para formação do ferro aluminato de cálcio, aluminato tricálcico e de silicato bicálcico. O total na proporção original de óxido de cálcio é a seguir associado à proporção de silicato bicálcico já calculada, resultando na

determinação da proporção de silicato tricálcico. O restante de silicato bicálcico constitui o teor desse composto no cimento (Bauer, 2013).

Esse método não apresenta resultados precisos para a composição do cimento Portland, que pode variar em função das condições de operação do forno e do resfriamento do clínquer. As correções apropriadas são objetos de trabalho para diversos pesquisadores, sendo, entretanto, aceita a aplicação do método de Bogue como um instrumento de controle da mistura de matérias-primas no processo de fabricação do cimento (Bauer, 2013)

O conhecimento das proporções dos compostos integrantes do cimento é de suma importância para a correlação entre estes e as propriedades finais do cimento.

O silicato tricálcico (C_3S) é o maior responsável pela resistência em todas as idades, em especial no primeiro mês de cura. O silicato bicálcico (C_2S) possui maior relevância no processo de endurecimento em idades mais avançadas, sendo amplamente responsável pelo ganho de resistência de um ano ou mais. O aluminato tricálcico (C_3A) também tem contribuição na resistência, principalmente no primeiro dia (Mehta e Monteiro, 2008).

3.3.1 Propriedades Químicas

As propriedades químicas do cimento Portland estão relacionadas diretamente com o processo de endurecimento por hidratação.

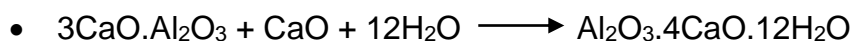
Num primeiro momento o silicato tricálcico (C_3S) se hidrolisa, ou seja, separa-se em silicato bicálcico (C_2S) e hidróxido de cálcio, este por sua vez, precipita como cristal da solução supersaturada de cal (Bauer, 2013)

Por conseguinte, o silicato bicálcico presente, resultante da hidrólise, combina-se com água no processo de hidratação, adquirindo duas moléculas de água e depositando-se, a temperaturas elevadas, no estado de gel. Quando realizado em altíssimas temperaturas, esse processo resulta numa estrutura de natureza cristalina. Os dois últimos constituintes principais do cimento, o aluminato tricálcico e o ferro aluminato de cálcio se hidratam, resultando, do

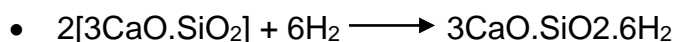
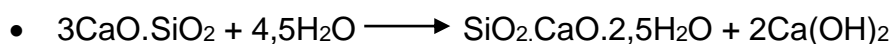
primeiro, cristais de variado conteúdo de água e, do segundo, uma fase amorfa gelatinosa (Bauer, 2013)

De um modo geral, o aluminato tricálcico é considerado o responsável pelo início imediato do processo de endurecimento, o produto nessas condições é considerado de pega rápida, e, portanto para a construção civil, é considerado um material inútil, pois impossibilita o seu manuseio. Para tanto, corrige-se essa falha com adição de sulfato de cálcio hidratado natural ($2\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), ou seja, gipsita, essa adição é feita no clínquer antes da moagem do mesmo. De forma resumida, segue algumas das principais reações de hidratação:

1. Aluminato tricálcico – Primeiro a reagir:



2. Alita - reage após o aluminato:



3. Belita - reage tardiamente:

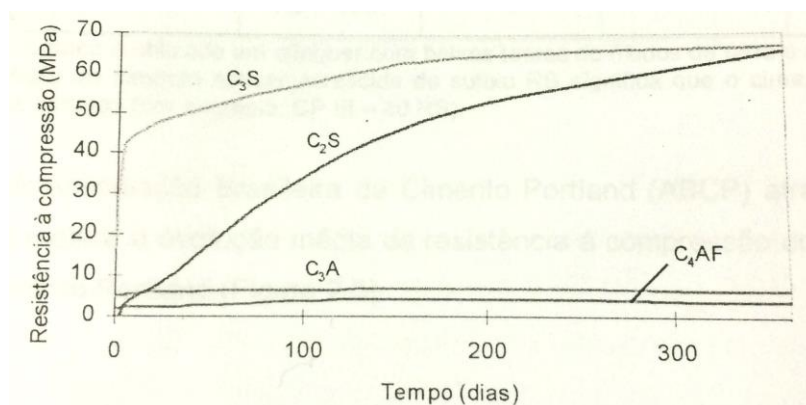
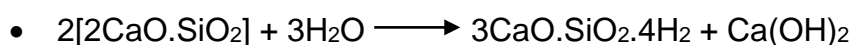
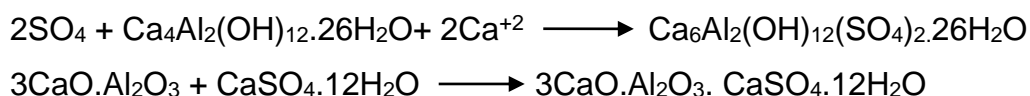


Figura 4. Curvas de resistência à compressão de pastas puras obtidas com os principais compostos do cimento Portland (Zampieri, 1989).

Estudos comprovam que esse retardamento da pega provocado pela gipsita, ocorre pelo fato de ser muito baixa a solubilidade dos aluminatos anidros em soluções supersaturadas de gesso. A absorção do sulfato ocorre lentamente devido a produção de sulfoaluminato de cálcio e outros compostos que, precipitados, abrem caminho para a solubilização dos aluminatos mais responsáveis pelo início da pega. (Neville, 1995)

4. Gesso - reação de retardo do endurecimento:



Durante o processo de endurecimento do cimento, uma quantidade de calor se desenvolve nas reações de hidratação, essa energia térmica produzida é de grande interesse para o engenheiro, haja vista que a elevação da temperatura, conduz ao aparecimento de trincas de contração ao fim do resfriamento da massa. O desenvolvimento de calor varia com a composição do cimento, sua finura é diretamente proporcional a sua reatividade, todavia, os custos com a moagem e o calor liberado na hidratação impõem limites no processo de redução das partículas.

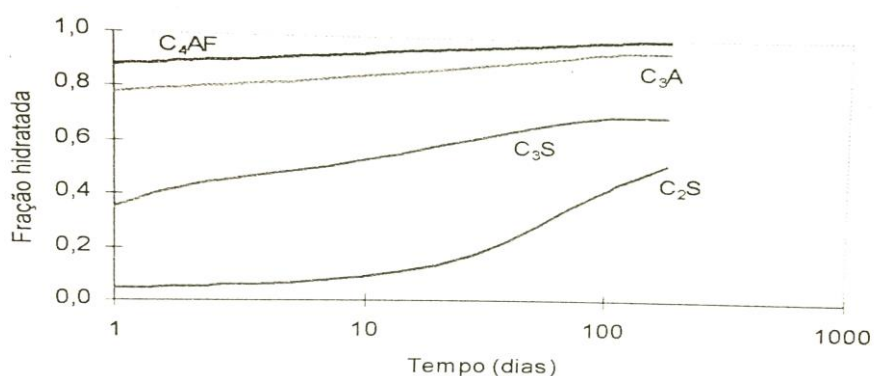


Figura 5. Evolução da hidratação dos compostos do cimento Portland, em estado puro. (Neville, 1997).

De forma sucinta, pode ser dito que a influência de cada componente no cimento referente ao desenvolvimento das resistências à compressão é assegurada:

- até três dias – pela hidratação dos aluminatos e silicatos tricálcicos ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ e $3\text{CaO} \cdot \text{Si}_2\text{O}$);
- até os 7 dias – pelo aumento da hidratação da alita ($3\text{CaO} \cdot \text{Si}_2\text{O}$);
- até os 28 dias – com a continuidade da hidratação da alita, responsável pelo aumento da resistência, com pequena contribuição da belita ($2\text{CaO} \cdot \text{Si}_2\text{O}$);
- acima de 28 dias – pela hidratação da belita (Metha e Monteiro, 2008).

3.3.2 Propriedades Físicas

As propriedades físicas do cimento Portland, são consideradas em três aspectos diferentes, suas propriedades em estado natural, ou seja, o pó, na sua mistura com água, e a mistura com água e agregados.

A finura do cimento é o fator que rege a velocidade da reação de hidratação do mesmo e tem também influência na qualidade da pasta, argamassa ou concreto. Quanto maior a finura, melhor a resistência, particularmente a primeira idade, aumentando a impermeabilidade, a trabalhabilidade e a coesão, e conseqüentemente, diminui a exsudação e outros tipos de segregação. (Bauer, 2013)

A exsudação é um fenômeno que se caracteriza pela separação espontânea da água na mistura, é um tipo de segregação, que pode ocorrer por diversos fatores, principalmente pela diferença de densidade entre o cimento e a água e acarreta numa heterogeneidade indesejável. A trabalhabilidade já é considerada uma noção subjetiva, ela é definida como o estado que oferece maior ou menor facilidade de manuseio com o concreto fresco.

As especificações brasileiras que determinam os limites da finura do cimento estão descritas nas NBR 5732 (EB-1) e NBR 5733 (EB-2), onde prescrevem limite de retenção em peneira.

O tempo de pega é um fenômeno que compreende a evolução das propriedades mecânicas da pasta no início do processo de endurecimento, ele é definido como o momento em que a pasta adquire uma considerável consistência que impossibilita seu manuseio (Bauer, 2013).

A resistência mecânica dos cimentos é caracterizada de acordo com a ruptura à compressão de corpos-de-prova realizados com argamassa ou concretos. A NBR 7215 (MB-1) define as especificações da forma do corpo-de-prova, o traço da argamassa, consistência e o tipo de areia empregado.



Figura 6. Prensa hidráulica digital Fonte:(www.equipedeoobra.pini.com.br)

3.4 Tipos de Cimento Portland

A primeira escolha que deve ser feita antes de produzir uma pasta (aglomerante + água), argamassa (aglomerante + água + agregado miúdo) ou concreto (argamassa + agregado graúdo), é o tipo de cimento, pois sua natureza está relacionada ao processo de hidratação, na consistência, resistência, e demais propriedades do concreto fresco ou endurecido (Petrucci, 1998).

A Tabela 2 demonstra alguns tipos de cimento Portland, segundo a ABNT.

Tabela 1. Principais tipos de cimento Portland

Tipo de cimento portland	Classe	Finura		Tempos de pega		Expansibilidade		Resistência à compressão				
		Resíduo na peneira 75 mm (%)	Área específica (m ² /kg)	Início (h)	Fim (h)	A frio (mm)	A quente (mm)	1 dia (MPa)	3 dias (MPa)	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)	91 dias (MPa)
CP I CP I-S	25	≤ 12,0	≥ 240	≥ 1	≤ 10 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	-
	32		≥ 260						≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	
	40	≤ 10,0	≥ 280						≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	
CP II-E CP II-Z CP II-F	25	≤ 12,0	≥ 240	≥ 1	≤ 10 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	-
	32		≥ 260						≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	
	40	≤ 10,0	≥ 280						≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	
CP III ⁽²⁾	25	≤ 8,0	-	≥ 1	≤ 12 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 32,0 ⁽¹⁾
	32								≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	≥ 40,0 ⁽¹⁾
	40								≥ 12,0	≥ 23,0	≥ 40,0	≥ 48,0 ⁽¹⁾
CP IV ⁽²⁾	25	≤ 8,0	-	≥ 1	≤ 12 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 32,0 ⁽¹⁾
	32								≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	≥ 40,0 ⁽¹⁾
CP V-ARI		≤ 6,0	≥ 300	≥ 1	≤ 10 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	≥ 14,0	≥ 24,0	≥ 34,0	-	-

Fonte: www.abcp.org.br (acessado em 16/02/2015)

O CP I ou cimento Portland Comum, é um cimento que não possui adições a não ser o gesso. Ele é trivial, utilizado nos trabalhos gerais de construção, onde

não há exigências especiais do cimento, geralmente onde não há exposição a sulfatos do solo ou de águas subterrâneas.

O CP II ou cimento Portland Composto, quando comparado com o anterior, gera calor numa velocidade menor, tem o seu uso indicado em lançamentos maciços de concreto, onde o grande volume da concretagem e a superfície relativamente pequena reduzem a capacidade de resfriamento da massa, e apresenta melhor resistência ao ataque dos sulfatos contidos no solo.

O CP III ou cimento Portland de Alto Forno possui maior impermeabilidade devido a sua finura, durabilidade, baixo calor de hidratação e resistência a sulfatos. Usualmente em obras como barragens e peças de grandes dimensões.

O CP IV ou Pozolânico é pouco utilizado atualmente, possui um calor de hidratação muito baixo, isso se deve ao fato de conseguir uma redução nas proporções de C_3A e C_3S , é destinado para obras volumosas.

O CP V ou cimento Portland de Alta Resistência Inicial (ARI), como o próprio nome já diz, possui valores elevados de resistência à compressão com 1 dia de idade, chega a aproximadamente a 26 MPa no primeiro dia e 53MPa aos 28 dias. Essa característica é consequência de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer e principalmente numa moagem mais eficaz. É recomendado no preparo de concreto e argamassa para produção de artefatos de cimento, elementos arquitetônicos pré-moldados e pré-fabricados, pode ser utilizado em todas as aplicações onde há necessidade de resistência inicial elevada e desfôrma rápida e obras em climas de baixa temperatura.

Os demais tipos de cimento têm o seu emprego em obras muito específicas, assim como o CP- RS (Resistente a Sulfato) costuma ser usado em estações de tratamento de esgoto e o CP Branco, em obras onde requer um melhor acabamento.

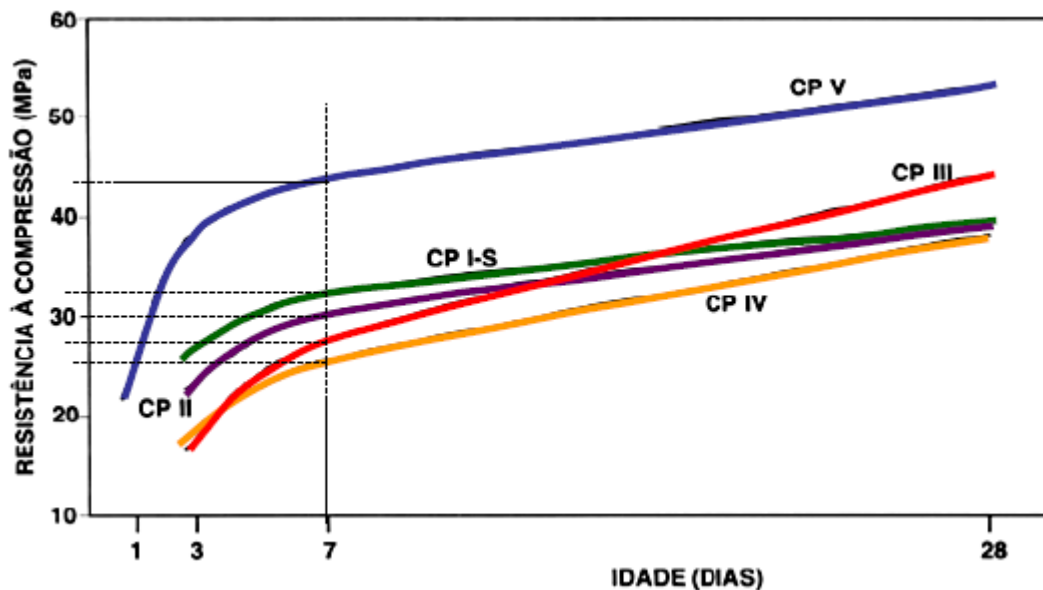


Figura 7. Evolução média de resistência à compressão dos distintos tipos de cimento Portland Fonte: www.abcp.org.br (acessado em 16/02/2015).

3.4.1 Adições minerais

Conforme a NBR 11172/1990, é recomendado que o termo “adição” seja para se referir a “produto de origem mineral adicionado aos cimentos, argamassas e concretos, com a finalidade de alterar suas características” e o termo “aditivo” para “produto químico adicionado em pequenos teores às caldas, argamassas e concretos, com a finalidade de alterar suas características no estado fresco e/ou endurecido”.

Os aditivos minerais se distinguem dos aditivos químicos no sentido de acrescentar ou substituir o cimento devido às suas propriedades semelhantes às do cimento, ao passo que os aditivos químicos alteram as características do cimento, sem alterar sua proporção na composição do mesmo, em conformidade com Moraes (2012).

Segundo Cordeiro (2006), os aditivos minerais podem se caracterizar como materiais utilizados concomitante com o cimento Portland com o propósito de proporcionar um maior desempenho tecnológico, podendo haver redução dos custos de produção em função da substituição de uma parcela de clínquer por materiais energeticamente menos nobres, uma vez que os aditivos minerais são obtidos normalmente a partir de resíduos industriais ou agroindustriais.

Cordeiro (2006) sugere ainda, que além dos benefícios tecnológicos e econômicos, o uso de aditivos minerais pode reduzir impactos ambientais, tendo em vista o aproveitamento de resíduos, a preservação de jazidas de calcário e argila, menor emissão de CO₂ e outros gases intensificadores do efeito estufa (CO, CH₄, NO₂ e SO₂) que são produzidos no processo de fabricação do cimento Portland.

Quando adicionadas ao concreto, as adições minerais fazem com que a porosidade e a conectividade entre os poros diminuam, devido essa baixa porosidade, ocorre à diminuição do volume de vazios do concreto, a redução de fissuras térmicas provocadas pelo baixo calor de hidratação, aumento da resistência final e redução da permeabilidade (Winslow, 1994).

O efeito *filler*¹ ocorre através das adições minerais enquanto não se iniciam as reações pozolânicas, como partículas inertes e não aglomerantes, e por terem uma finura muito maior que o cimento, elas tendem a preencher os espaços existentes que seriam ocupados pelo ar (Lacerda, 2005). Abaixo, na Figura 8, representamos o efeito *filler*, através da ação simultânea de um aditivo mineral de elevada finura, um aditivo químico super plastificante, cimento Portland e água.

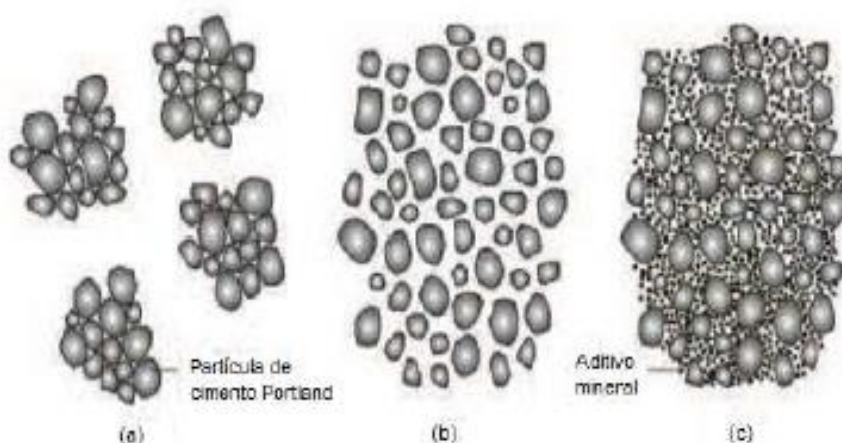


Figura 8. (a) Pasta de cimento sem aditivos, (b) Aditivo super plastificante, (c) Aditivo super plastificante e aditivo mineral de elevada finura. Adaptado de Mehta e Monteiro (2008)

Partículas muito finas de cimento Portland, poderiam, teoricamente, proporcionar o mesmo efeito físico, assim como as partículas de aditivo mineral, entretanto, elas dissolvem-se rapidamente quando entram em contato com água (Malhotra e Mehta, 1996).

¹ Agregado mais fino, constituído por partículas minerais menores que 0,0075 mm.

Enfim, é importante salientar que as adições minerais melhoram as propriedades do concreto, todavia, não deve esperar que possam compensar a baixa qualidade dos constituintes do concreto.

4. POZOLANA

Pozolana é caracterizada como material de composição silicosa ou aluminosilicosa, que por si só, quase não tem propriedades hidráulicas, entretanto, quando finamente divididos e na presença de umidade em temperatura ambiente reagem com o Ca(OH)_2 formando compostos com propriedades cimentícias (NBR 12653, 1992; Bauer, 2013). Seu nome é dado devido à descoberta de rochas vulcânicas que foram encontradas no sul da Itália, numa região chamada Pozzuoli, essas rochas quando moídas e misturadas com cal e água produzem um composto semelhante ao cimento.

As pozolanas podem ser naturais, sendo geradas a partir do intemperismo de rochas vulcânicas, ou artificiais, quando a argila é submetida a altas temperaturas, ou ainda, subprodutos industriais, como escória de alto forno, cinzas volantes, cinzas de casca de arroz, cinza do bagaço da cana-de-açúcar, entre outros (Leite e Molin, 2002).

Para determinação de atividade pozolânica, os materiais devem apresentar características básicas como reagir com Ca(OH)_2 em temperatura ambiente por um tempo não muito longo e formar compostos aglomerantes e insolúveis em águas similares aos obtidos na hidratação do cimento Portland (Montanheiro, *et al.*, 2002).

A adição de pozolana ao cimento em meios agressivos acarreta num ganho de resistência, diminui o calor de hidratação, impermeabiliza os capilares formados pelos produtos de hidratação do cimento, diminui a segregação de agregados, propicia uma maior trabalhabilidade, fazendo com que o mesmo fique nas condições ideais em aplicações que exigem baixo calor de hidratação (Martins, A. *et al.*, 2010).

Quando as indústrias do cimento utilizam esse material, há uma redução nos custos de produção, minimiza os impactos ao meio ambiente, além das vantagens para o produto, como o ganho de resistência com a ação da água (Yamamoto, 2000).

Tabela 3. Classificação das pozolanas.

Classe	NBR 12653/92
N	Pozolanas de origem natural ou artificial, materiais vulcânicos, terras diatomáceas e argilas calcinadas.
C	Pozolana produzida pela combustão de carvão mineral oriundo de usinas termoeletricas.
E	Pozolanas não enquadradas nas classes anteriores.

Fonte ABNT, NBR 12653/92.

4.1 Materiais pozolânicos naturais e artificiais

“Pozolona é um material silicoso ou sílico-aluminoso que em si mesmo possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas numa forma finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com hidróxido de cálcio a temperaturas ambientes para formar compostos com propriedades cimentantes” (Mehta e Monteiro, 1994).

Conforme a NBR 12653/2014 (ABNT, 2014), pozolanas naturais são materiais de origem vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido (65% de SiO₂), ou de origem sedimentar, com atividade pozolânica. Sua composição química é formada por uma combinação de sílica, alumina e quantidades menores de outros compostos como, cálcio, magnésio, ferro, potássio e sódio.

Netto, 2006, propõe que as pozolanas naturais podem apresentar algumas variações em suas propriedades à medida que variam os componentes ativos das rochas, suas características físicas e mineralógicas.

As pozolanas artificiais são materiais com atividade pozolânica oriundas de processos industriais ou provenientes de tratamento térmico. Exemplos de pozolanas artificiais: argilas calcinadas, metacaulim, cinzas volantes, escória de alto forno, cinzas de casca de arroz, cinza de bagaço de cana-de-açúcar, entre outras (Netto, 2006, Pontes, 2011).

4.1.1 Rochas vulcânicas

Rochas vulcânicas são consideradas pozolanas naturais, são formadas a partir do magma, provenientes das erupções vulcânicas e de cinzas vulcânicas

soltas. O processo de resfriamento, passando do estado líquido para o sólido é muito rápido, impedindo a cristalização dos minerais, formando uma estrutura vítrea. O basalto e a obsidiana são exemplos de rochas vulcânicas (Pontes, 2011).

4.1.2 Argilas calcinadas

A argila calcinada é um importante material natural, utilizada em diversas indústrias como matéria prima na fabricação de materiais cerâmicos e agregados, além de ser empregado em outras indústrias, seja como aditivo na fabricação do papel e borracha, dentre outros. As argilas são constituídas de pequenos minerais cristalinos, originadas do intemperismo de rochas sedimentares compostas de óxidos e grãos finos de silicatos de alumínio. Suas partículas são menores que $1/256$ mm ou $4\mu\text{m}$ de diâmetro (Caputo, 2012).

Há diversos grupos de minerais argilíficos, os de maior destaque são a caulinita, montmorilonita e illita. A caulinita é formada alternadamente por silício e alumínio ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$). Quando ela sofre processo de industrialização, sendo submetida a queima em elevadas temperaturas, recebem o nome de argilas calcinadas, a queima da mesma, altera sua estrutura molecular, tornado um material amorfo e altamente reativo. Esse material possui características pozolânicas, podendo ser originados de rejeitos de tijolos moídos ou ter uma fabricação própria, como é o caso do metacaulim. O que diferencia o rejeito cerâmico do metacaulim é a pureza de suas composições, sendo o metacaulim um material produzido exclusivamente com a finalidade de ser pozolânico, e por isso, sua produção segue um rigoroso controle e prospecção das argilas (Yamamoto, 2000, Netto, 2006).

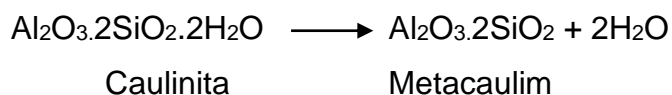
4.1.3 Metacaulim

Assim como já foi dito anteriormente, o metacaulim é um material pozolânico artificial, fabricado a partir da extração de material argiloso, derivados do caulim, com baixo teor de ferro e de cor branca, calcinados em temperaturas aproximadamente 800 a 900°C , em seguida segue para moagem.

No Brasil há grandes reservas de caulim, que além de ser a principal matéria prima do metacaulim, é utilizado também na produção de papel, tintas

cerâmicas, borrachas, plásticos, fibras de vidro e demais finalidades (Luz, *et al.* 2005).

A composição química dos argilominerais cauliníticos é formada por silicatos de alumínio hidratados que, quando calcinados a elevadas temperaturas, perde os íons hidroxilas de suas estruturas cristalinas, formando o metacaulim, segundo a reação abaixo (Nascimento, 2009). A caulinita é transformada em metacaulinita por meio de um processo de calcinação, onde durante o processo de calcinação, ocorre uma desidroxilação da mesma, ou seja, perde água da sua estrutura cristalina, dando origem a uma estrutura amorfa, conforme a reação abaixo.



Esse material se torna altamente reativo com os compostos do cimento, principalmente com hidróxido de cálcio, devido a formação de uma estrutura amorfa após sua calcinação (Nascimento, 2009).

O metacaulim pode ser classificado segundo a sua reatividade, podendo ser, baixa, média ou alta, dependendo do nível de pureza das argilas cauliníticas. É um material produzido com a finalidade de atender o mercado como adição pozolânica na produção de cimento e/ou concreto agregando alguns benefícios ao produto final. Existem poucas empresas no Brasil destinadas a fabricação de metacaulim, mas o mercado para esse produto vem crescendo bastante, devido ao grande número de empresas que produzem cimento e concreto estarem utilizando o material pozolânico (Santos, 2012).

4.1.4 Cinzas volantes – subproduto industrial

O carvão é uma das principais fontes de energia da humanidade, podendo ser vegetal, obtido após a queima de madeira, ou mineral, formado a partir da sedimentação de resíduos orgânicos, sendo encontrado no subsolo terrestre e extraído pelo sistema de mineração. O carvão vegetal é muito utilizado como combustível para lareira, churrasqueira, fogões a lenha, além de abastecer alguns setores da indústria, enquanto que o carvão mineral é um dos combustíveis fósseis responsáveis pela produção de energia elétrica (Câmara de Comercialização de energia elétrica – CCEE).

Segundo a CCEE, o carvão é responsável por 39% de toda a energia gerada no mundo. NO Brasil, a principal produção de energia, vem de usinas hidroelétricas, produzindo cerca de 95% da energia gerada. Somente em regiões distantes das hidroelétricas centrais, com poucos recursos hidrográficos e com boas reservas naturais de óleo, carvão ou gás se utilizam energia produzida em termoelétricas. Sua geração é maior quando há um período de estiagem muito grande, o que prejudica a geração de energias hidroelétricas.

Na combustão do carvão em altas temperaturas, para a produção de energia elétrica, dois tipos de cinzas são formados, que são as cinzas mais pesadas e as cinzas volantes. As cinzas volantes são as cinzas de textura mais finas, que são levadas pelos gases de combustão das fornalhas da caldeira e abatidas por precipitadores eletroestáticos. Já as cinzas pesadas, são as cinzas mais espessas, que caem no fundo da fornalha, em tanques de resfriamento e removidas hidráulicamente por fluxos de água (Netto, 2006).

As cinzas volantes são compostas por silício e alumínio com baixos teores de ferro e menores quantidades de Mg, Ca, Ti, P, S, Na e K. O teor de dióxido de sílica (SiO_2) influencia na pozolanicidade da cinza, visto que a sílica amorfa é que reage com a cal livre e a água no concreto, dando origem a quantidade maiores de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) (Netto, 2006).

Ainda de acordo com o autor, a adição de cinzas volantes no concreto, contribui para melhorar várias características do mesmo, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido. Retarda o tempo de início e fim de pega, melhora a trabalhabilidade, diminui o calor de hidratação, reduz a exsudação e a segregação de concretos, reduz a permeabilidade, e promove resistência mecânica superiores em idades avançadas. Um dos aspectos negativos com relação ao uso das cinzas é a falta de uniformidade das características das cinzas podendo ocorrer variações significativas entre diferentes procedências e lotes de fornecimento.

4.1.5 Escória de alto forno

A escória de alto forno é um resíduo da produção do ferro gusa em alto forno para a produção do aço. O processo de produção do aço é feito em três etapas, sendo a primeira a redução, em seguida o refino e depois a laminação. No processo de redução, o minério de ferro entra no alto forno em forma granular

e é aquecido em temperaturas a mais de 1400°C, juntamente com o coque ou carvão vegetal. O calcário, também é adicionado à mistura, e trabalha com um fundente das impurezas do minério de ferro, formando as escórias. O resultado de todo esse processo é o ferro líquido, chamado de ferro gusa. A etapa seguinte do processo é o refino, onde o ferro gusa é transformado em aço, mediante a queima de impurezas e adições (Gerdau, 2015).

Quando o minério de ferro é submetido a elevadas temperaturas, suas impurezas são separadas e podem ser removidas. Essa massa que é removida é a escória de alto forno (Thomaz, 2012). Segundo o autor, em siderurgias que operam altos fornos a carvão de coque são gerados 200 a 300 kg de escória por tonelada de ferro gusa.

O processo de resfriamento das escórias é feito de duas formas. A primeira é ao ar ou cristalizada, onde as mesmas são vazadas em um estado líquido em pátios apropriados e são resfriados ao ar. Esta é denominada de escória bruta de alto forno, que devido ao seu lento processo de resfriamento, os seus componentes formam distintas fases cristalinas, e com isto, não adquirem poder de aglomerante hidráulico. A segunda forma é resfriada com água ou granulada, onde ela é resfriada bruscamente por meio de jatos de água sob alta pressão. “Não havendo tempo suficiente para formação de cristais, a escória se granula vitrificando, e recebe o nome de escória granular de alto forno” (Arcelormittal, 2015).

A composição química da escória de alto forno tem poucas variações e depende da matéria prima e do tipo de ferro gusa, mas basicamente, é constituída de óxidos de cálcio, silício, alumínio e magnésio, além de quantidades menores de óxidos de ferro, manganês, titânio e enxofre. Na tabela 3 é demonstrada a composição química da escória de alto forno.

Tabela 4. Composição química do forno da empresa ArcelorMittal Tubarão.

FeO	0,45%
SiO ₂	33,65%
Al ₂ O ₃	12,42%
CaO	41,60%
MgO	7,95%
TiO	0,73%

Fonte: www.cst.com.br

4.1.5 Cinzas de subproduto da agricultura

Tal como as cinzas citadas, segundo Lima *et al.*, 2007, qualquer cinza vegetal, desde que em estado amorfo, finura adequada e composição química com elevado teor de sílica podem ser empregados como adição mineral. A adição mineral não só diminui o custo da produção de concretos e argamassas, por serem energeticamente mais econômicos, como propicia a redução da reação álcali-agregado e do calor de hidratação gerado pelos cimentos (Kanning, 2010). Segue abaixo uma tabela com o levantamento da porcentagem de cinza gerada durante a queima de alguns materiais.

Nesse trabalho, daremos ênfase aos trabalhos realizados com cinza de folha de bananeira, cinza da casca de arroz e cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

Tabela 5. Quantidade de cinza produzida para cada material queimado Mehta (1994); Cincotto e Kaupatez (1988); Kanning (2010) e Romero (2011).

Produto	Cinza (% em massa)	Produto	Cinza (% em massa)
MEHTA (1992)		CINCOTTO E KAUPATEZ (1988)	
Folha de trigo	10,0	Bagaço de cana-de-açúcar (seco)	0,5
Folha e talo de girassol	11,0	Amendoim	3,0
Folha de milho	12,0	Mamona	9,0
Folha de sorgo	12,0	Casca de arroz	18,0
Palha de arroz	14,0		
Bagaço de cana-de-açúcar (úmido)	15,0		
Casca de arroz	20,0		
KANNING (2010)		Folha de bananeira	10,57
ROMERO (2011), FIESP/CIESP (2001)		Bagaço de cana-de-açúcar	2,4*

* - 2,4% de cinza que apresenta também na sua constituição pó de carvão e areia de quartzo.

5. SÍLICA – SiO₂

O composto químico formado por oxigênio e silício é denominado dióxido de silício ou sílica, e pode ser encontrado na natureza em várias formas, seja puro, hidratado ou mineral. Encontra-se a sílica pura em rochas de quartzo, na areia, arenitos e quartzitos. Já na forma hidratada, é encontrada na opala, e por último, na sua forma mineral, encontra-se em associações que dão origem a feldspatos e silicatos, dentre outros (Della, 2011).

As características da sílica podem ser descritas como alta refratariedade, resistência a ataques químicos e a variações de temperatura acima de 600°C, baixa condutividade térmica, resistência mecânica e quando cristalina poliformismo acentuado (Fonseca, 1999).

Como componente básico das cerâmicas, a sílica também é empregada como matéria-prima para fabricação de vidros, refratários, isolantes térmicos e abrasivos. Na construção civil, em forma de areia, a sílica é usada como matéria-prima de vários materiais, tal como concreto e argamassas. A sílica ativa, normalmente é proveniente de subproduto de processo de fabricação de silício metálico e ligas de ferro-silício, e pode ser empregada como adição mineral na confecção de concretos convencionais e de alto desempenho.

A estrutura da sílica pode ser amorfa ou cristalina, a Figura 9 apresenta a diferença entre elas comparando um esquema de rede cristalina (a) com a de um retículo aleatório de sílica vítrea (b).

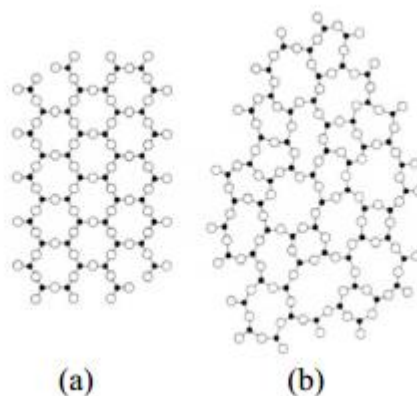


Figura 9. Representação esquemática das formas cristalinas e amorfa da sílica – (a) cristalina; (b) amorfa. Fonte: Pouey, 2006.

A sílica amorfa é um material de fácil moagem e, quando moído é altamente reagente. Pode ser obtido a partir da casca de arroz nos processos de queima rápida e baixas temperaturas, inferior a 700°C. Suas propriedades principais são a baixa condutividade e elevada resistência ao choque térmico.

A estrutura da sílica vítrea é metaestável e com isso, tem a tendência de mudar-se lentamente para a forma cristalina mais estável, de menor energia livre. Entretanto, em temperatura ambiente, a mudança ocorre de forma exponencialmente lenta. Se for mantida em temperatura acima de 870°C, por longo período, recristaliza-se em cristobalita e eventualmente em tridimita, se as condições forem favoráveis, ou seja, se houver a presença de agente catalisador principalmente íons alcalinos que promovem sua formação (Pouey, 2006).

6. CINZA DA CASCA DE ARROZ

A casca de arroz é o revestimento ou capa protetora formada durante o crescimento do grão, possui baixa densidade e elevado volume. É considerado um material fibroso, sendo constituído por celulose (50%), lignina (30%) e resíduos inorgânicos (20%). O resíduo inorgânico contém aproximadamente 95 a 98%, em peso, de sílica em sua forma amorfa hidratada, sendo 13 a 29% do total da casca (Pouey, 2006).

A utilização da casca de arroz tem um vasto leque de abrangência e vem sendo estudada por diversos autores, seja na utilização na agropecuária como fertilizante, em indústria cerâmica, geração de energia a partir do seu alto poder calorífico, como combustível alternativo dentro das próprias indústrias, na construção civil, associada à argila, pode ser empregada na fabricação de tijolos, painéis e telhas com bom isolamento de calor e ainda concretos de baixa densidade.



Figura 10. Vista de um aterro com cinza de casca de arroz residual. Fonte: Pouey (2006).

A cinza de casca de arroz (CCA) é um resíduo da cadeia produtiva do arroz, é um material leve, volumoso e altamente poroso Segundo Silveira e Dal Molin (1995), pode ser reduzido a pó fino com um consumo de energia relativamente baixo.

Através do processo de combustão podemos obter a cinza da casca de arroz, esse processo depende da combinação de três variáveis, tipo de equipamento utilizado (a céu aberto, fornalhas tipo grelha ou leito fluidizado), temperatura de queima e tempo de exposição durante o processo.

A combustão controlada pode ser um método eficiente para liberar a sílica da casca de arroz, entretanto, as propriedades de SiO_2 depende significativamente das condições que prevalecem durante a combustão. A CCA tende a ter a cor preta devido à presença de carbono residual, no entanto, ela também pode ser cinza, púrpura ou branca dependendo das impurezas presentes e das condições de queima.

As cinzas são caracterizadas segundo diversos parâmetros, como composição química, estrutura, cor e área superficial. Conforme já foi descrito acima, as cinzas possuem elevados teores de sílica, a temperatura e o tempo ainda que não influenciem na composição química, são fatores determinantes na estrutura mineralógica da cinza.

Mohanty (1974) propôs o uso da CCA na manufatura do cimento, testando misturas de clínquer Portland, gesso e com duas amostras diferentes de CCA, variando suas porcentagens em 20, 25 e 30%, as análises físico-químicas foram satisfatórias, a mistura com percentual de 20% de cinza foi a que apresentou melhores resultados de resistência à compressão aos 28 dias, registrando valores em torno de 80% daqueles correspondentes ao cimento sem adição.

De acordo com o estudo de Mehta (1977), ele submeteu a manufatura de dois tipos de cimento, o primeiro com cal-CCA e o segundo com cimento Portland-CCA. Produziu uma CCA no forno industrial com uma sílica amorfa, composição química entre 80-95%, os percentuais de cinza no cimento cal-CCA variaram entre 70 e 80% em massa, enquanto que no cimento Portland-CCA, entre 30 e 70%.

Diversas pesquisas mostram que o cimento pode ser produzido a partir de cinza de casca de arroz. Ajiwe *et al* produziram cimento com CCA variando a porcentagem de cinza na formulação do cimento entre 23 e 26%. Já Ismail e Waliuddin analisaram os efeitos da cinza da casca de arroz no concreto e através de experimentos com diferentes composições de cinza constataram que é possível produzir um concreto com alta resistência à compressão, porém menor se comparada com apenas com cimento. Weber observou que o uso da cinza de casca de arroz na obtenção de concreto e argamassa mostrou-se economicamente vantajoso, haja vista a demanda inferior de água necessária para atingir uma dada consistência. Zhang *et al* compararam o concreto feito com

cimento Portland e com cimento contendo cinzas de casca de arroz, concluindo que ambos apresentaram resistência à compressão semelhantes (Cechin *et al* 1995).

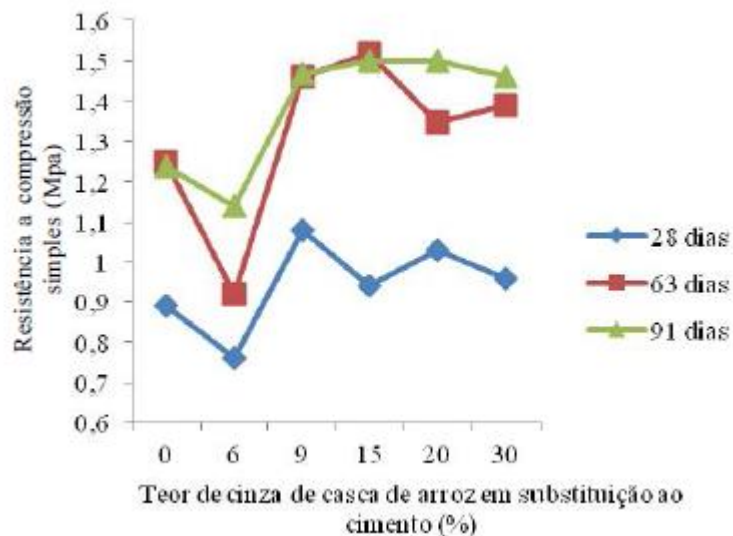


Figura 11. Resistência a compressão simples dos corpos de prova das argamassas incorporadas com CCA para o traço 1:2:9, após períodos de cura de 28, 63 e 91 dias. Fonte: Bezerra et al 2011.

Como pode ser observado na Figura 11, o aumento na resistência a compressão para todos os períodos de cura em que os corpos de prova contendo CCA, apresentaram valores superiores ao de argamassa de referência, exceto 6%, este aumento pode ser atribuído, provavelmente, à reação da CCA com hidróxido de cálcio, produzindo C-S-H, material este que é resistente e estável, que favorece o aumento da resistência e diminuição da permeabilidade devido ao processo de refinamento dos poros.

7. CINZA DA FOLHA DE BANANEIRA

O Brasil é um grande produtor de frutas, sendo a banana o segundo lugar após os cítricos com maior produção anual de 6,0 milhões de toneladas, cultivada em uma área próxima de 513 mil hectares como descreve Sena, (2011).

A folha de bananeira é obtida da desfolha do bananal, que consiste na remoção das folhas que não são mais úteis a planta, a desfolha da banana traz benefícios ao plantio da mesma, propiciando ao bananal melhores condições de luminosidade, arejamento, maior controle de pragas e melhorias do solo pela sua decomposição (Embrapa, 2004).

Segundo Kanning (2010), a avaliação da atividade pozolânica da cinza de folha de bananeira e os resultados evidenciaram que a cinza de folha de bananeira apresenta atividade pozolânica superior aos valores mínimos indicados nas normas NBR 5751 (ABNT, 1992) e 5752 (ABNT, 1992), quando são queimadas com temperaturas de 850°C e posteriormente moídas em moinho de bolas. O tempo ideal de moagem da cinza de folha de bananeira conforme o autor apresenta é de 30 minutos, com uma massa específica de 2,53g/cm³.

Resultados significativos são encontrados em diversas pesquisas. Verificou-se que à medida que se aumentava a porcentagem de adição de cinza, a consistência da argamassa diminuía prejudicando a trabalhabilidade. Entretanto, pode-se corrigir adicionando aditivos plastificantes. As argamassas com cinzas de folha de bananeira costumam apresentar menores teores de ar incorporado em relação às argamassas de referências, ou seja, sem a adição da cinza da bananeira. Os ensaios de resistência à compressão e resistência a tração na flexão das argamassas apresentam maiores resistências. Segundo Maria (2011), a viabilidade de utilização de até 30% de cinza de folha de bananeira, sem prejuízo de resistência.

A aderência das argamassas no substrato provém de forças do tipo Van der Waals geradas pela hidratação do cimento ou pelo intertravamento dos seus constituintes com os poros do substrato durante o processo de sucção e absorção capilar.

Tal como as cinzas citadas, segundo Lima *et al.*, 2007, qualquer cinza vegetal, desde que em estado amorfo, finura adequada e composição química com elevado teor de sílica podem ser empregados como adição mineral. Adição esta que não só diminui o custo da produção de concretos e argamassas, por serem energeticamente mais econômicos, como também propicia a redução da reação álcali-agregado e do calor de hidratação gerado pelos cimentos. (Kanning, 2010).

8. CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR - CBCA

A cana-de-açúcar é uma cultura típica de climas tropicais e subtropicais que se adapta com relativa facilidade em diferentes tipos de solos. É uma das variedades agronômicas de maior eficiência no processo de fotossíntese, por utilizar entre 2% e 3% da radiação solar na produção de biomassa vegetal (Lora *et al*, 2001).

No Brasil a cana-de-açúcar é cultivada em mais de oito milhões de hectares (Canab, 2008). O Brasil é atualmente o responsável por cerca de 60% da produção de álcool etílico do planeta e é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e de açúcar, além de ser o maior exportador de açúcar do mundo.

É importante salientar nessa cultura, a geração de subprodutos, como água de lavagem, bagaço, folhas e pontas, vinhaça, torta de filtro e leveduras. Destes subprodutos, merece destaque a queima do bagaço para a geração de energia elétrica. O emprego deste subproduto é atrativo devido, principalmente, a seu poder calorífico médio de 7,74 MJ/kg com umidade de 50% e aos grandes montantes de cana-de-açúcar processados dentro do setor sucroalcooleiro, tornando a quantidade gerada de bagaço significativo (Coelho, 1999).



Figura 12. Plantação da cana-de-açúcar em território nacional Fonte: <http://meioambiente.culturamix.com/agricultura> (acessado em 09/01/2013)

Na indústria sucroalcooleira, por muitos anos, existiu o grande desafio em relação ao descarte dos resíduos gerados no processo de produção de açúcar e álcool, devido ao processo produtivo que gerava prejuízos quando os resíduos

eram descartados no meio ambiente. Atualmente, tornou-se uma vantagem econômica utilizar esses resíduos, à medida que geram benefícios para outrem.

O bagaço é um dos resíduos da unidade industrial sucroalcooleira que possui mais atrativo, devido o seu alto poder calorífico, o que faz com que ele se torne o subproduto crucial de todo o processo produtivo da fabricação do açúcar bem como do álcool. O mesmo, atualmente, tem diversas aplicações na economia brasileira, seja na alimentação animal, produção de combustível, cogeração de energia, indústria de cosméticos e engenharia civil.

Para cada tonelada de cana-de-açúcar são gerados aproximadamente 320 kg de bagaço com 50% de umidade (Bocchi, 2012), este é o maior resíduo da agricultura brasileira. Sua composição em base anidra é de aproximadamente 50% de celulose ($C_5H_{10}O_5$), 25% de hemicelulose ($C_5H_8O_4$) e 25% de lignina ($C_7H_{10}O_3$) (Cordeiro, 2006).

O último resíduo gerado pela cadeia da cana-de-açúcar são as cinzas da queima do bagaço, geradas na ordem de 25 kg de cinza para cada tonelada (Cordeiro, 2006). A incineração do bagaço de cana-de-açúcar em condições não controladas gera cinza que pode conter altos teores de carbono e matéria orgânica. Além disso, a quantidade de carbono tem grande influência na absorção de água, pois o material carbonoso é extremamente fino, o que ocasiona um aumento na demanda de água.

A cinza do bagaço apresenta uma grande quantidade de dióxido de silício (SiO_2), há também como fonte de sílica para a areia (quartzo), proveniente da lavoura, que não é totalmente removida durante a etapa de lavagem no processamento da cana-de-açúcar (Cordeiro, 2006).

Tabela 6 - Composição química da CBCA realizada por espectroscopia de fluorescência de raios X. (Fonte: Paula 2006)

Composto químico	Composição (%)
SiO ₂	83,707
Fe ₂ O ₃	6,537
K ₂ O	6,146
CaO	1,183
TiO ₂	1,162
SO ₃	0,682
ZrO ₂	0,303
Cr ₂ O ₃	0,094
MnO	0,081
Sc ₂ O ₃	0,040
ZnO	0,037
V ₂ O ₅	0,029

Segundo Souza (2007), a destinação da CBCA é um dos problemas enfrentados pelos administradores das usinas. A fuligem gerada no processo é recolhida a partir de técnicas de lavagem e decantação e, juntamente com a cinza de caldeira, constituem-se em resíduos finais do processo industrial, no qual não há possibilidade de redução do mesmo.

Alguns estudos foram realizados como propósito, utilizar a cinza oriunda do bagaço como aditivo mineral. Os resultados apontam a viabilidade da cinza em conjunto com cimento Portland, seja o substituindo parcialmente em concretos e argamassas, seja substituindo o agregado miúdo.

Giammuso (1992) propôs que materiais com composições granulométricas reduzidas, maior superfície específica, apresentam tendência para uma maior retenção de água devido à adsorção do líquido na superfície dos grãos, fenômeno este que explica a inexistência de exsudação em concretos com presença de adições minerais. Já para Cordeiro (2006), a redução ou até mesmo a inexistência de exudação em concretos com adição e cinzas residuais está relacionada diretamente a superfície específica do material empregado.

O estudo de Freitas *et al.*(1998) observou a influência da substituição de cimento Portland por cinza do bagaço na resistência à compressão de argamassas. Utilizando cinza residual classificada na peneira de 75 µm em argamassas com relação água-material cimentício de 0,48. Misturas com teores de substituição de 5, 10, 15 e 20% foram confeccionadas, além da argamassa de controle, composta exclusivamente por cimento Portland como material cimentício. A mistura com 15% de cinza apresentou os melhores resultados de resistência à compressão até os 63 dias de cura, como pode ser observado na

Figura 13 os valores de resistência obtidos para as misturas com os demais teores de substituição não apresentaram diferenças significativas entre si e com relação à argamassa de controle.

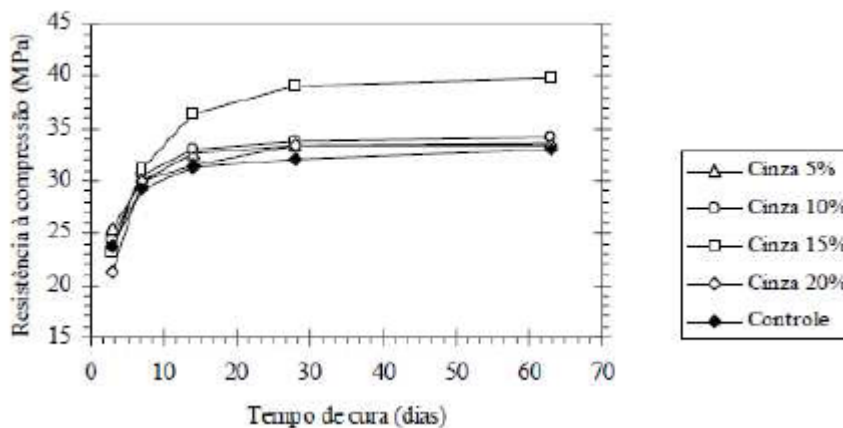


Figura 13. Resistência à compressão de argamassas com diferentes teores de cinza do bagaço de cana-de-açúcar em substituição ao cimento Portland. (Freitas et, al. 1998.)

No Encontro Nacional Sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção (ENARC, 2009), Secchi, Abe, Nunes e Souto divulgaram resultados sobre os efeitos da CBCA nas propriedades mecânicas do concreto. Para tanto, tomou-se como referência uma dosagem sem CBCA, denominada padrão, no qual se promoveu um gradativo acréscimo da quantidade de CBCA nas taxas de 3, 5, 7, 10, 13, 15 e 20% em relação à massa de cimento. Para analisar a influências da CBCA no concreto, como parâmetro foi avaliado a resistência à compressão simples dos corpos-de-prova aos 3, 7, 14 e 28 dias de cura. Como resultado, constatou-se que a substituição de 10% teve um aumento de 12% na resistência à compressão.

Martins e Machado (2009) utilizaram CBCA em teores diferentes como agregado miúdo em argamassas e perceberam que para a idade de 28 dias, até aproximadamente 50% de CBCA em substituição à areia, houve aumento na resistência à compressão simples das argamassas. Essa constatação pode ser explicada devido as partículas de CBCA serem menores que as de areia e promover o efeito filler, ou seja, há um melhor empacotamento entre as partículas. Para substituições maiores que 50%, houve uma diminuição na resistência à compressão simples, pelo fato das partículas de CBCA absorverem mais água

que as de areia e ser necessário um maior volume de água ($a/c = 0,60$) para hidratação dessas partículas e por seguinte deixando a argamassa mais porosa.

Em conformidade aos estudos realizados por Freitas (2005) em cinzas de usinas na região norte fluminense do Rio de Janeiro, “foi possível confirmar a potencialidade do uso da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição parcial ao cimento Portland na produção de argamassas”. Inúmeros ensaios foram realizados a fim de determinar o potencial da cinza da usina COAGRO após o processo de calcinação a 600°C por 5 h e moída por 1 h, com substituições do cimento Portland de até 10%, apresentaram resistências à compressão próximas à da argamassa de referência. Essas reduções podem ser reduzidas, quiçá extintas, com o aumento do tempo de moagem e/ou utilização de um moinho com maior eficiência (Freitas, 2005).

9. CONCLUSÃO

A tendência do aproveitamento de resíduos é uma necessidade cada vez maior na indústria moderna, devido à crise energética mundial e à busca de fontes alternativas de energia renovável. A preservação do meio ambiente é uma das grandes preocupações da atualidade, principalmente no que se refere à redução de consumo de energia, da extração de recursos naturais, bem como na geração de materiais pós-consumo.

Sendo assim, a utilização de resíduos provenientes da agricultura pode ser viável, podendo corroborar a novas tecnologias e resultando em sustentabilidade.

As cinzas oriundas de subprodutos agrícolas possuem ampla vantagem quando utilizados juntamente com o cimento Portland, não só pelo aumento das suas características, mas também por reduzir os impactos ambientais.

Em termos de resistência à compressão, ficou evidente que a redução da granulometria produz benefícios para o concreto ou argamassa com adições de cinzas em cimento Portland, e que, quanto menor a granulometria, maior a pozolanicidade.

Ainda que não consiga obter cinzas de melhor qualidade através das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar, cinzas de folha de banana ou cinzas da casca de arroz, e dessa forma aumentar a resistência do cimento Portland, seja na adição mineral ou como substituinte de agregado miúdo, é de grande valia para o meio ambiente a utilização das mesmas, impedindo assim que elas sejam depositadas em aterros ou mananciais.

10. PERSPECTIVAS FUTURAS

Investigação mais detalhada do processo de obtenção das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar nas diversas usinas da região Norte Fluminense, a fim de se fazer um comparativo entre elas e utilizá-las em usinas concreteiras também da região, e averiguar as diferentes resistências do concreto de acordo com as cinzas de cada usina sucroalcooleira.

A utilização das mesmas cinzas em olarias da cidade, no fabrico de tijolos cerâmicos e observação de aumento de resistência, haja vista o grande número de indústrias desse ramo na região.

E, por último, porém não menos importante, a utilização das cinzas em fábricas de cimento, com intuito de minimizar impactos ambientais.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

<http://www.cst.com.br/produtos/co_produtos/catalogo_produtos/escoria_forno/>
Acesso em Fevereiro 2015.

<www.quimicamix.blogspot.com.br> Acessado em Janeiro de 2015.

Ângulo, S. C., Zordan, S. E., JOHN, V. M. (2011) Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. Disponível na internet: <www.pcc.usp.br>. Acesso em Janeiro de 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991, *Cimento Portland comum – Especificação: NBR 5732. Rio de Janeiro.*

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (ABCP). Guia básico de utilização do cimento Portland. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: Materiais Pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1993. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5736 (EB – 758): Cimentos Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência a compressão. Rio de Janeiro, 1991. 7p.

BARBOSA, M.F., LIMA, E., PIRES SOBRINHO, C. W. A. Estudo de argamassas com adições de cinza de casca de arroz e cinza de cana-de-açúcar. VII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído Qualidade no Processo Construtivo. 27 a 30 de Abril de 1998 – Florianópolis – SC.

BARROSO, T. R., 2011, “Concreto de alto desempenho com cinzas do bagaço de cana-de-açúcar”. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, Brasil.

BASILIO, F.A. – Cimento PORTland. Estudo Técnico. 5ª Ed. São Paulo, ABCP, 1983.

CALHEIRO, D. Influência do uso de aditivos na moagem de conzas de casca de arroz para sua adequação como co-produto. São Leopoldo, 2011. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Gerenciamento de Resíduos. Universidade do vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS. 2011.

CINCOTTO, M. A., 1990, “Optimization of Rice husk ash production”. In: International symposium on vegetable plants and their fibers as building materials.” Salvador, Brazil, v.2, PP. 334-342.

CINCOTTO, M.A. Utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil. A construção, São Paulo, v.1855, p.27-30, 1983 (IPT – Encarte TE, 9)

CINCOTTO, M.A.; KAUPATEZ, R.M.Z. Seleção de materiais quanto a atividade pozolânica, in Tecnologia das Edificações. São Paulo: IPT-PINI, 1988, PP.23-26.

COELHO, S. T., 1999, Mecanismos para implementação da co-geração de eletricidade a partir de biomassa. Um modelo para o estado de São Paulo. Tese de D. Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar - Safra 2012/2013. Disponível em <www.conab.gov.br> Acesso em Janeiro de 2015.

CORDEIRO, G. C., Concreto de alto desempenho com metacaulinita, 2001, Dissertação Mestrado em engenharia, UENF- Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

CORDEIRO, G.C.; TOLEDO FILHO, R.D.; FAIRBAIRN, E.M.R.; TAVARES, L. M. M. Estudo do processo de moagem da cinza do bagaço da cana-de-açúcar visando seu emprego como aditivo mineral para concreto.

DAFICO, D. A.; Prudêncio JR., L. R. Um estudo visando a identificação das condições de queima da casca de arroz para produção de pozolana branca. IX Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído, p1671-1680. Foz do Iguaçu: Paraná 2002, Brasil.

FARIAS, Jacira dos S. A., Cimento para alvenaria utilizando cinza de casca de arroz. Porto alegre, 1990. 91p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola de Engenharia, curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

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. *Anais...*Lavras: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1988. .4, p.219-21.

FREITAS, F. A. E., Microfissuração e evolução da hidratação de concreto de cimento Portland, com e sem adição de escória, por meio de análise de imagens. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Campinas, 2011.

FREITAS, S. E., Caracterização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar do município de Campos dos Goytacazes para uso na construção civil, 2005, Dissertação para Mestrado em Engenharia, UENF, Universidade estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

ISAIA, G. C. Efeitos da mistura binárias e termárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da

armadura. Tese de doutorado em engenharia civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. G. Cinza e aglomerantes alternativos. In: FREIRE, W. J.; BERALDO, A. L. Tecnologia e materiais alternativos de construção. Campinas: Editora da UNICAMP, 2003, cap.6, p. 145-190.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., 1994 *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*, 1 ed. São Paulo: Editora Pini, 616 p.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., 2008 *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*, 1 ed. São Paulo: Editora Pini, 616 p.

METHA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais; Editora Pini Ltda, São Paulo, 1ª Ed., 1994.

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. Trd Salvador E. Giammusso. São Paulo: PINI, 1982.

PETRUCCI, E. G. R. Concreto de Cimento Portland – 13. Ed. Ver. Por Vladimir Antonio Paulon – São Paulo: Globo, 1998.

PETRUCI, E. G. R. Concreto de Cimento Portland. – 13. Ed. Rev. Por Vladimir Antonio Paulon – São Paulo: Globo, 1998.

RÊGO, João Henrique S. Viabilidade técnica da utilização da cinza de casca de arroz produzida sem controle de temperatura como adição mineral ao cimento. Goiânia, 2001. 200p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiás, Brasil.

RODRIGUES, C. S. Efeito da adição da cinza da casca de arroz no comportamento de compósitos cimentícios reforçados por polpa de bambu. Tese de Doutorado. Engenharia Civil PUC – Rio de Janeiro, 2004.

ROMERO, T. Bagaço na construção civil, Agência de Notícias da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, 2007. Disponível em: <<http://www.agencia.fapesp.br/matéria/7211/noticias/bagaco-na-construcaocivil>> Acesso em 21 de Fevereiro de 2015.

SABBATINI, F. H. Tecnologia de execução de revestimento de argamassas. IN, 13º Simpósio de Aplicação da tecnologia do concreto, São Paulo, 1990.

SANTOS, Sílvia; Prudêncio JR. Estudo comparativo da pozolanicidade da cinza volante e da cinza de casca de arroz residual. VII Encontro Nacional do Ambiente Construído. Anais: Florianópolis, 1998, p933-939. Santa Catarina, Brasil.

SAVASTANO JÚNIOR, H. Sistemas de cobertura para construções de baixo custo: Uso de fibras vegetais e de outros resíduos agroindustriais. Coletânea Habitare. Vol. 4. Utilização de resíduos na construção habitacional. Capítulo 4.

Disponível em <http://habitare.infohab.org.br;publicacao_coletanea.aspx> Acesso em 17 de Fevereiro de 2015.

SILVEIRA, A. A. A utilização de cinza de casca de arroz com vistas à durabilidade de concretos: estudo de ataque por sulfatos. Porto Alegre, 1996, 139p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

SILVEIRA, A. A. E DAL MOLIN, D. C. A influência do tratamento térmico da cinza da casca de arroz na pozolanicidade e na resistência à compressão de argamassas. I Simpósio Brasileiro de Tecnologia das argamassas. Goiânia, 1995. P15-24, Goiás, Brasil.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE CIMENTO (SNCI, 2015). Relatório Anual 2013. Disponível em <http://www.snic.org.br;relatorio_anual_dinamico.asp>. Acessado em Janeiro de 2015.

SOUZA, P. S. L. Verificação da influência do uso de metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência. Porto Alegre, 2003. 203p. Tese (Doutorado em Engenharia), Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

VIEIRA, F. L. *et al* Comparativo da determinação do teor de amorfismo da cinza de casca de arroz (CCA) através de difração de raio x e método químico. 47º Congresso Brasileiro do Concreto. Anais: Recife, 2005. P.372-381.

WEBER, Silva Leonita. Metodologia para obtenção de sílica de elevada reatividade para uso em concreto de alto desempenho a partir do processamento de cinza de casca de arroz. Florianópolis, 2001. 98p. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

YAMAMOTO, J. K., KIHARA, Y.A., COIMBRA, A. M., MONTANHEIRO, T. J. Environmental impact reduction on the production of blended Portland cement in Brazil. Environmental Geosciences, 4. P.192-206, 1997.

ZHANG, M. H.; BILODEAU, A.; MALHOTRA, V. M.; KIM, J. C. Concreto incorporating supplementary cementing materials: effect on compressive strength and resistance to chloride-ion penetration. ACI Materials Journal, v. 96, n.2, March-April 1999. P181-189.