



Universidade Eduardo Mondlane
Faculdade de Ciências
Departamento de Química



Tema: “Estudo da Influência do Calcário Cru e Cinzas Volantes nas Propriedades Físico-Químicas e Mecânicas do Cimento Portland produzido em Moçambique.”

Autor: Chin Tok Teng Júnior

Maputo, Dezembro de 2011



Universidade Eduardo Mondlane
Faculdade de Ciências
Departamento de Química



Tema: “Estudo da Influência do Calcário Cru e Cinzas Volantes nas Propriedades Físico-Químicas e Mecânicas do Cimento Portland produzido em Moçambique.”

Autor: Chin Tok Teng Júnior

Supervisora: Prof.^a Doutora Tatiana Kouleshova

Co-Supervisor: dr. Fernando Assane

Maputo, Dezembro de 2011

DEDICATÓRIA

*Sem a presença constante daqueles que são minha força permanente, com certeza teria sucumbido no meio do caminho. Aos meus pais, **Teng e Linda**, e aos meus irmãos **Nelson, Célio e Ah-Yok** dedico este trabalho com muito carinho.*

AGRADECIMENTOS

À ele, o meu Deus em quem confio, pelas oportunidades durante a minha caminhada, e pelos dons dos quais disponho.

À Prof.^a Doutora Tatiana Kouleshova, minha supervisora, que no meio de tantos compromissos, ajudou-me, dispondo-se a orientar tão sabiamente este trabalho.

Ao dr. Fernando Assane, ao Sr. Posse, técnicos do laboratório de controlo de qualidade da empresa Cimentos de Moçambique, e aos demais funcionários da mesma, pela colaboração ao longo da pesquisa.

À empresa Cimentos de Moçambique, por disponibilizar o seu laboratório para a realização dos ensaios laboratoriais.

Aos funcionários, colegas, e docentes do Departamento de Química, especialmente os pertencentes ao ramo de Química Física.

À família Búfalo, pelo acolhimento em vossa família, e por acreditarem sempre no meu potencial.

Aos meus primos Jaime e Bia, por me ajudarem a dar os primeiros paços nesta caminhada.

Aos meus progenitores pela bênção de me ter colocado nesse mundo, e por me tornarem na pessoa que hoje sou.

À minha família, pela companhia nos momentos tristes e felizes.

E por último, mas não menos importante

Aos meus colegas de quarto, Gil Chibantão, Elliot Salvio, Hector Motatano, Joel Martins, Nuro Alberto e Semo Júnior, pela amizade e companheirismo ao longo do curso.

Do fundo do meu coração, o meu muito OBRIGADO!

*Somos o que fazemos, mas somos, principalmente, o que
fazemos para mudar o que somos.*

Eduardo Galeano

DECLARAÇÃO DE HONRA

Declaro, por minha honra, que o presente trabalho é da minha autoria e foi elaborado segundo a bibliografia referenciada ao longo do texto.

(Chin Tok Teng Júnior)

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma proposta para a reutilização de resíduos industriais, desta forma minimizando os problemas ambientais causados pelos mesmos, e diminuição do consumo energético necessário a produção de cimento Portland racionalizando o consumo de clínquer.

Nos teores de 25% e 30% em massa, substituiu-se o clínquer do cimento Portland por cinzas volantes e calcário cru. A partir destes moldou-se provetes, que posteriormente foram submetidos a ensaios físicos e mecânicos com a finalidade de se avaliar as possíveis alterações ou variações, que a incorporação destes materiais no cimento pudesse causar em comparação com o cimento Portland padrão, que neste caso foi o cimento Portland 100%. Ao todo foram realizados cerca de 140 ensaios de carácter físico-químico e mecânico. Os resultados obtidos, indiciam uma perda de resistência mecânica com a introdução das cinzas volantes e calcário cru na composição do cimento. Os mesmos, indicam ainda que as propriedades físico-químicas como a finura, o tempo de presa, são extremamente influenciadas pela presença destes materiais, onde verifica-se um aumento substancial no tempo de início de presa, principalmente no cimento com cinzas volantes, e uma divergência notável em termos de finura. Em relação ao cimento 100% Portland, o cimento substituído parcialmente por cinzas volantes, revelou ser mais fino contrariamente ao substituído por calcário cru. Com a presença de um material com características pozolânicas no cimento, como as cinzas volantes, é importante que seja avaliado a reactividade deste material no cimento. A partir de valores de resistência a compressão aos 28 dias, de cimento não substituído e substituído por cinzas volantes à 25%, determinou-se o índice de actividade pozolânica em percentagem, que não foi para além dos 82,7%. Não ultrapassando os 85%, preconizado pela norma o material não pode ser considerado pozolânico. Entre uma série de prós e contras, os cimentos sintetizados com cinzas volantes e calcário cru alcançaram os valores mínimos aceitáveis pela norma, em relação aos requisitos físico-mecânicos, sendo aliados as classes 32,5N e 42,5N, com excepção do cimento 30% substituído por calcário cru, que segundo a mesma norma, não possui enquadramento por não apresentar a resistência mínima para qualquer tipo de cimento Portland corrente.

A incorporação de cinzas volantes até 30 %, calcário cru até 25% é recomendável, sob o ponto de vista ambiental e económico, apesar dos resultados experimentais obtidos através de ensaios mecânicos e físico-químicos demonstrarem o enfraquecimento de algumas propriedades, estes valores encontram-se acima dos limites mínimos aceitáveis pelas normas.

ÍNDICE DE CONTEÚDOS

DEDICATÓRIA	ii
AGRADECIMENTOS	ii
EPÍGRAFE	iii
RESUMO	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objectivo geral	2
1.2 Objectivos específicos	2
1.3 Justificativa	3
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1 O cimento	4
2.1.1 Classificação dos cimentos	4
2.1.1.1 Cimentos naturais	4
2.1.1.2 Cimentos aluminosos	5
2.1.1.3 Cimentos Portland (CP)	5
2.2 Os impactos ambientais da produção de cimento	23
2.2.1 Riscos na fabricação de cimento	25
2.3 Aproveitamento de resíduos industriais para a produção de cimento Portland	26
2.4 Produção de cimento em Moçambique	27
2.5 Produção mundial de cimento	29
3. CINZAS VOLANTES E ACTIVIDADE POZOLÂNICA	32
3.1 Resíduos sólidos industriais utilizados em argamassas/concretos	32
3.1.1 Resíduos provenientes das termoeléctricas	32
3.2 Propriedades físicas e químicas das cinzas	35
3.2.1 Propriedades físicas	35
3.2.2 Propriedades químicas	36
3.3 Vantagens e desvantagens na utilização de cinzas volantes	38
3.4 Índice de actividade pozolânica (IAP)	40
3.4.1 Índice de actividade pozolânica com cimento	40
3.4.2 Índice de actividade pozolânica com cal	41
4. PARTE EXPERIMENTAL	42
4.1 Considerações gerais	42
4.2 Colheita e preparação da matéria-prima para preparação das amostras	42
4.2.1 Substâncias colhidas	42

4.2.2 Procedimento de colheita.....	42
4.2.3 Britagem e moagem das matérias-primas.....	43
4.3 Determinação das resistências mecânicas.....	45
4.3.1 Fabricação dos provetes.....	45
4.3.1.1 Substâncias necessárias à fabricação dos provetes	45
4.3.1.2 Procedimento experimental	45
4.3.2 Resistência a flexão e compressão.....	48
4.4 Determinação da finura das amostras de cimento.....	49
4.4.1 Substâncias necessárias para determinação da finura.....	51
4.4.2 Procedimento experimental	51
4.4.2.1 Método de peneiração.....	51
4.4.2.2 Método de permeabilidade ao ar	51
4.5 Determinação do tempo de presa das amostras de cimento.....	53
4.5.1 Substâncias utilizadas para determinação do tempo de presa	53
4.5.2 Procedimento experimental	53
5. RESULTADOS, A SUA ANÁLISE E DISCUSSÃO.....	56
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	64
6.1 Conclusões	63
6.2 Recomendações.....	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma de moagem de cru e clínquerização.	8
Figura 1a. Diagrama de blocos de uma unidade de produção de cimento: linhas de produção à seco e húmido.	8
Figura 2. Fluxograma de moagem do cimento.	9
Figura 3. Evolução média de resistência à compressão dos distintos tipos de cimento Portland.	21
Figura 4. Clínquer (não moído) em forma de pelotas.	42
Figura 5. Britador de marca HUMBOLDT WEDAG.	43
Figura 6. Clínquer britado.	43
Figura 7. Gesso natural britado.	44
Figura 8. Calcário britado.	44
Figura 9. Moinho de bolas de referência SKF-8Y510M.	45
Figura 10. Misturador de marca ELE.	46
Figura 11. Areia normalizada CEN EN 196-1.	46
Figura 12. Compactador de marca RMU.	47
Figura 13. Aparelho para conservação de provetes em água de marca FITOCLIMA D1200. ...	48
Figura 14. Aparelho para determinação de resistência a flexão e compressão.	50
Figura 15. Peneiro normalizado com malha de abertura de 90µm.	50
Figura 16. Permeabilímetro de Blaine.	51
Figura 17. Peneirador a vácuo de marca HOSOKAWA ALPINE Aktiengesellschaft 200 LS-N.	52
Figura 18. Frasco volumétrico de Le Chatelier.	53
Figura 19. Misturador.	55
Figura 20. Aparelho de vicat.	55
Figura 21. Aparelho de vicat para início de presa.	55
Figura 22. Variação da percentagem de resíduo de peneiração em função da abertura da malha dos peneiros.	58
Figura 23. Variação da resistência a flexão em função das idades de cura.	61
Figura 24. Variação da resistência a compressão em função das idades de cura.	61

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Composição dos cimentos Portland comuns e compostos.....	18
Tabela 2. Composição dos cimentos Portland de alto-forno e pozolânicos.....	19
Tabela 3. Composição do cimento Portland de alta resistência inicial.....	20
Tabela 4. Composição dos cimentos Portland brancos.....	22
Tabela 5. Influência dos tipos de cimento nas argamassas e concretos.....	23
Tabela 6. Produção, consumo e comercialização do cimento no Mundo.....	29
Tabela 7. Produção de cimento por continente.....	29
Tabela 8. Maiores produtores de cimento do Mundo.....	30
Tabela 9. Maiores consumidores de cimento do Mundo.....	30
Tabela 10. Maiores exportadores de cimento do Mundo.....	31
Tabela 11. Tipos de resíduos resultantes de processos industriais.....	32
Tabela 12. Composição química típica das cinzas pesadas e volantes.....	33
Tabela 13. Propriedades físicas de algumas cinzas volantes.....	36
Tabela 14. Composição química das cinzas volantes.....	37
Tabela 15. Proporções das matérias-primas para preparação das amostras de cimento Portland.....	44
Tabela 16. Valores de resíduos de peneiração em percentagem, para as 5 amostras em estudo.....	57
Tabela 17. Valores das massas, volumes e densidades para as 5 amostras em estudo.....	56
Tabela 18. Valores dos Blaines para as 5 amostras em estudo.....	56
Tabela 19. Teor de água da pasta expresso em percentagem de massa do cimento.....	56
Tabela 20. Valores dos tempos de início e fim de presa dos cimentos em análise.....	58
Tabela 21. Dados das resistências a flexão e compressão das 5 amostras.....	60

GLOSSÁRIO

CP	Cimento Portland
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
pH	Potencial de Hidrogénio
CP-ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CP-B	Cimento Portland Branco
CP-P	Cimento Portland para poços Petrolíferos
H	Água (H_2O)
C	Óxido de Cálcio ou Cal (CaO)
S	Óxido de Silício ou Sílica (SiO_2)
A	Óxido de Alumínio (Al_2O_3)
F	Óxido de Ferro III (Fe_2O_3)
CS	Silicato de Cálcio ($CaO.SiO_2$)
C₂S	Silicato Bicálcico ($2CaO.SiO_2$)
C₃S	Silicato Tricálcico ($3CaO.SiO_2$)
CA	Aluminato de Cálcio ($CaO.Al_2O_3$)
C₃A	Aluminato Tricálcico ($3CaO.Al_2O_3$)
C₄AF	Ferro Aluminato Tetracálcico ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$)
PPC	Pretoria Portland Cement
CPI	Centro de Promoção de Investimento
CGM	Consolidated General Minerals
IAP	Índice de Actividade Pozolânica
INNOQ	Instituto Nacional de Normalização e Qualidade

1. INTRODUÇÃO

As antigas civilizações já faziam pesquisas em busca de um material que unisse as pedras numa massa sólida e coesa. A procura por segurança e durabilidade para as edificações conduziu o homem à experimentação de diversos materiais aglomerantes. De acordo com a Cimento Itambé (2008), os romanos chamavam esses materiais de *caementum*, termo que originou a palavra cimento. O engenheiro John Smeaton, em 1756, procurava por um aglomerante que ganhasse resistência mesmo em presença de água, onde constatou que uma mistura de calcário e argila devidamente calcinada, depois de seca, tornava-se tão resistente quanto as pedras utilizadas nas construções (Cimento Itambé, 2008). Entretanto, foi em 1824 que o britânico Joseph Aspdin patenteou a descoberta, baptizando-a por *cimento Portland*, uma homenagem endereçada a ilha britânica de Portland pela semelhança em termos de propriedades de suas rochas com o cimento endurecido (Wikipédia, 2011). O *cimento Portland* desencadeou uma verdadeira revolução na construção, pelo conjunto inédito de suas propriedades de moldabilidade, hidraulicidade (endurecer tanto na presença do ar como da água), elevada resistência aos esforços e por ser obtido a partir de matérias-primas relativamente abundantes e disponíveis na natureza. As suas propriedades físico-químicas têm evoluído constantemente, inclusive com o emprego de aditivos que melhoraram e especificam a sua aplicação (E-Civil, 2011).

Já foram realizados estudos ligados com as propostas de reaproveitamento de resíduos industriais desprezados nomeadamente: *Estudo da adequidade do solo da Rádio Marconi em Boane na produção de blocos de solo-cimento sem e com aditivos* (Chilaúle, 2006), *Implementação e optimização das técnicas de controlo de qualidade dos Cimentos Portland com substituição parcial por cinzas volantes* (Dimande, 2010). Este trabalho, de continuação dos estudos ligados com este vasto tema, é actual.

O presente trabalho enquadra-se no âmbito da minimização dos impactos ambientais causados pela mega produção de cimento Portland, e reciclagem de resíduos industriais desprezados. Apesar dos países tecnologicamente avançados, já estarem a implementar novas técnicas para o efeito, em Moçambique, a reciclagem e a minimização dos impactos ambientais encontra-se ainda a um nível adolescente. Para suprir este défice de soluções viáveis, neste trabalho foram

desenvolvidos, novas variedades de cimento com a incorporação de cinzas volantes, que representam resíduos rejeitados pelas centrais termoelétricas, e calcário cru sem afectar de forma assinalável as propriedades físicas e mecânicas das argamassas preparadas a partir dos mesmos, propondo assim uma outra dinâmica na produção de cimento, desta forma mas económica e ambientalmente saudável. O emprego das cinzas volantes, visa contribuir para a diminuição da quantidade deste material rejeitado, para além de minimizar os custos de produção, em termos de energia, substituindo certa quantidade de clínquer no cimento, contribuindo ainda para futuros problemas ambientais em virtude da sua acumulação e exposição (Cordeiro, 2009).

1.1 Objectivo geral:

- Estudar a influência do calcário cru e cinza volante, como substituintes, nas propriedades físico-químicas e mecânicas do cimento Portland.

1.2 Objectivos específicos:

- Comparar as propriedades físico-químicas e mecânicas das amostras de cimento sem e com substituintes;
- Determinar o índice de actividade pozolânica da cinza volante com o cimento;
- Correlacionar os resultados obtidos com as normas moçambicanas aprovadas.

1.3 Justificativa

A grande disponibilidade de cinzas volantes, e a abundância de calcário tem motivado inúmeras pesquisas sobre suas aplicações em concretos, argamassas e produção de cimento. A obtenção de produtos cimentícios contendo cinzas volantes e calcário cru é uma alternativa para solucionar o problema da disposição das cinzas no meio ambiente, consumo energético excessivo durante a produção de cimento, além de gerar um material de maior valor agregado.

Alguns ganhos podem ser obtidos com a incorporação destes materiais no cimento Portland. O emprego da cinza tende a promover melhorias nas propriedades (Bui; Hu; Stroeven, 2005; Zhang; Malhotra, 1996 citado por Cordeiro, 2009) e na durabilidade de concretos (Nehdi; Duquette; El Damatty, 2003 citado por Cordeiro, 2009), além de reduzir a temperatura de hidratação (Mehta; Pirtz, 1978 citado por Cordeiro, 2009).

Os problemas expostos anteriormente, assim como as vantagens resultantes da aplicação destes materiais alimentam a necessidade de se realizarem mais estudos sobre esta matéria, daí a importância em desenvolver o tema sustentado pelo presente trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O cimento

É um ligante hidráulico, isto é, um material inorgânico finamente moído que, quando misturado com água forma uma pasta que ganha presa e endurece por reacções e processos de hidratação e que, depois de endurecida, conserva a sua capacidade resistente e estabilidade mesmo debaixo de água (Coutinho, 2006). Resulta da mistura de calcário e argila, calcinada em fornos. As matérias-primas utilizadas na fabricação de cimento devem conter cálcio (Ca), silício (Si), alumínio (Al) e ferro (Fe), pois são estes os elementos químicos que, combinados, vão produzir compostos hidráulicos activos (Roberto, 2001).

2.1.1 Classificação dos cimentos

Jackson (citado por Coutinho, 2006) considera duas abordagens para classificar os cimentos, uma em relação à composição e a outra relativa às propriedades correspondentes ao desempenho dos cimentos. Todavia, de uma forma geral eles classificam-se em:

- a) *Cimentos Naturais*
- b) *Cimentos Aluminosos*
- c) *Cimentos Portland* (Coutinho, 2006; EBAH, 2009)

2.1.1.1 Cimentos naturais

É obtido através da calcinação da pedra calcária argilosa natural ou pedra calcária magnésia natural, sem sofrer processo de pulverização ou misturas de outros materiais (EBAH, 2009; Claro, 1999). A pedra é quebrada e queimada em fornalha. O cimento queimado é então britado em pequenos fragmentos, pulverizado, e empacotado para o transporte ao mercado. É usado quando se tem esforços menores e se precisa de uma presa mais rápida (EBAH, 2009; Claro, 1999).

2.1.1.2 Cimentos aluminosos

Os cimentos aluminosos são ligantes hidráulicos, cujo componente principal é o aluminato de cálcio, fabricados a partir de misturas de calcários com bauxites ou com alumina, de forma a se obter cimentos com teores de óxido de alumínio na faixa de 40% à 80% (EBAH, 2009).

2.1.1.3 Cimentos Portland (CP)

O cimento Portland é um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob acção da água. Depois de endurecido (concretos e argamassas usadas na construção), mesmo que seja novamente submetido à acção da água, o cimento Portland não se decompõe mais (ABCP, 2002).

O cimento Portland é obtido a partir de uma mistura de calcário, argila, e eventualmente adições de certas substâncias que modificam suas propriedades ou facilitem seu emprego, matérias-primas para produção do clínquer de cimento Portland, que é produzido em fornos à temperatura de aproximadamente 1400°C. A composição final do clínquer depende principalmente dos teores dos componentes empregados na mistura e da temperatura de clinquerização (Dos Anjos, 2009).

O clínquer é um produto de natureza granulosa, resultante da calcinação de uma mistura de materiais anteriormente citados, conduzida até a temperatura de sua fusão incipiente (Costa, 2003).

Na produção do cimento Portland, a matéria-prima ao ser aquecida passa pelos processos de evaporação da água livre à 100°C, libertação da água adsorvida à 450°C, activação dos silicatos por desidratação e alterações na rede cristalina à 700°C, decomposição do carbonato de cálcio com libertação de cal livre, de 700°C à 900°C e, finalmente, a clinquerização, que ocorre entre 900°C à 1200°C com formação do silicato bicálcico ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), do alumínio tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) e do ferro-aluminato tetracálcico ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) que consiste na fusão do alumínio e da ferrita. Acima de 1200°C inicia a fase líquida constituída pela combinação de parte dos óxidos de cálcio com os óxidos de alumínio e ferro, que promove a formação do silicato

tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), a partir do silicato bicálcico já formado (Coutinho, 2002; citado por Dos Anjos, 2009). As figuras 1 e 1a ilustram a parte física onde ocorrem estes processos.

a) Composição do cimento Portland (matérias-primas)

Uma das melhores maneiras de conhecer as características e propriedades dos diversos tipos de cimento Portland é estudar sua composição.

O cimento Portland é composto de clínquer e de aditivos. O clínquer é o principal componente e está presente em todos os tipos de cimento Portland. As adições podem variar de um tipo de cimento para outro e são principalmente elas que definem os diferentes tipos de cimento.

O clínquer tem como matérias-primas o calcário e a argila, ambos obtidos de jazidas em geral situadas nas proximidades das fábricas de cimento. A rocha calcária é primeiramente britada, depois moída e em seguida misturada, em proporções adequadas, com argila moída. A mistura formada atravessa então um forno giratório de grande diâmetro e comprimento, cuja temperatura interna chega a alcançar 1450°C . O intenso calor transforma a mistura em um novo material, denominado clínquer, que se apresenta sob a forma de pelotas. Na saída do forno o clínquer, ainda incandescente, é bruscamente resfriado para posteriormente ser finamente moído, transformando-se em pó. O clínquer em pó tem a peculiaridade de desenvolver uma reacção química em presença de água, na qual ele, primeiramente, torna-se pastoso e, em seguida, endurece, adquirindo elevada resistência e durabilidade. Essa característica adquirida pelo clínquer, que faz dele um ligante hidráulico muito resistente, é sua propriedade mais importante (ABCP, 2002).

Os aditivos são outras matérias-primas que, misturadas ao clínquer na fase de moagem, como se pode ver na figura 2, permitem a fabricação dos diversos tipos de cimento Portland hoje disponíveis no mercado. Essas outras matérias-primas são o *gesso*, as *escórias de alto-forno*, os *materiais pozolânicos* e os *materiais carbonáticos*. O *gesso* tem como função básica controlar o tempo de presa, isto é, o início do endurecimento do clínquer moído quando este é misturado com água. Caso não se adicionasse o gesso à moagem do clínquer, o cimento, quando entrasse em contacto com a água, endureceria quase que instantaneamente, o que inviabilizaria seu uso

nas obras. Por isso, o gesso é uma adição presente em todos os tipos de cimento Portland. A quantidade adicionada é pequena: em geral, 3% de *gesso* para 97% de *clínquer*, em massa (ABCP, 2002)

A calcite, fonte de calcário, é o minério comumente utilizado como matéria-prima para o fabrico do cimento, devido ao seu rendimento em termos de quantidade de CaO.



Uma outra fonte seria o minério dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ mas, a partir deste obtém-se aproximadamente 30,4% de CaO, praticamente a metade do que a calcite pode oferecer, assim sendo não o torna viável (Lima, 2011).

As reacções químicas que ocorrem no forno de clínquerização, são:



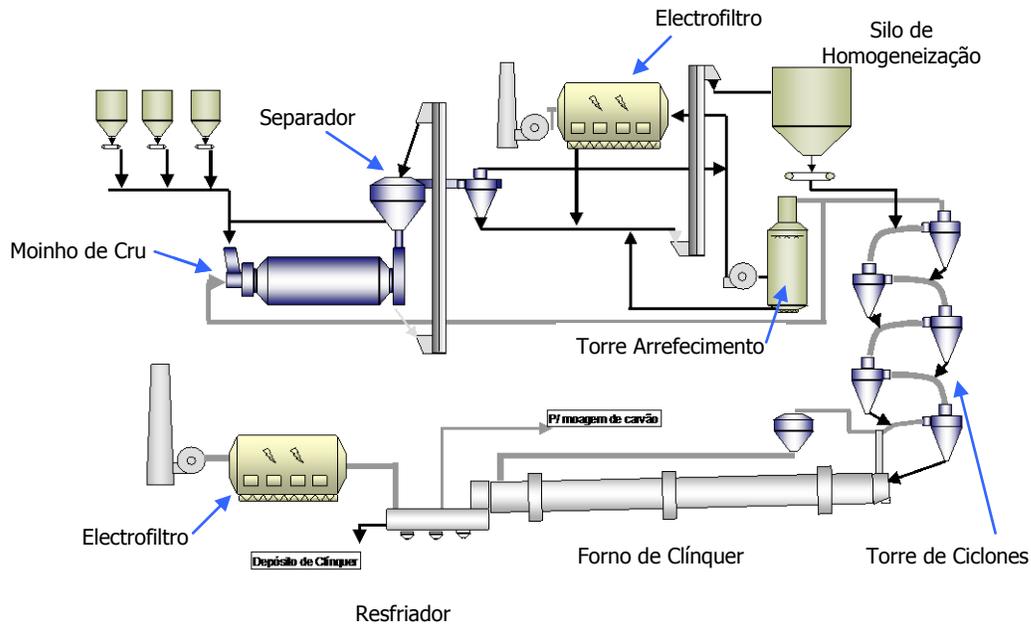


Figura 1. Fluxograma de moagem de cru e clinquerização (Fonte: EBAH, 2008).

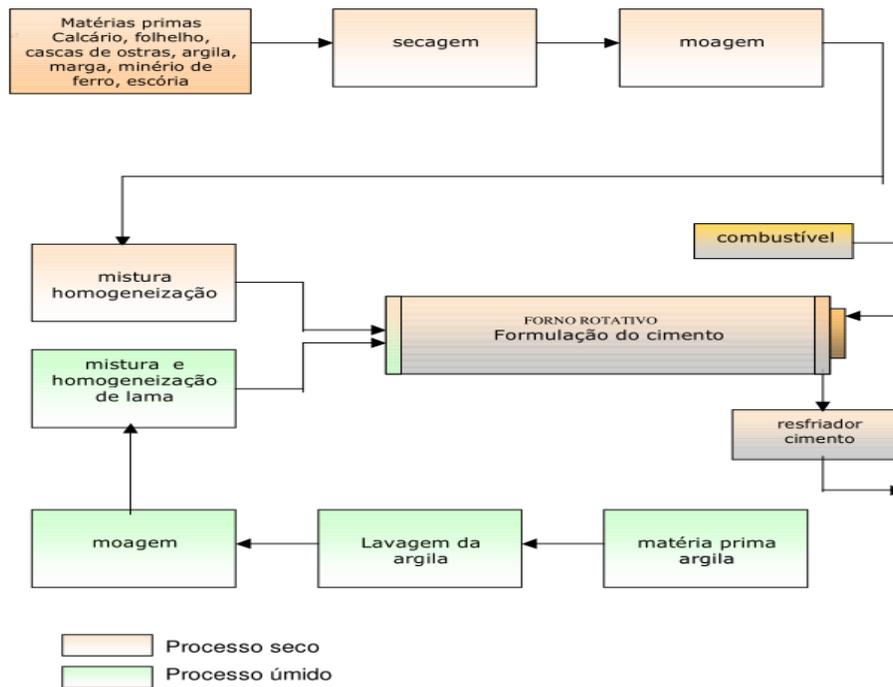


Figura 1a. Diagrama de blocos de uma unidade de produção de cimento: linhas de produção à seco e húmido (Fonte: Dos Santos, 2005).

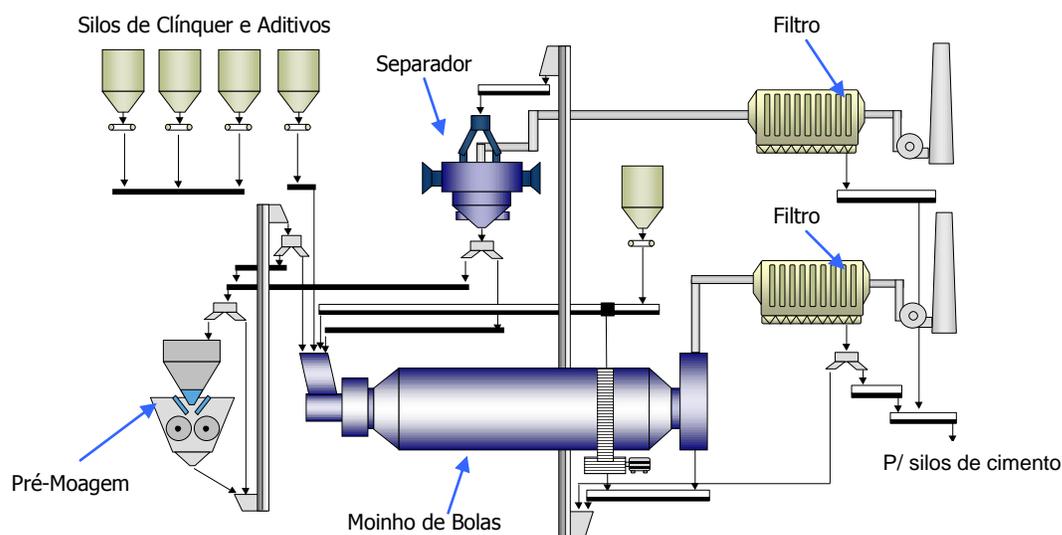


Figura 2. Fluxograma de moagem do cimento (Fonte: EBAH, 2008).

2.1.1.3.1 Constituintes do cimento Portland (CP)

Os constituintes fundamentais do cimento Portland são a cal (CaO), a sílica (SiO_2), a alumina (Al_2O_3), o óxido de ferro III (Fe_2O_3) e constituem 95 a 96% do total na análise de óxidos. Tem ainda, como constituintes menores, impurezas, óxido de sódio, óxido de potássio, e outras substâncias de menor importância. Os óxidos de potássio e de sódio constituem os denominados álcalis do cimento (Costa, 2003).

A análise química dos cimentos Portland resulta na determinação das proporções dos óxidos inicialmente mencionados. As propriedades do cimento são, entretanto, relacionadas directamente com as proporções dos silicatos e aluminatos. As proporções destes últimos podem ser determinadas a partir do resultado da análise de óxidos. Denomina-se essa operação a determinação da composição potencial do cimento (Costa, 2003).

A importância do conhecimento das proporções dos compostos constituintes do cimento reside na correlação existente entre estes e as propriedades finais do cimento.

O silicato tricálcico (C_3S) é o maior responsável pela resistência em todas as idades, especialmente até o fim do primeiro mês de cura. O silicato bicálcico (C_2S) adquire maior importância no processo de endurecimento em idades mais avançadas, sendo largamente responsável pelo ganho de resistência a um ano ou mais (Costa, 2003).

O aluminato tricálcico (C_3A) também contribui para a resistência, especialmente no primeiro dia. O aluminato de cálcio (CA) muito contribui para o calor de hidratação, especialmente no início do período de cura. O C_3S é o segundo componente de extrema importância no processo de liberação de calor. Os dois outros componentes contribuem pouco para a liberação de calor (Costa, 2003).

O CA, quando presente em forma cristalina, é o responsável pela rapidez de presa. Com a adição de proporção conveniente de gesso, o tempo de hidratação é controlado. O C_3S é o segundo componente com responsabilidade pelo tempo de presa do cimento os outros constituintes se hidratam lentamente, não tendo efeito sobre o tempo de presa. Certa proporção de óxido de magnésio (MgO) e uma pequena percentagem de anidrido sulfúrico (SO_3) adicionado após a calcinação retarda o tempo de presa do produto (Costa, 2003).

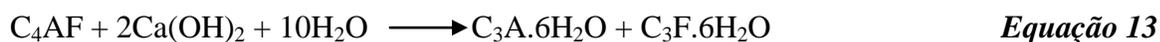
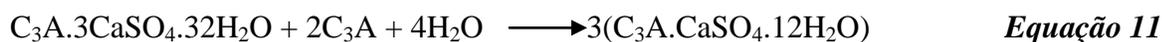
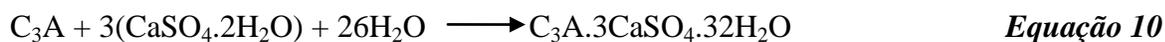
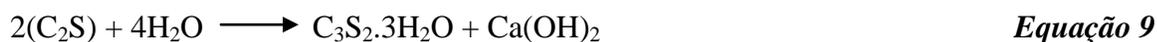
a) Reacções de hidratação

As reacções de hidratação do cimento são reacções químicas que ocorrem entre os silicatos e aluminatos presentes no cimento anidro. São duas as etapas de hidratação do cimento: o primeiro que ocorre nos estágios iniciais, é o de dissolução-precipitação, onde ocorrem a dissolução dos compostos anidros em seus constituintes iónicos e a formação dos hidratos na solução, onde devido à sua baixa solubilidade acontece a precipitação dos produtos hidratados. Na segunda etapa, denominado de hidratação no estado sólido do cimento, as reacções ocorrem directamente na superfície dos componentes do cimento anidro, sem que estes entrem em solução (Mehta e Monteiro, 1994; Michaux *et al*, 1990; citado por Dos Anjos, 2009).

A hidratação do C_3A e o ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) produzem praticamente os mesmos compostos hidratados, quando estes reagem com a água na presença de sulfato, adicionado ao

cimento para controlar o tempo de presa. A hidratação do C_4AF , dependendo do teor de sulfato disponível pode produzir $C_6A(F)S_3H_{12}$ ou $C_6A(F)SH_{18}$, que possuem composições químicas variáveis, mas estruturas similares a etringita ($C_6AS_3H_{32}$) e ao monossulfoaluminato (C_6ASH_{18}), respectivamente (Taylor, 1990; Mehta e Monteiro, 1994; citado por Dos Anjos, 2009) onde H representa a molécula de água. A etringita é geralmente o primeiro hidrato a cristalizar-se, mais tarde, depois do sulfato ter sido consumido a etringita pode ser convertida em monossulfato (C_4ASH_{18}).

As reacções de hidratação dos compostos do clínquer são:



Algumas horas depois:



Após alguns dias:



2.1.1.3.2 Propriedades físicas do cimento Portland (CP)

As propriedades físicas do cimento Portland são consideradas sob três aspectos distintos: propriedades do produto em sua condição natural (em pó), da mistura de cimento e água e proporções convenientes de pasta e, finalmente, da mistura da pasta com agregado padronizado (as argamassas) (Costa, 2003).

As propriedades da pasta e argamassas são relacionadas com o comportamento desse produto quando utilizado, ou seja, as suas propriedades potenciais para a elaboração de concretos e argamassas. Tais propriedades se enquadram em processos artificialmente definidos nos métodos e especificações padronizados, oferecendo uma utilidade quer para o controle de aceitação do produto, quer para a avaliação de suas qualidades para os fins de utilização dos mesmos (Costa, 2003).

a) Densidade

A densidade absoluta do cimento Portland é usualmente considerada 3.15, embora, na verdade possa variar para valores ligeiramente inferiores. A utilização desse valor se encontra nos cálculos de consumo do produto nas misturas geralmente feitas com base nos volumes específicos dos constituintes. Nas compactações usuais de armazenamento e manuseio do produto, a densidade aparente do mesmo é da ordem de 1.5. Na pasta do cimento, a densidade é um valor variável com o tempo, aumentando a medida que progride o processo de hidratação. Tal fenómeno é conhecido como retracção. Esta ocorre nas pastas, argamassas e concretos. Pode atingir, em 24 horas, cerca de 7 mm por metro na pasta pura, 4.5mm por metro na argamassa padrão e 2 mm por metro em concretos dosados a 350 kg de cimento/m³ (Costa, 2003).

b) Finura (granulometria)

A finura do cimento é uma noção relacionada com o tamanho dos grãos do produto. É usualmente definida de duas maneiras distintas: pelo tamanho máximo do grão, e quando as especificações estabelecem uma proporção em peso do material retido a operação de

peneiramento em malha de abertura definida pelo valor da superfície específica (soma das superfícies dos grãos contidos em uma grama de cimento) (Costa, 2003).

A finura, mais precisamente a superfície específica do produto, é o factor que governa a velocidade da reacção de hidratação do mesmo e tem também sua influência comprovada em muitas qualidades de pasta, das argamassas e dos concretos (Costa, 2003).

O aumento da finura melhora a resistência, particularmente a resistência da primeira idade, diminui a exsudação e os tipos de segregação, aumenta a impermeabilidade, a trabalhabilidade e a coesão dos concretos (Costa, 2003).

c) Tempo de presa

O fenómeno da presa do cimento compreende a evolução das propriedades mecânicas da pasta no início do processo de endurecimento, propriedades essencialmente físicas, conseqüentemente, entretanto a um processo químico de hidratação. É um fenómeno artificialmente definido como o momento em que a pasta adquire certa consistência que a torna imprópria a um trabalho. Tal conceito se estende tanto a argamassa quanto aos concretos, nos quais a pasta de cimento esta presente e com missão aglutinadora dos agregados (Costa, 2003).

No processo de hidratação, os grãos de cimento que inicialmente se encontram em suspensão vão se aglutinando paulatinamente uns aos outros, por efeito de floculação, conduzindo a construção de um esqueleto sólido responsável pela estabilidade da estrutura geral. O prosseguimento da hidratação em subseqüentes idades conduz ao endurecimento responsável pela aquisição permanente de qualidades mecânicas, características do produto acabado (Costa, 2003). A presa e o endurecimento são dois aspectos do mesmo processo de hidratação do cimento, vistos em períodos diferentes – a pega na primeira fase do processo e o endurecimento na segunda e ultima fase do processo. A partir de um certo tempo após a mistura, quando o processo de presa alcança determinado estágio, a pasta não é mais trabalhável, não admite operação de remistura. Tal período de tempo constitui o prazo disponível para as operações de manuseio das argamassas e concretos, após o qual esses materiais devem permanecer em repouso, em sua posição definitiva, para permitir o desenvolvimento do endurecimento (Costa, 2003).

d) Resistência

A resistência mecânica dos cimentos é determinada pela ruptura à compressão de corpos de prova realizados com argamassas. A forma do corpo de prova, suas dimensões, traço da argamassa, sua consistência e o tipo de areia empregada são definidos nas especificações correspondentes, e constituem características que variam de país para outro (Costa, 2003).

e) Exsudação

É um fenómeno de segregação que ocorre nas pastas de cimento. Os grãos de cimento, sendo mais pesados que a água que os envolve, são forçados por gravidade a uma sedimentação. Resulta dessa tendência de movimentação dos grãos para baixo um afloramento do excesso de água, expulso das porções inferiores. Esse fenómeno ocorre antes do início da presa. A água que se acumula superficialmente é chamada de exsudação e é quantitativamente expressa como percentagem do volume inicial da mesma, na mistura. É uma forma de segregação que prejudica a uniformidade, a resistência e a durabilidade dos concretos. Já foi dito que a finura do cimento influi na redução da exsudação, considerando-se que a diminuição dos espaços intergranulares aumenta a resistência ao percurso ascendente da água (Costa, 2003).

2.1.1.3.3 Limitações do cimento Portland (CP)

Convém referir as consideráveis desvantagens que o CP apresenta, pesem embora os inestimáveis serviços que este material tem prestado, só assim se compreenderá o interesse de promover materiais alternativos.

Além de exigir, na fase de fabrico, um consumo energético muito significativo, o CP é por via disso também um forte promotor de poluição. É sabido que por cada kg de clínquer produzido, se libera 1kg de CO₂ para atmosfera. Face à produção anual de CP em termos mundiais (superior a 1.5 Biliões de toneladas) a indústria de cimento é responsável por cerca de 18% do efeito estufa associado à libertação de anidrido carbónico na atmosfera. Dai a ênfase posta na utilização

crescente de adições de tipo pozolânico que permitem reduzir entre 10 à 20% de cimento, sem alteração significativa das propriedades finais (Pinto, 2002).

Por outro lado os CP's são sensíveis a vários tipos de agressão, que promovem a sua alteração em direcção a fases mais estáveis do ponto de vista químico, mas destruindo quase sempre a sua continuidade estrutural:

- *São atacados pelos sulfatos, que promovem reacções expansivas;*
- *Estão sujeitos a fenómenos de carbonação por combinação do CO₂ atmosférico com Ca(OH)₂ livre, fazendo baixar o pH que garante a protecção das armaduras no betão armado;*
- *São a sede de reacções alcalis-agregados, lentas, mas fortemente expansivas;*
- *São relativamente permeáveis aos cloretos, que facilita o ataque as armaduras (Pinto, 2002).*

Além disso, apresentam alguma inflexibilidade na forma como devem fabricar-se as argamassas e betões em que intervêm como ligantes:

- *Dependência excessiva de uma composição granulométrica muito específica que por isso tem de ser muito controlada;*
- *Pouca ou nenhuma reactividade com materiais finos, como argilas ou pó de pedra, cuja presença tem de ser minimizada ou mesmo eliminada (Pinto, 2002).*

Estes aspectos, justificam por si só a necessidade de desenvolver sistemas alternativos, que garantindo comportamentos mecânicos e físico-químicos similares, abram a porta a uma maior gama de soluções, permitindo a utilização de matérias-primas menos estruturadas, mais baratas e que concorram para ajudar a solucionar grande parte dos problemas ambientais decorrentes da exploração continuada dos recursos (Pinto, 2002).

2.1.1.3.4 O cimento Portland e a reacção pozolânica

As pozolanas, e quase todos minerais com comportamento pozolânico, são muitas vezes adicionados ao cimento com o objectivo de se combinarem com o hidróxido de cálcio, o componente mais fraco que se forma na hidratação do cimento, dando origem a geles de silicatos do tipo C-S-H, que são, como se sabe, os principais componentes responsáveis pelo desempenho mecânico da matriz cimentícia. Assim, as adições pozolânicas concorrem para o ganho de resistência mecânica. Acresce ainda que o produto final assuma maior durabilidade, menor retracção e mais baixo calor de hidratação (Pinto, 2002).

As reacções pozolânicas são normalmente aceleradas com o aumento da temperatura, embora a temperatura ambiente se desenvolvam mais lentamente que as reacções de hidratação do cimento (Pinto, 2002).

2.1.1.3.5 Efeito da temperatura em materiais cimentícios

A microestrutura da pasta de cimento sofre alterações na sua estrutura física, composição química e quantidade de água, quando exposta a alta temperatura, afectando assim sua durabilidade. Com o aumento gradual da temperatura toda água capilar evaporável da pasta cimentícia é consumida até 105°C, ocorrendo uma redução da água fisicamente adsorvida e a água de constituição. A estabilidade dimensional da pasta de cimento é controlada pela perda de água, a evaporação da água livre não está associada a retracção significativa, mas a medida que se inicia a perda de água adsorvida, ocorre uma retracção considerável (Dos Anjos, 2009).

Segundo Mehta e Monteiro (citado por Dos Anjos, 2009) a uma temperatura de 300°C inicia-se a desidratação do silicato de cálcio hidratado, chegando a uma desidratação de 70% a uma temperatura de 500°C. O silicato de cálcio hidratado e o sulfoaluminato de cálcio são os primeiros sólidos da pasta a serem afectados pela alta temperatura. O Ca(OH)_2 se decompõem em cal e água a uma temperatura em torno de 350-400°C e a re-hidratação de cal livre pode conduzir a danos na pasta de cimento, caso esta esteja colocada em presença de humidade, após o resfriamento da pasta.

Com o aumento gradual da temperatura pode ocorrer o aumento da pressão nos poros da pasta, devido a expansão de volume de origem térmica ou de conversão cristalina, que podem conduzir a microfissuração e fragmentação da pasta.

O aumento da temperatura durante o período de cura do cimento acelera as reações químicas de hidratação, favorecendo as resistências iniciais, sem efeitos prejudiciais sobre as resistências a idades mais avançadas. Uma temperatura mais alta durante e depois do contacto inicial entre o cimento e a água reduz a extensão do período de latência de modo que a estrutura total da pasta hidratada se defina mais cedo (Neville, 1997 citado por Dos Anjos, 2009).

Apesar da temperatura de cura elevada aumentar a resistência inicial, como mencionado, a taxa de elevação e o valor da temperatura devem ser moderados, pois temperaturas muito elevadas inicialmente podem prejudicar a resistência e a porosidade dos materiais cimentícios a idades subsequentes, pois temperaturas muito altas podem produzir uma distribuição não uniforme dos produtos de hidratação no interior da pasta (Kim *et al.*, 2002 citado por Dos Anjos, 2009)

2.1.1.3.6 Principais tipos de cimento Portland

Actualmente existem vários tipos de cimento Portland, diferentes entre si, principalmente em função de sua composição. Os principais tipos oferecidos no mercado nacional e internacional, ou seja, os mais empregados nas diversas obras de construção civil são:

- Cimento Portland comum;
- Cimento Portland composto;
- Cimento Portland de alto-forno;
- Cimento Portland pozolânico.

Em menor escala são consumidos, seja pela menor oferta, seja pelas características especiais de aplicação os seguintes tipos de cimento:

- Cimento Portland de alta resistência inicial;
- Cimento Portland resistente aos sulfatos;
- Cimento Portland branco;

- Cimento Portland de baixo calor de hidratação;
- Cimento para poços petrolíferos (ABCP, 2002).

a) Cimentos Portland comuns e compostos

O primeiro cimento Portland lançado no mercado foi o conhecido CP, correspondendo actualmente ao CP I, um tipo de *cimento Portland comum* sem quaisquer adições além do gesso (utilizado como retardador da presa) (ABCP, 2002). Ele acabou sendo considerado na maioria das aplicações usuais como termo de referência para comparação com as características e propriedades dos tipos de cimento posteriormente sintetizados. Foi a partir do amplo domínio científico e tecnológico sobre o cimento Portland comum que se desenvolveu outros tipos de cimento, com o objectivo inicial de atender a casos especiais. Com o tempo verificou-se que alguns desses cimentos, inicialmente imaginados como especiais, tinham desempenho equivalente ao do cimento Portland comum original, atendendo plenamente às necessidades da maioria das aplicações usuais e apresentando, em muitos casos, inclusive, alguma vantagem adicional. A partir dos bons resultados dessas conquistas e a exemplo de países tecnologicamente mais avançados, como os da União Europeia, surgiu no mercado um novo tipo de cimento, o *cimento Portland composto*, cuja composição é intermediária entre os cimentos Portland comuns e os cimentos Portland com adições (alto-forno e pozolânico), estes últimos já disponíveis há algumas décadas. A tabela 1 apresenta a composição dos cimentos Portland comuns e compostos.

Tabela 1. Composição dos cimentos Portland comuns e compostos

Tipo de cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)			
		Clínquer + Gesso	Escória granulada de alto forno (sigla E)	Material Pozolânico (sigla Z)	Material Carbonático (sigla F)
Comum	CP I	100		-	
	Cp I-S	99-95		1-5	
Composto	CP II-E	94-56	6-34	-	0-10
	CP II-Z	94-76	-	6-14	0-10
	CP II-F	94-90	-	-	6-10

Fonte: ABCP, 2002

b) Cimentos Portland de alto-forno e pozolânicos

O consumo apreciável de energia durante o processo de fabricação de cimento motivou mundialmente a busca de medidas para diminuição do consumo energético.

Uma das alternativas de sucesso foi o uso de escórias granuladas de alto-forno e materiais pozolânicos na composição dos chamados *cimentos Portland de alto-forno e pozolânicos*, respectivamente. A tabela 2 apresenta a composição desses tipos de cimento.

Tabela 2. Composição dos cimentos Portland de alto-forno e pozolânicos

Tipo de cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)			
		Clínquer + Gesso	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
Alto-Forno	CP III	65-25	35-70	-	0-5
Pozolânico	CP IV	85-45	-	15-50	0-5

Fonte: ABCP, 2002

As escórias granuladas de alto-forno apresentam propriedades hidráulicas latentes, isto é, da forma como são obtidas endurecem quando misturadas com água. Contudo, as reacções de hidratação das escórias são tão lentas que limitariam sua aplicação prática se agentes activadores, químicos e físicos, não acelerassem o processo de hidratação (ABCP, 2002).

A cal liberada durante a hidratação do clínquer é o principal activador químico da escória quando esta é adicionada ao cimento, ao passo que a activação física é conseguida pelo aumento da finura quando a escória é moída separada ou conjuntamente com o clínquer (ABCP, 2002).

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (2002) os materiais pozolânicos, ao contrário das escórias granuladas de alto-forno, não reagem com a água da forma como são obtidos. Entretanto, quando finamente divididos, reagem com o hidróxido de cálcio em presença de água e na temperatura ambiente, dando origem a compostos com propriedades aglomerantes. Por essa razão, os materiais pozolânicos são utilizados conjuntamente com o clínquer, pois o hidróxido de cálcio é um produto normalmente resultante da hidratação deste.

A adição de escória e materiais pozolânicos modifica a microestrutura do concreto, diminuindo a permeabilidade, a difusibilidade iónica e a porosidade capilar, aumentando a estabilidade e a

durabilidade do concreto. Outras propriedades são também alteradas, incluindo a diminuição do calor de hidratação, o aumento da resistência à compressão em idades avançadas, a melhor trabalhabilidade e outros (ABCP, 2002).

c) Cimento Portland de alta resistência inicial

O *cimento Portland de alta resistência inicial* (CP V-ARI) embora separada do *cimento Portland comum*, é na verdade um tipo particular deste, que tem a peculiaridade de atingir altas resistências já nos primeiros dias da aplicação. O desenvolvimento da alta resistência inicial é conseguido pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, bem como pela moagem mais fina do cimento, de modo que, ao reagir com a água, ele adquira elevadas resistências, com maior velocidade. A tabela 3 apresenta a composição desse tipo de cimento.

Tabela 3. Composição do cimento Portland de alta resistência inicial

Tipo de cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)	
		Clínquer + Gesso	Material carbonático
Alta resistência inicial	CP V-ARI	100-95	0-5

Fonte: ABCP, 2002

Na figura 3 está apresentada a evolução média de resistência a compressão dos distintos tipos de cimento Portland.

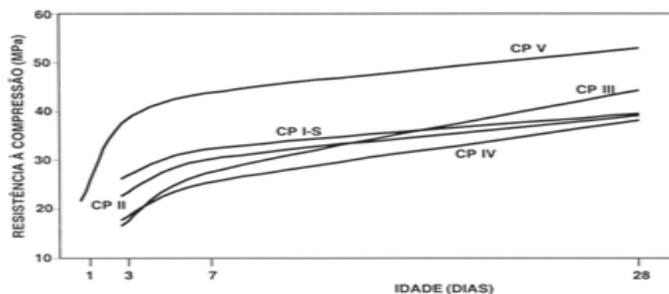


Figura 3. Evolução média de resistência à compressão dos distintos tipos de cimento Portland (Fonte: ABCP, 2002).

d) Cimentos Portland resistentes aos sulfatos

Os *cimentos Portland resistentes aos sulfatos* são aqueles que, como o próprio nome diz, têm a propriedade de oferecer resistência aos meios agressivos sulfatados, tais como os encontrados nas redes de esgotos de águas servidas ou industriais, na água do mar e em alguns tipos de solos; quaisquer um dos cinco tipos básicos (CP I, CP II, CP III, CP IV e CP V-ARI) podem ser considerados resistentes aos sulfatos, desde que obedeçam a pelo menos uma das seguintes condições:

- Teor de C_3A do clínquer e teor de adições carbonáticas dê, no máximo, 8% e 5% em massa, respectivamente. Cimentos do tipo alto-forno que contiverem entre 60% e 70% de escória granulada de alto-forno, em massa.
- Cimentos do tipo pozolânico que contiverem entre 25% e 40% de material pozolânico, em massa.
- Cimentos que tiverem antecedentes de resultados de ensaios de longa duração ou de obras que comprovem resistência aos sulfatos (ABCP, 2002).

e) Cimentos Portland de baixo calor de hidratação

O aumento da temperatura no interior de grandes estruturas de concreto devido ao calor desenvolvido durante a hidratação do cimento pode levar ao aparecimento de fissuras de origem térmica, que podem ser evitadas se forem usados cimentos com taxas lentas de evolução de calor, os chamados cimentos Portland de baixo calor de hidratação.

Os *cimentos Portland de baixo calor de hidratação*, são aqueles que geram até 260 J/g e até 300 J/g aos 3 dias e 7 dias de hidratação, respectivamente, e podem ser qualquer um dos tipos básicos.

f) Cimento Portland branco

O *cimento Portland branco* é um tipo de cimento que se diferencia dos demais pela coloração. A cor branca é conseguida a partir de matérias-primas com baixos teores de óxidos de ferro e

manganês e por condições especiais durante a fabricação, especialmente com relação ao resfriamento e à moagem do produto (ABCP, 2002).

O *cimento Portland branco* pode ser classificado em 2 subtipos: *cimento Portland branco estrutural* e *cimento Portland branco não estrutural*, cujas composições são mostradas na tabela 4.

Tabela 4. Composição dos cimentos Portland brancos

Tipo de cimento Portland	Código de identificação (sigla + classe)	Composição (% em massa)	
		Clínquer branco + gesso	Material Carbonático
Branco estrutural	CPB-25 CPB-32 CPB-40	100-75	0-25
Branco não estrutural	CPB	74-50	26-50

Fonte: ABCP, 2002

O *cimento Portland branco estrutural* é aplicado em concretos brancos para fins arquitectónicos. Já o *cimento Portland branco não estrutural* é aplicado, por exemplo, na fixação de azulejos e na fabricação de ladrilhos hidráulicos, isto é, em aplicações não estruturais, sendo esse aspecto ressaltado na sacaria para evitar uso indevido por parte do consumidor.

g) Cimento para poços petrolíferos

Constitui um tipo de cimento Portland de aplicação bastante específica, ou seja a cimentação de poços petrolíferos. O consumo desse tipo de cimento é pouco expressivo quando comparado aos outros tipos de cimentos. O *cimento para poços petrolíferos* (CPP), na sua composição não se observa outros componentes além do clínquer e do gesso para retardar o tempo de pega. No processo de fabricação do cimento para poços petrolíferos são tomadas precauções para garantir que o produto conserve as propriedades reológicas (plasticidade) necessárias nas condições de pressão e temperatura elevadas presentes a grandes profundidades, durante a aplicação nos poços petrolíferos (ABCP, 2002).

2.1.1.3.7 Influência dos tipos de cimento nas argamassas e concretos

A tabela 5 mostra, de forma simplificada, de que forma os diversos tipos de cimento agem sobre as argamassas e concretos de função estrutural com eles constituídos.

Tabela 5. Influência dos tipos de cimento nas argamassas e concretos

Propriedade	Tipo de Cimento Portland						
	Comum e Composto	Alto-Forno	Pozolânico	Alta Resistência Inicial	Resistente e aos Sulfatos	Branco Estrutural	Baixo Calor de Hidratação
Resistência à compressão	Padrão	Menor nos primeiros dias e maior no final da cura	Menor nos primeiros dias e maior no final da cura	Muito maior nos primeiros dias	Padrão	Padrão	Menor nos primeiros dias e padrão no final da cura
Calor gerado na reação do cimento com a água	Padrão	Menor	Menor	Maior	Padrão	Maior	Menor
Impermeabilidade	Padrão	Maior	Maior	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão
Resistência aos agentes agressivos (água do mar e esgotos)	Padrão	Maior	Maior	Menor	Maior	Menor	Maior
Durabilidade	Padrão	Maior	Maior	Padrão	Maior	Padrão	Maior

Fonte: ABCP, 2002

2.2 Os impactos ambientais da produção de cimento.

A indústria de cimento apresenta elevado potencial poluidor. Em todas as etapas do processo de moagem e homogeneização das matérias-primas; clínquerização no forno rotativo e resfriamento do clínquer; moagem do clínquer, adições e produção de cimento; ensacamento e expedição do produto; e pontos de transferência de materiais – há fontes da poluição.

Devido à necessidade de se alcançar altas temperaturas, a produção de cimento depende fundamentalmente de energia. Tradicionalmente, utilizam-se combustíveis fósseis, como carvão, óleo combustível e coque de petróleo. A co-incineração de resíduos é uma tentativa de reduzir o uso de tais combustíveis. Essa variedade de resíduos, chamada genericamente de *blend*, é então misturada à matéria-prima, ou adicionado nos fornos por algum sistema específico de alimentação (Milanez, 2007). Uma primeira parte dos poluentes é destruída pelas altas temperaturas, uma segunda parte incorporada ao clínquer e há ainda uma terceira parte que é dispersa juntamente com as emissões atmosféricas, causando diversos impactos sobre o meio ambiente e a saúde das pessoas que entram em contacto com esses materiais (Milanez, 2007).

Os poluentes primários emitidos no processo de fabricação de cimento são: material particulado, dióxido de carbono, óxidos de enxofre e óxidos de nitrogénio. Segundo o órgão ambiental norte-americano (citado por Santi e Sevá Filho, 2004), as plantas de fabricação de cimento estão entre as maiores fontes de emissão de poluentes atmosféricos perigosos, dos quais se destacam as dioxinas e furanos; os metais tóxicos como mercúrio, chumbo, cádmio, arsénio, antimónio e cromo; os produtos de combustão incompleta e os ácidos halogenados (USA, 1991; Usepa, 1996 citado por Santi e Sevá Filho, 2004)). Os metais pesados contidos nas matérias-primas e combustíveis, mesmo em concentrações muito pequenas, devido a sua volatilidade e ao comportamento físico-químico de seus compostos, podem ser emitidos na forma de particulado ou de vapor através das chaminés das fábricas (Usepa, 2000 citado por Santi e Sevá Filho, 2004).

Para o controle da poluição gerada na fabricação de cimento foram estabelecidos padrões de emissão para material particulado, metais pesados, cloretos, monóxido de carbono, dioxinas e furanos. De forma geral, o material particulado proveniente dos fornos, moinhos e resfriador de clínquer é direccionado para chaminés e retido em colectores com ciclone, filtros de manga e precipitadores electrostáticos. As medidas de controlo para a redução da emissão de poeiras fugitivas nas áreas de mineração e na área industrial são o abatimento dos particulados por aspersão de água e o enclausuramento das áreas de estocagem e beneficiamento de materiais, com a instalação de sistemas exaustores e de filtros colectores de pós, além da pavimentação e da limpeza das vias de circulação de veículos. Na maioria das estruturas fabris, na fase de clinquerização, entretanto, não são instalados equipamentos para o controle da emissão de gases

de combustão, vapores de sais metálicos ou outras substâncias perigosas originadas no processo de clínquerização (Santi e Sevá Filho, 2004).

2.2.1 Riscos na fabricação de cimento

Considera-se como principais critérios para avaliação do risco associado a um processo produtivo, os tipos e os volumes das substâncias e materiais manipulados, produzidos e em uso (Albert, 1997; Freitas, Porto, Pivetta, 2001 citado por Santi e Sevá Filho, 2004).

Devido às características do processo tecnológico, às propriedades físico-químicas e toxicológicas das matérias-primas e insumos empregados na fabricação do clínquer e do próprio cimento, as cimenteiras apresentam riscos para a saúde dos trabalhadores, para a saúde pública e para o meio ambiente, associados, principalmente, à exposição ao material pulverulento que permeia toda a cadeia de produção e às emissões de substâncias poluentes, que ocorrem de forma continuada, e mesmo em concentrações reduzidas, caracterizam o risco crónico.

É fonte de risco, portanto, todo o circuito do processo de fabricação de cimento: a mineração e a obtenção do calcário; a homogeneização e moagem das matérias-primas; a fabricação do clínquer; a moagem, ensacamento e expedição do cimento. A disseminação do risco continua com o uso final do cimento.

Na etapa de geração e transporte do resíduo da fonte geradora até a entrada do material no forno, há riscos de acidentes com vazamento ou derramamento de materiais perigosos; há riscos de emissão de substâncias voláteis, quando presentes na massa do resíduo, ou de poeiras geradas nas eventuais operações de pré-tratamento (moagem e mistura). Se o resíduo é inflamável, há risco de incêndio e explosão, com formação de nuvens de poluentes atmosféricos perigosos (Santi e Sevá, 1999 citado por Santi e Sevá Filho, 2004).

As exceções, ainda em fase de experimentação, tratam da redução da emissão de N_xO_y com a instalação de queimadores especiais ou de lavadores de amónia, para a redução dos óxidos. Durante a operação de moagem do clínquer para obtenção do cimento, ocorre emissão de

material particulado, promovendo a exposição dos empregados ao pó de cimento, cujos efeitos toxicológicos e alterações graves que causam à saúde são bem conhecidos: enfermidades do aparelho respiratório, da pele e mais os transtornos à visão – conjuntivite, queimadura nas córneas – além de gastrite, dermatites e bronquites crônicas associadas a enfisema (Baptista, 1995 citado por Santi e Sevá Filho, 2004)).

Das substâncias orgânicas poluentes possíveis de serem geradas no processo de fabricação de cimento, acetaldeído, benzeno, formaldeído, hexaclorobenzeno, naftaleno, dioxinas e furanos e os metais pesados arsénio, cádmio, chumbo e níquel são reconhecidos pela Organização Mundial de Saúde como carcinogênicos. Muitos dos poluentes são teratogênicos e suspeitos de provocarem danos aos sistemas cardiovascular, respiratório, endócrino, gastrointestinal, renal, reprodutor, imunológico e neurológico dos seres humanos (Scorecard, 2003 citado por Santi e Sevá Filho, 2004).

2.3 Aproveitamento de resíduos industriais para a produção de cimento Portland

Na era das questões ambientais, várias alternativas estão sendo utilizadas para aproveitamento de resíduos, quer sejam sólidos, líquidos ou gasosos. Com a utilização de técnicas de aproveitamento é possível manipular, seleccionar, estocar e transportar adequadamente resíduos que anteriormente eram rejeitados na produção e acabavam por apenas ocupar um lugar no espaço perdendo definitivamente o valor. Na actualidade, é possível reutilizar e aproveitar óleo lubrificante usado, resíduos oleosos e graxos, solventes, restos de tinta, água oleosa, entre outros (Gomes *et al*, 2003). Os resíduos citados podem ser aproveitados para a produção de cimento Portland.

A ideia de aproveitamento dos materiais torna a produção mais limpa, e minimiza os impactos ambientais, além de reutilizar os produtos que por muitos anos ficavam inertes em armazéns ou áreas de descarte. O processo de aproveitamento é um tanto complexo, mas quando se faz uma boa gestão junto a um corpo técnico qualificado e se tem um histórico das emissões, torná-lo-á viável (Gomes *et al*, 2003).

2.4 Produção de cimento em Moçambique

A capacidade instalada de produção de cimento em Moçambique está estimada em 1,142 milhões de toneladas anuais, resultante das contribuições das fábricas da Matola (na província de Maputo e com uma capacidade de 600 mil toneladas anuais), Dondo (província de Sofala, com uma capacidade de 240 mil toneladas), Nacala (província de Nampula, com uma capacidade de 250 mil toneladas) e da fábrica Sunera, localizada no distrito de Boane, na província de Maputo (com uma capacidade instalada de 52,8 mil toneladas). Todavia, para além do funcionamento deficiente de algumas fábricas, as necessidades imediatas do país estão estimadas em cerca de 1,4 milhões de toneladas anuais, superando, por conseguinte, a capacidade instalada. Segundo Sidónio dos Santos (citado por Macaueh, 2010) o facto das empresas actualmente existentes estarem localizadas, em Maputo (sul do país), Sofala (centro) e Nampula (norte), faz com que no caso de haver uma avaria em qualquer uma delas, a situação se repercuta na região onde se encontra localizada, por não haver uma fábrica alternativa para estabilizar o mercado.

Actualmente o governo moçambicano tem estado a estimular investidores externos para que invistam em Moçambique, de modo a suprir esta carência de cimento no mercado nacional. Um outro problema com que o estado se debate também, é a venda deste produto a preços inacessíveis para a maioria populacional moçambicana. Segundo a empresa Cimentos de Moçambique (citado pelo Jornal de Angola, 2011a), o agravamento do preço do seu produto deve-se a desvalorização do metical face às principais moedas estrangeiras usadas no país, nomeadamente, o dólar e o rand. A mesma salienta ainda que a matéria-prima para a produção do cimento, importada do exterior, registou um aumento superior a 20% e, acima de tudo, as matérias-primas são quotadas em dólar americano ou rand.

Os apelos emitidos pelo governo estão dando seus resultados. A empresa sul-africana de produção de cimento Pretoria Portland Cement (PPC) anunciou que vai investir, a partir de Fevereiro de 2011, cerca de 200 milhões de dólares norte-americanos na instalação de uma fábrica de cimento em Moçambique. De acordo com Inórico Borier (Citado pelo Mediafax, 2010), a fábrica será instalada na província de Maputo, sul de Moçambique, e terá capacidade para produzir cerca de 600 mil toneladas por ano. Acredita-se que a concretização deste projecto

virá reduzir a carência de cimento de construção que actualmente se regista no país e, por conseguinte, reduzir o seu custo considerado insuportável.

De acordo com Fernando Santos (Citado pelo Jornal Notícias, 2009), um número não especificado de pedidos de autorização para a construção e abertura de mais fábricas para produção de cimento no país foi submetido ao Centro de Promoção de Investimento (CPI) para análise da sua viabilidade. A aprovação destes projectos depende fundamentalmente do nível de calcário e clínquer existente na área pretendida e da viabilidade ambiental.

O crescimento do sector de construção em Moçambique provoca anualmente um défice de cerca de 140 mil toneladas no cimento, sendo necessários mais investimentos para evitar a paralisação de grandes obras; o país precisa anualmente de 1,4 milhões de toneladas de cimento, mas produz pouco mais de 1,2 milhões de toneladas.

Moçambique vai contar com mais cimenteiras num futuro próximo como é o caso da companhia britânica Consolidated General Minerals (CGM) que prevê a construção de uma fábrica de processamento de clínquer e empacotamento de cimento junto ao Porto da Beira, na província da Sofala, com um investimento inicial na ordem dos 24 milhões de dólares norte-americanos, o empreendimento terá capacidade para produzir 110 toneladas de cimento por hora (Jornal de Angola, 2011b). Um outro grupo de empresários chineses pretende construir uma fábrica de produção de cimento no distrito de Magude, província de Maputo, sul de Moçambique, num investimento de 78 milhões de dólares, outras propostas estão à mesa provenientes da Mozambique Cement & Development Company, Africa Great Wall Cement Manufacturer, e China International Fund (Jornal Noticias, 2009).

Moçambique tem assistido nos últimos anos a um aumento considerável de obras de grande envergadura, estando previstos diversos projectos do Governo e sector privado, como a construção das pontes sobre o Zambeze na cidade de Tete, Maputo-KaTembe e a Hidroeléctrica de Mpanda Nkuwa, na província de Tete, estudos actuais indicam que o consumo deste material ira atingir 1,5 milhão de toneladas em 2014, valor que deverá subir para 1,8 milhões de toneladas por ano, em 2018.

2.5 Produção mundial de cimento

A indústria de cimento está distribuída por quase todos os países do mundo, com actuação marcante tanto de empresas locais como de grandes grupos internacionais integrados e com desempenho global.

A indústria sistematicamente implanta novas unidades modernas e integradas. A produção mundial de cimento é significativa, da ordem de 2.800 milhões de toneladas, tendo ocorrido a seguinte evolução nas produções mundiais, como se ilustra na tabela 6, de acordo com dados da Cimento.org (2010) destacando-se, mais uma vez, a crescente produção da Ásia.

Tabela 6. Produção, consumo e comercialização do cimento no Mundo

Em milhões de Toneladas	Produção, Consumo e Comércio Mundial (milhões de toneladas anuais)				
	Anos	Produção	Consumo	Exportação	Importação
	1999	1.603	1.598	124	120
	2000	1.653	1.645	129	129
	2001	1.698	1.694	133	132
	2002	1.815	1.813	129	129
	2003	1.964	1.961	137	136
	2004	2.135	2.139	148	146
	2005	2.276	2.296	172	172
	2006	2.542	2.540	174	174
	2007	2.800	2.797	182	155

Fonte: Cimento.org

A produção por continente, mostra, claramente, o domínio da Ásia em termos de produção e consumo de cimento. A China, principal produtor de cimento da Ásia e do mundo, após o expressivo crescimento de quase 20% em 2007, agora, sozinha é responsável por 48% da produção mundial como se pode observar nas tabelas 7 e 8 que seguem:

Tabela 7. Produção de cimento por continente

Continentes/Milhões Toneladas 2007	Produção	Consumo
Américas	264	274
Europa	433	426
Ásia	1.966	1.937
África	125	137

Oceânia	11	24
Total Mundial	2.800	2.797

Fonte: Cimento.org

Tabela 8. Maiores produtores de cimento do Mundo

Maiores Produtores de Cimento (em milhões de toneladas)						
Países		2004	2005	2006	2007	%
1º	China	967,8	1.079,6	1.253,5	1.377,8	49,21%
2º	Índia	136,9	146,8	162,0	172,9	6,18%
3º	EUA	97,4	99,4	98,2	95,5	3,41%
4º	Japão	72,4	72,7	73,2	71,4	2,55%
5º	Espanha	46,6	50,3	54,0	54,7	1,95%
6º	Rússia	46,2	49,5	55,2	60,1	2,15%
7º	Coréia Sul	55,8	49,1	51,4	54,4	1,94%
8º	Itália	46,1	46,4	47,9	47,5	1,70%
9º	Turquia	41,3	45,6	49,0	50,8	1,81%
10º	Brasil	36,5	39,2	42,4	47,2	1,69%
11º	Tailândia	36,7	37,9	41,2	43,2	1,54%
12º	México	33,2	34,7	37,9	38,8	1,39%
ND	Outros	568,0	594,5	637,0	685,4	24,5%
Total Mundial		2.184,9	2.345,7	2.602,9	2.799,7	100,00%

Fonte: Cimento.org

Tabela 9. Maiores consumidores de cimento do Mundo

Maiores Consumidores de Cimento (em milhões de toneladas)					
Países		2004	2005	2006	2007
1º	China	961,9	1.058,3	1.218,1	1.345,3
2º	Índia	126,8	137,1	152,2	165,9
3º	EUA	121,3	128,0	127,3	114,6
4º	Japão	58,0	59,0	58,6	56,8
5º	Espanha	48,0	51,5	55,9	56,0
6º	Rússia	44,0	46,6	52,5	60,4
7º	Coréia Sul	54,9	46,3	48,4	50,8
8º	Itália	46,4	46,1	46,9	46,4
10º	Turquia	30,7	35,1	41,6	42,5
9º	Brasil	35,8	37,7	41,0	45,1
11º	México	33,4	33,2	35,9	35,9
12º	Irão	31,4	31,3	34,8	37,0
ND	Outros	562,10	587,10	655,20	740,30
Total Mundial		2.154,7	2.297,3	2.568,4	2.797,0

Fonte: Cimento.org

O consumo mundial de cimento ilustrado na tabela 9, e fortemente influenciado pelas importações. As importações mundiais concentram-se em vários países do globo e mesmo os Estados Unidos se posicionando na terceira posição como produtor de cimento do mundo,

posiciona-se na primeira posição como maior importador de cimento do mundo. Eles, os Estados Unidos, importam quase 25% do consumo de cimento do país. Destacamos o Iraque, que em 2007, posicionou-se como 6º maior importador de cimento do mundo, período em que foi intensificado a reconstrução do país, destruído pela guerra.

Tabela 10. Maiores exportadores de cimento do Mundo

Maiores Exportadores do Mundo				
Em milhões de toneladas		2005	2006	2007
1	China	22,2	36,1	33,0
2	Tailândia	15,7	14,7	18,2
3	Japão	10,2	10,1	9,6
4	Alemanha	6,7	7,3	8,7
5	Turquia	10,5	7,2	8,2
6	Indonésia	4,3	9,9	7,8
7	Taiwan	7,0	6,7	7,4
8	Índia	9,5	9,3	6,7
9	Coréia do Sul	6,0	6,2	6,3
10	Canadá	5,5	5,0	5,5
-	Outros Países	82,3	72,4	71,0
Total Mundial		179,9	189,9	182,4

Fonte: Cimento.org

Os maiores exportadores de cimento do mundo, que variava entre a Turquia, Japão e Tailândia, perderam a posição para o gigante Chinês, que saltou de 7 milhões de toneladas em 2004, para 36,1 milhões de toneladas exportadas em 2006 como se pode ver na tabela 10. Cabe observar que a China, ainda, detém o título da indústria cimenteira que mais polui no mundo emitindo cerca 848 kg CO₂/ton de cimento. (Fonte: Oficemen 2003 / Polysius China citado por Cimento.org, 2010).

3. CINZAS VOLANTES E ACTIVIDADE POZOLÂNICA

3.1 Resíduos sólidos industriais utilizados em argamassas/concretos

Actualmente existem três rotas que têm sido utilizadas, ou pelo menos estudadas, nestes últimos anos com relação à problemática de resíduos sólidos industriais. A primeira rota utilizada tem sido o processamento e disposição dos resíduos em aterros. Porém essas operações apresentam custos cada vez maiores. Além disso, os locais para disposição de resíduos sólidos têm diminuído, seja pelo esgotamento de sua capacidade de armazenagem, seja pela dificuldade de obter permissão para implantação de novos aterros, ou pela pressão das comunidades locais. Dessa forma, uma segunda rota tem sido estudada; evitar a geração de resíduos sólidos e/ou minimizá-los no processo de origem. A terceira rota, a reciclagem externa, tem sido a melhor solução para reduzir os custos, e talvez até gerar algum retorno financeiro para a empresa quando transforma esse resíduo num subproduto ou seja, alguns resíduos sólidos industriais podem ser utilizados como matéria-prima para fabricação de materiais usados na construção civil. A tabela 11 mostra alguns sectores industriais e seus principais resíduos que podem ser usados para a fabricação de argamassa ou concreto.

Tabela 11. Tipos de resíduos resultantes de processos industriais

Indústria	Resíduo Gerado
Termoeléctrica	Cinzas Volantes e Cinzas Pesadas
Alimentícia	Cascas de Arroz
Metalúrgica	Areia de fundição, Escória de Cobre e Escória de Aciaria Eléctrica e Auto-forno
Têxtil	Lodo Têxtil

Fonte: Armange, 2005

3.1.1 Resíduos provenientes das termoeléctricas

A utilização de carvão como combustível em centrais termoeléctricas produz resíduos sólidos inertes, denominados “cinzas”, que contêm pequenas quantidades de partículas carbónicas incombustíveis. Em média 1 kg de carvão produz cerca de 150 g de cinzas, que por sua vez contêm entre 6 e 24 g de carvão incombustível.

A composição química típica das cinzas de carvão mineral está apresentada na tabela 12 (Cheria e Rocha, 1997 citado por Armange, 2005).

Tabela 12. Composição química típica das cinzas pesadas e volantes

Elementos	Cinzas Volantes	Cinzas Pesadas
SiO ₂	58	55,98
Al ₂ O ₃	27,48	26,73
Fe ₂ O ₃	5,66	5,80
MnO	0,03	0,02
MgO	0,88	0,59
CaO	1,68	0,25
Na ₂ O	0,30	2,59
K ₂ O	2,74	1,33
TiO ₂	1,41	-
P ₂ O ₅	0,28	4,61
P.F.	1,15	4,61
CO ₂ Total	2,30	13,99
C orgânicos	0,63	3,79
S total	0,10	0,08
Cl	0	0,02

Fonte: Cheria e Rocha, 1997 citado por Armange, 2005

A indústria de construção civil é normalmente o maior usuário dos subprodutos do carvão mineral. Eles estão sendo cada vez mais usados como material aditivo ao concreto para obter melhores propriedades de produtos frescos e endurecidos. O uso de cinzas volantes modifica a composição da pasta de cimento, influencia a hidratação e a microestrutura de argamassas e pastas, a permeabilidade e a resistência do concreto (Poon, 1997 citado por Armange, 2005]. As suas características físicas e químicas são extremamente diferenciadas em função, sobretudo, do tipo de carvão e fornos utilizados. A composição granulométrica das cinzas volantes se situa, geralmente, entre 5 e 200 µm, com um tamanho médio de 30 a 50 µm. Assim, a utilização das cinzas volantes não necessita, em geral, de ser submetida à trituração antes de ser utilizada. Além disso, as partículas tendem a apresentar uma forma esférica, o que confere uma boa plasticidade à massa. A própria composição química parece ser muito variável: sílica (30-55%), alumina (15-40%), ferro (5-14%), cálcio (1-15%), sódio (0,1-1,5%), potássio (0,2-3,6%), magnésio (1-5%). Encontram-se também vestígios de outros elementos.

As cinzas volantes têm, em geral, um efeito redutor de plasticidade da massa, aumentando a secagem, reduzindo a formação de fendas e fissuras.

A granulometria das cinzas é de grande importância. As cinzas volantes mais finas parecem diminuir consideravelmente a absorção de água e melhorar as propriedades mecânicas, a contração durante a queima e a densidade, em comparação com amostras de granulometria mais grossa, contendo, embora, as mesmas quantidades de cinzas volantes. A utilização de cinzas volantes parece reduzir de forma positiva os fenómenos de eflorescência (depósito de sais sobre a superfície do concreto) (Dondi, 1998 citado por Armange, 2005).

Estudos realizados com cinza volante (*fly ash*) demonstraram que a substituição parcial do cimento pelo fly-ash influencia o conteúdo de hidroxilas disponíveis, o tempo de presa, o conteúdo de ar incorporado e o desenvolvimento da resistência. Os três factores que influenciam a reactividade do fly-ash são a granulometria, o seu teor de álcalis e o conteúdo alcalino no cimento.

A composição química do *fly ash*, outro parâmetro muito pesquisado, tem importante contribuição para sua eficácia, pois as pesquisas constam que o *fly ash*, para actuar de maneira a reduzir a expansão provocada pelas reacções álcali-sílica e álcali-silicato, deverá conter elevado teor de sílica amorfa e baixo teor de álcalis (Cruz, 2002 citado por Armange, 2005).

Os principais benefícios derivados da utilização de cimento Portland, nos quais tenha ocorrido a incorporação de cinza, quer na fabricação do cimento, quer na ocasião da mistura, são:

- Redução no consumo de cimento para conseqüente redução no custo;
- Redução no calor de hidratação;
- Melhora na trabalhabilidade;
- Ganho nas resistências mecânicas a idades mais avançadas;
- Redução na permeabilidade;
- Diminuição da retracção final;
- Aumento na durabilidade;
- Propriedades de resistências a sulfatos e, conseqüentemente, a solos agressivos;
- Diminuição no emprego de aditivos.

A cinza também pode ser empregada em argamassa, de forma semelhante ao concreto. Na argamassa a cinza pode substituir certa quantidade de cimento ou, ainda, substituir certa quantidade de areia, mantendo-se constante à proporção de cimento (Armange, 2005).

3.2 Propriedades físicas e químicas das cinzas

As propriedades físicas e químicas das cinzas podem variar consideravelmente em função da sua proveniência e até entre diferentes remessas da mesma central termoelétrica. Estas diferenças devem-se, fundamentalmente, aos diferentes tipos de carvão utilizados na queima, aos diferentes procedimentos empregues na combustão, e ao modo como as cinzas são recolhidas e armazenadas (Estévez e Gutiérrez, 1990, Jalali, 1991, Cánovas e Gutiérrez, 1992, Joshi e Lohtia, 1997, Rocha, 1999 citado por Azevedo, 2002)

3.2.1 Propriedades físicas

As partículas das cinzas volantes apresentam uma forma esférica de dois tipos, sólidas e ocas, são essencialmente vítreas (cerca de 80%), e têm uma finura elevada. A maioria das partículas têm um diâmetro compreendido entre menos de 1 μm e 150 μm , podendo ser mais finas ou mais grossas do que as de cimento. O diâmetro médio das partículas de cinzas volantes é de cerca de 7 μm a 12 μm , valor semelhante às do cimento (Joshi e Lohtia, 1997 citado por Azevedo, 2002). A superfície específica, aferida pelo método de Blaine, varia, em geral, de 250 m^2/kg a 550 m^2/kg (Alonso e Wesche, 1991 citado por Azevedo, 2002).

Genericamente, as características físicas das cinzas volantes apresentam uma variação apreciável relativamente à sua origem. De acordo com Malhotra e Ramezani pour (1994) (citado por Azevedo, 2002), a origem das cinzas não se relaciona com a sua finura e a sua superfície específica, e os autores consideram que há uma correlação muito ligeira entre a finura, medida pela percentagem retida no peneiro de 45 μm , e a superfície específica de Blaine.

As partículas com dimensões superiores a 125 μm são muito porosas. A ocorrência destas partículas está associada a grandes quantidades de carbono. Este material não queimado é

responsável pelo elevado valor da superfície específica verificado na maioria das cinzas volantes. Como consequência, elevados teores de carbono implicam maior exigência de água em betões contendo cinzas volantes. O teor de carbono também interfere na resistência: quanto maior for o teor de carbono das cinzas, menor é a resistência do betão (Alonso e Wesche, 1991 citado por Azevedo, 2002). A tabela 13 ilustra as propriedades físicas de algumas cinzas volantes.

Tabela 13. Propriedades físicas de algumas cinzas volantes

Cinza volante	Tipo de carvão	Massa volúmica (kg/m ³)	Finura (% retida no peneiro 45 µm)		Superfície específica Blaine (m ² /kg)
			peneiração seca	peneiração húmida	
1	betuminoso	2530	12.3	17.3	289
2	betuminoso	2580	10.2	14.7	312
3	betuminoso	2880	18.0	25.2	127
4	betuminoso	2960	14.0	19.2	198
5	betuminoso	2380	16.1	21.2	448
6	betuminoso	2220	30.3	40.7	303
7	sub-betuminoso	1900	26.4	33.2	215
8	sub-betuminoso	2050	14.3	19.4	326
9	sub-betuminoso	2110	33.0	46.0	240
10	lenhite	2380	18.8	24.9	286
11	lenhite	2530	2.5	2.7	581

Fonte: Azevedo, 2002

As cinzas volantes devem apresentar granulometria e superfície específica semelhante ou inferior à do cimento, de modo a evitar variações nas propriedades físicas da massa resultante da aplicação do mesmo, nomeadamente na trabalhabilidade.

Apesar de não haver acordo quanto à forma mais eficaz de aferir a finura das cinzas volantes, é consensual que maiores finuras conduzem a maior actividade pozolânica. Como a maioria das reacções químicas ocorre mais rapidamente com o aumento da finura das partículas é expectável que a actividade pozolânica de uma cinza volante seja dependente da área disponível para reacção (Jalali, 1991, Neville, 1995 citado por Azevedo, 2002).

3.2.2 Propriedades químicas

A composição química das cinzas volantes depende da classe e da quantidade de material mineral existente no carvão utilizado. No entanto, a grande maioria apresenta como principais

constituintes compostos químicos e cristais de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido férrico (Fe_2O_3) e cal (CaO). Em quantidades substancialmente inferiores, existem outros componentes como MgO , Na_2O , K_2O , MnO e TiO_2 . As cinzas volantes contêm, também, partículas de carbono não consumidas na combustão (Azevedo, 2002).

Na tabela 14 apresentam-se composições químicas de diversas cinzas volantes, provenientes de países distintos, sendo possível constatar a sua elevada variabilidade.

Tabela 14. Composição química das cinzas volantes

País	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	Perda ao fogo
	mínimo máximo								
Alemanha	42% 55%	24% 33%	5.4% 13%	0.6% 8.3%	0.6% 4.3%	0.2% 1.3%	1.1% 5.6%	0.04% 1.9%	0.8% 5.8%
Canadá	48% 56%	22% 33%	4.2% 11%	0.8% 9.7%	1.9% 44%	0.3% 1.8%	2.1% 5%	–	–
Dinamarca	48% 65%	26% 33%	3.3% 8.3%	2.2% 7.8%	–	1.1% 2.8%		–	3.1% 4.9%
Espanha	32% 64%	21% 35%	5.1% 26%	1.3% 20%	0.5% 2.7%	0.03% 0.7%	0.4% 4%	0.2% 4%	0.5% 10%
EUA	40% 51%	17% 28%	8.5% 19%	1.2% 7%	0.8% 1.1%	0.4% 1.8%	1.8% 3%	0.3% 2.8%	1.2% 18%
França	47% 51%	26% 34%	6.9% 8.8%	2.3% 3.3%	1.5% 2.2%	2.3% 6.4%		0.1% 0.6%	0.5% 4.5%

Fonte: Azevedo, 2002

Segundo a norma NP EN 196-5:2006 a pozolanicidade é determinada comparando a concentração de ião cálcio, expresso em óxido de cálcio, presente na solução aquosa em contacto com o cimento hidratado, depois de um período de tempo determinado, com a quantidade de ião cálcio que faz saturar uma solução da mesma alcalinidade. A pozolanicidade das cinzas está intimamente relacionada com o teor de SiO_2 , visto ser a sílica amorfa que se combina com a cal livre e a água dando origem à formação de quantidades suplementares de C-S-H. Segundo Alonso e Wesche (1991) (citado por Azevedo, 2002), cinzas com conteúdos de SiO_2 inferiores a 35% são praticamente inactivas como pozolanas e não devem ser incorporadas no betão ou na preparação de algum material cimentício. Com opinião díspar encontram-se Halstead (1986), Mehta (1985), Joshi e Lohtia (1997) (citados por Azevedo, 2002), que consideram que em termos de composição química, com excepção do teor de cálcio, a variação dos constituintes das cinzas volantes influenciam, aparentemente, de forma marginal as suas propriedades pozolânicas

ou cimentíceas. Alonso e Wesche (1991) (citado por Azevedo, 2002), indicam, também, que cinzas volantes com elevado teor de cal (15% a 40%) podem ser dotadas de propriedades aglomerantes e hidráulicas e que a sua inclusão em betões deve ser evitada.

O carbono presente nas cinzas volantes é resultado da combustão incompleta do carvão e dos aditivos orgânicos utilizados no processo da sua recolha. Em geral, o teor de carbono não é quantificado directamente, mas sim recorrendo à determinação do teor em não queimado (perda ao fogo). O teor de material não queimado inclui, além do carbono livre, perdas de água combinada e dióxido de carbono provenientes dos hidratos e dos carbonatos presentes nas cinzas volantes, sendo assumido, sem cometer um grande erro, como aproximadamente igual ao conteúdo de carbono.

A contribuição da quantidade de carbono presente nas cinzas é decisiva na exigência de água de pastas, argamassas e betões. O total de água necessário à obtenção de uma pasta de consistência normal é tanto maior quanto maior for o teor em carbono. O carbono contido nas cinzas volantes apresenta porosidade elevada e grande superfície específica, sendo capaz de absorver quantidades significativas não só de água, como de adjuvantes incluídos na amassadura do betão, nomeadamente superplastificantes, agentes introdutores de ar ou retardadores de presa.

Segundo Alonso e Wesche (1991) (citado por Azevedo, 2002), em geral, quanto menor for o teor de carbono melhor será a cinza volante para aplicação em argamassas e betões. No entanto, Malhotra e Ramezaniapour (1994) (citado por Azevedo, 2002), concluem que o teor de carbono não influencia significativamente o índice de actividade pozolânica, determinado através da relação entre resistências à compressão.

3.3 Vantagens e desvantagens na utilização de cinzas volantes

Em síntese, é possível enumerar as principais vantagens e limitações relacionadas com a adição de cinzas volantes no betão, argamassas, e pastas. Os principais proveitos, em termos gerais, são:

- Contribuir para a minimização de um problema de impacto ambiental, através da utilização de um subproduto industrial e da diminuição do consumo de cimento, contribuindo para a redução de emissões de CO₂ para a atmosfera;
- Reduzir o calor de hidratação;
- Aumentar a trabalhabilidade;
- Diminuir a exsudação e a segregação e contribuir para melhorar o acabamento superficial;
- Decrescer a permeabilidade e, conseqüentemente, melhorar a durabilidade;
- Melhorar o comportamento ao ataque de sulfatos para níveis superiores aos proporcionados por cimentos resistentes aos sulfatos;
- Aumentar a economia, proporcionada pelo menor custo das cinzas volantes em comparação com o do cimento ou de outras adições minerais, nomeadamente das sílicas de fumo;
- Possibilitar a obtenção de resistências mecânicas superiores, particularmente em idades mais avançadas;

Como principais desvantagens é possível apontar:

- A falta de uniformidade das características das cinzas;
- O uso de um material suplementar exige o conhecimento das suas implicações. O produtor deverá utilizar as cinzas volantes com especial atenção, nomeadamente no que concerne à dosagem de água. Um excesso de água pode trazer conseqüências mais nefastas na resistência à compressão
- A necessidade de dispositivos suplementares para armazenamento e manuseamento adequado;
- A redução do calor de hidratação que, apesar de favorável em tempo quente, pode afectar adversamente a cura quando exposto a baixas temperaturas;
- O aumento do tempo de presa;
- Um maior tempo de cura motivado pelo facto de as resistências mecânicas demorarem mais tempo a desenvolver-se;
- A redução dos níveis de hidróxido de cálcio, responsáveis pelo ambiente alcalino protector da corrosão das armaduras;

- O desenvolvimento de resistências iniciais é mais lento;
- A inibição da acção dos agentes introdutores de ar, nomeadamente aquando da utilização de cinzas com elevados teores de carbono.

3.4 Índice de actividade pozolânica (IAP)

Alguns materiais silicosos ou alumino-silicosos que, quando sozinhos, quase não têm propriedades hidráulicas, quando finamente divididos reagem com o hidróxido de cálcio na presença de humidade a temperatura ambiente, formando compostos com propriedades cimentícias, as cinzas volantes são um exemplo prático deste tipo de materiais.

A actividade pozolânica destes materiais consiste em reagir com o hidróxido de cálcio a temperatura ambiente por um tempo não muito longo e formar compostos aglomerantes e insolúveis em água idênticos aos obtidos na hidratação do cimento Portland (Lima, 2011).

O índice de actividade pozolânica pode ser determinado em relação ao cimento ou a cal.

3.4.1 Índice de actividade pozolânica com cimento

O índice de actividade pozolânica com cimento é calculado pela relação entre a resistência à compressão (Macedo, 2009). A resistência a compressão pode ser determinada em corpos de prova cúbicos em uma máquina de compressão universal (tensão) após cura húmida à temperatura ambiente. Para os ensaios preparam-se 3 corpos de prova calculando-se mais tarde a média.

O índice de actividade pozolânica do material em estudo com o cimento (IAP) pode ser determinado através da relação da resistência a compressão aos 28 dias das pastas com substituição do cimento pelo material de análise e da pasta de referência após cura húmida a temperatura ambiente (Macedo, 2009). O material pode ser utilizado em percentagens de 10%, 20%, 30%, e 40%.

$$IAP = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \times 100\%$$

Fórmula 1

Onde:

f_{CB} = Resistência média dos corpos de prova moldados com pozolana aos 28 dias;

f_{CA} = Resistência média dos corpos de prova moldados só com cimento aos 28 dias.

3.4.2 Índice de actividade pozolânica com cal

O índice de actividade pozolânica com cal é dado pela média da resistência à compressão, expresso em MPa, de três corpos de prova moldados com argamassa contendo hidróxido de cálcio, areia normal e material pozolânico (Macedo, 2011).

São moldados três corpos de prova e a cura se dá em duas etapas: nas primeiras 24 horas, nos moldes, à temperatura de 21 ± 2 °C, em seguida, os corpos de prova permanecem 6 dias na estufa à temperatura de 54° C.

Após este prazo, os corpos de prova são resfriados à temperatura ambiente, capeados com enxofre e, logo a seguir, ensaiados a compressão.

4. PARTE EXPERIMENTAL

4.1 Considerações gerais

A parte experimental do presente trabalho foi realizada no Laboratório de Controlo de Qualidade da empresa Cimentos de Moçambique, onde teve a duração de 45 dias durante a realização do estágio laboral. Os ensaios foram realizados nas secções de ensaios físicos e mecânicos, com aparelhagem moderna e avançada.

As matérias-primas para preparação das amostras foram colhidas, no primeiro dia de realização de ensaios tecnológicos, no depósito da área fabril, mas conhecido por hangar, subdividido em compartimentos contendo diferentes matérias, e transportadas, em sacos plásticos, para o laboratório onde foram posteriormente devidamente processadas.

4.2 Colheita e preparação da matéria-prima para preparação das amostras

De acordo com a norma NM NP EN 196-7:2000, foram colhidas quatro matérias-primas, para a preparação das cinco amostras destinadas aos ensaios previstos, nomeadamente: clínquer (representado na figura 4), gesso, calcário e cinzas volantes.

4.2.1 Substâncias Colhidas

15Kg de Clínquer, 1.5Kg de Gesso Natural, 5Kg de Calcário, 5Kg de Cinzas Volantes.



Figura 4. Clínquer (não moído) em forma de pelotas.

4.2.2 Procedimento de colheita

A segurança durante uma colheita é fundamental, partindo deste princípio protegeu-se as mãos vestindo luvas de borracha, e em seguida procedeu-se a colheita das respectivas quantidades das substâncias, referenciadas no item 4.2.2, com o auxílio de uma colher de colheita. Conservou-se

e transportou-se em sacos plásticos após a identificação dos mesmos, feita com a ajuda de um marcador.

4.2.3 Britagem e Moagem das matérias-primas

Após a colheita, as matérias-primas foram submetidas a britagem para reduzir o tamanho dos sólidos de modo a facilitar a moagem dos mesmos, utilizando um britador de pequeno porte de marca HUMBOLDT WEDAG como ilustra a figura 5 e como mostram as figuras 6, 7 e 8.



Figura 5. Britador de marca HUMBOLDT WEDAG.



Figura 6. Clínquer britado.



Figura 7. Gesso natural britado.



Figura 8. Calcário britado.

Para evitar o défice na quantidade, em termos de massa, das amostras de cimento a serem sintetizadas, pesou-se uma mistura de 4Kg contendo as meterias primas nas devidas proporções, segundo a tabela 15.

Tabela 15. Proporção das matérias-primas para preparação das amostras de cimento Portland.

	CP100	CP25CAL	CP30CAL	CP25CV	CP30CV
Clínquer (Kg)	3.80	2.85	2.66	2.85	2.66
Gesso (Kg)	0.20	0.15	0.14	0.15	0.14
Calcário (Kg)	0.00	1.00	1.20	0.00	0.00
Cinzas Volantes (Kg)	0.00	0.00	0.00	1.00	1.20
TOTAL (Kg)	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00

Legenda:

CP100: Cimento Portland à 100%.

CP25CAL: Cimento Portland substituído à 25% por calcário.

CP30CAL: Cimento Portland substituído à 30% por calcário.

CP25CV: Cimento Portland substituído à 25% por cinzas volantes.

CP30CV: Cimento Portland substituído à 30% por cinzas volantes.

No passo seguinte, moeu-se as 5 misturas de cimento (5 amostras), uma em cada vez com o auxílio de um moinho de bolas de pequenas dimensões de referência SKF-8Y510M como se pode ver na figura 9.

Posteriormente não foi necessária uma operação para homogeneização, porque a mesma ocorreu durante a moagem, ou seja durante a moagem a mistura é homogeneizada simultaneamente.

A moagem de cada amostra durou em média 1h20'.

As amostras, já moídas, foram conservadas numa sala climatizada e preparada para o efeito. As mesmas permaneceram por 48h, a uma temperatura inferior a 30°C, até a realização dos ensaios previstos.



Figura 9. Moinho de bolas de referência SKF-8Y510M.

4.3 Determinação das resistências mecânicas

Este ensaio consiste na determinação de resistência à compressão e a flexão, de provetes de forma prismática. O procedimento experimental foi regido segundo a norma NM NP EN 196-1:2000 a vigorar em território nacional, onde as leituras do tempo durante a preparação da argamassa são efectuadas de forma automática.

4.3.1 Fabricação dos provetes

Para cada amostra de cimento foram preparados 9 provetes totalizando um universo de 45 provetes, os quais foram ensaiados aos 2, 7, e 28 dias de cura. Em cada dia, 3 dos 9 provetes (de cada amostra) foram submetidos aos testes de resistência a flexão e compressão.

4.3.1.1 Substâncias necessárias à fabricação dos provetes

Água destilada, Cimento, Areia Normalizada, Óleo 60

4.3.1.2 Procedimento experimental

a) Preparação da argamassa

A argamassa obedeceu a proporção de 1:3:0,5 para cimento, areia e água respectivamente. Em cada amassadura, que deve durar 4 minutos, obteve-se 3 provetes resultantes da mistura de 450g de cimento, 1350g de areia, e 225g de água.

- Deitou-se a quantidade de H₂O medida no recipiente do misturador (figura 10) e em seguida introduziu-se o cimento pesado anteriormente;
- Regulou-se o misturador a velocidade lenta e misturou-se durante 30s, em seguida introduziu-se toda areia normalizada (figura 11), regularmente, em 30s. Em velocidade rápida misturou-se por mais 30s;
- Nos 90s seguintes o misturador permaneceu em repouso, e com a ajuda de uma espátula retirou-se a argamassa aderente às paredes do recipiente depositando-a no centro da mesma;
- A uma velocidade rápida amassou-se por mais 60s.



Figura 10. Misturador de marca ELE.



Figura 11. Areia normalizada CEN EN 196-1.

b) Moldagem dos provetes

Os provetes devem ter a forma prismática, de dimensão 40 mm × 40 mm × 160 mm. Os mesmos foram moldados logo após a preparação da argamassa.

- Primeiramente oleou-se o molde (para 3 provetes) com a ajuda de um pincel, e fixou-se à mesa do compactador (figura 12);
- Com uma colher dividiu-se a argamassa em 2 camadas, introduziu-se a primeira no molde e compactou-se com 60 pancadas;
- Em seguida introduziu-se a segunda camada, nivelou-se a face superior da argamassa com uma espátula, e compactou-se com mais 60 pancadas.



Figura 12. Compactador de marca RMU.

c) Conservação dos provetes (antes da desmoldagem)

Após a moldagem, os provetes foram conservados em uma sala climatizada, onde a temperatura era de (20 ± 1) °C. Os mesmos permaneceram nessas condições por 24h até a desmoldagem.

d) Desmoldagem dos provetes

Com um martelo desmoldou-se os provetes, dando algumas pancadas suaves nos vértices do molde de modo a libertar com facilidade os prismas recém-fabricados em seguida identificou-se os provetes com um marcador. Esta operação dura em média 3 minutos.

e) Conservação dos provetes na água

Desmoldados e devidamente identificados, os provetes foram imersos em água à 20°C, num aparelho para o devido efeito, de marca FITOCLIMA D1200 segundo a figura 13.

Os provetes permaneceram imersos em água até as datas programadas para a realização dos testes de resistência a flexão e compressão.



Figura 13. Aparelho para conservação de provetes em água de marca FITOCLIMA D1200.

4.3.2 Resistência a flexão e compressão

Depois de completarem 2, 7, e 28 dias de cura, os prismas foram submetidos aos testes de resistência a flexão e compressão.

O teste de *resistência a flexão* consiste em aplicar uma força verticalmente sobre um prisma por meio de um cilindro sobre a face superior, contrapondo-se a outros dois (que servem de apoio) na face inferior do mesmo, que culmina com a ruptura do prisma dividindo-o em duas partes aproximadamente iguais (semi-prismas).

No teste de *resistência a compressão*, os semi-prismas são intercalados entre dois pratos quadrangulares e são comprimidos com a aplicação de carga no sentido vertical que termina com a fragmentação dos mesmos.

Actualmente, com os avanços da tecnologia, já é possível realizar ambos ensaios usando o mesmo aparelho, de marca IBERTEST AUTOTEST 200/10W devidamente calibrado e programado onde os registos e a velocidade de aplicação das cargas são feitos automaticamente como é ilustrado na figura 14.



Figura 14. Aparelho para determinação de resistência a flexão e compressão.

4.4 Determinação da finura das amostras de cimento

A determinação da finura do cimento pode oferecer informações tanto quanto a presença de partículas grossas no cimento, como a uniformidade da finura.

Existem dois métodos para determinação desta propriedade do cimento segundo a norma NM NP EN 196-6:2005, que é de extrema importância, são eles:

a) Método de Peneirarão: consiste na peneirarão do cimento em peneiros normalizados, como se pode ver na figura 15, onde posteriormente calcula-se a percentagem com a massa dos grãos de dimensões superiores (resíduo de peneirarão) às da malha utilizada para o ensaio, e a massa total necessária para a peneirarão que é de 10g de amostra.



Figura 15. Peneiro normalizado com malha de abertura de 90 μ m.

b) Método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine): consiste em observar o tempo que leva uma dada quantidade de ar a atravessar uma camada compactada de cimento com dimensões e porosidade especificadas. Para o ensaio utiliza-se o permeabilímetro de Blaine (figura 16) expressa-se em termos de superfície mássica (específica) segundo a fórmula:

$$S = \frac{524,2 \times K \times \sqrt{t}}{\rho} \quad \text{Fórmula 2}$$

Onde: **k** é a constante do aparelho ($=3,5853 \text{ s}^{-0,5} \text{ cm}^{-1}$)

t é o tempo medido (s)

ρ é densidade do cimento (g/cm^3)

S é a superfície mássica do cimento (cm^2/g)



Figura 16. Permeabilímetro de Blaine.

4.4.1 Substâncias necessárias para determinação da finura

Gasolina, amostra de cimento, óleo leve.

4.4.2 Procedimento experimental

4.4.2.1 Método de peneiração

- Fixou-se o peneiro ao peneirador a vácuo de marca HOSOKAWA ALPINE Aktiengesellschaft 200 LS-N (figura 17);
- Com a ajuda de uma balança pesou-se 10g de cimento e deitou-se cuidadosamente no peneiro ao ponto de evitar perdas;
- Dispersou-se as partículas do cimento, em seguida colocou-se a tampa no peneiro e ligou-se o peneirador por 3 minutos;
- Retirou-se o resíduo do peneiro e pesou-se;
- Determinou-se a percentagem do resíduo na amostra de cimento.

OBS: Para as 5 amostras o procedimento foi o mesmo.



Figura 17. Peneirador a vácuo de marca HOSOKAWA ALPINE Aktiengesellschaft 200 LS-N.

4.4.3.2 Método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine)

a) Determinação do peso específico (densidade)

- Com o auxílio de uma proveta mediu-se 250ml de gasolina e introduziu-se no frasco volumétrico de Le Chatelier (Figura 18);
- Por meio de uma balança pesou-se 65g de cimento e lentamente introduziu-se no frasco volumétrico de Le Chatelier;

- Fez-se a leitura do volume ocupado pela massa de cimento;
- Determinou-se a densidade dividindo a massa pelo resultado obtido.



Figura 18. Frasco volumétrico de Le Chatelier (Fonte: HERMANOS ALAMO).

b) Determinação da finura pelo método de Blaine

- Com base na fórmula $m_1 = 0,500 \times \rho \times V$ (**Fórmula 3**) calculou-se a massa necessária para o ensaio, onde: m_1 é a massa necessária, ρ é a densidade e V o volume total da camada compactada;
- Com a célula metálica na posição vertical, introduziu-se um papel de filtro cobrindo totalmente o fundo poroso da célula e introduziu-se a massa m_1 dando ligeiras pancadas de modo a obter uma superfície plana de cimento;
- Colocou-se um segundo papel de filtro sobre o cimento e comprimiu-se levemente com ajuda de um pistão;
- Introduziu-se a célula no permeabilímetro de Blaine e tapou-se a mesma com um bujão específico.
- Abriu-se a torneira do aparelho e aspirando moderadamente elevou-se o líquido até a marca superior, em seguida fechou-se a torneira;
- Retirou-se o bujão da célula e o líquido começou a escorrer, activou-se o cronómetro quando o líquido atingiu a segunda marca e desactivou-se o mesmo quando o líquido coincidiu com a terceira e última marca;
- Registou-se o tempo t e aplicou-se na fórmula 2 para determinar a superfície mássica do cimento.

4.5 Determinação do tempo de presa das amostras de cimento

Segundo a norma NM NP EN 196-3:2005 o tempo de presa consiste em observar a penetração de uma agulha numa pasta de cimento de consistência normal até um momento em que se atinge um determinado valor.

A pasta de cimento de consistência normal tem uma resistência específica à penetração de uma sonda normalizada. Entretanto para determinar a quantidade de água à aplicar numa determinada pasta é necessária a realização de ensaios de penetração com quantidades de água diferentes.

4.5.1 Substâncias utilizadas para determinação do tempo de presa

Água destilada, Cimento.

4.5.2 Procedimento experimental

a) Determinação de consistência normal

- Com ajuda da balança pesou-se 500g de cimento, (114-136) g de água e introduziu-se no recipiente do misturador (figura 19);
- Accionou-se o misturador a uma velocidade lenta durante 90s, nos 15s posteriores a máquina manteve-se parada de modo a se retirar toda massa aderente as paredes interiores do recipiente e deposita-las no centro da mesma;
- Reactivou-se o misturador a uma velocidade lenta por mais 90s;
- Com uma colher retirou-se a pasta do misturador e rapidamente introduziu-se no molde de Vicat (previamente oleado), ainda com a mesma colher e em movimento de serra lizou-se a superfície superior da pasta e retirou-se o excesso de pasta;
- Regulou-se o aparelho de Vicat (figura 20) ajustando o ponteiro para a marca zero e em seguida levantou-se a sonda até a posição de espera;
- Colocou-se o molde no eixo da sonda do aparelho de Vicat, libertou-se a sonda lentamente até que a mesma entrasse em contacto com a pasta, e em seguida libertou-se a sonda rápida e completamente;
- Aguardou-se por 30s até a penetração da sonda na pasta saturar, em seguida fez-se a leitura da escala, que representa a distância entre as faces inferiores da sonda e da pasta;

- Repetiu-se os procedimentos anteriores até obter, na leitura da escala, uma distância que corresponde a quantidade ideal de água à adicionar ao cimento (sem areia) de modo a obter a pasta de consistência normal necessária ao ensaio para determinação do tempo de presa do cimento.



Figura 19. Misturador.



Figura 20. Aparelho de Vicat.

b) Determinação do tempo de início e fim de presa

- Preparou-se o aparelho de Vicat para princípio de presa, verificando a agulha e os intervalos de penetração. Entretanto ajustou-se os intervalos de penetração para 10 minutos, o que significaria que a agulha penetraria a pasta até ao fundo (se possível) em intervalos de 10 minutos;
- Fazendo o uso da pasta ideal, de consistência normal, obtida segundo a tabela 20, trasladou-se o molde do aparelho de Vicat para o aparelho de Vicat para princípio de presa (figura 21) e colocou-se por baixo da agulha do aparelho;

- Mergulhou-se o molde contendo a pasta num recipiente maior contendo água, de modo a deixar a pasta submersa;
- Activou-se o aparelho onde verificou-se a primeira penetração da agulha até ao fundo da pasta, voltando a sua posição inicial alguns instantes depois;
- Observou-se que a partir de um dado momento a agulha não penetrava a pasta por completo, ou seja a mesma já não atingia a base do molde, e registou-se o tempo. Considerou-se este tempo como sendo o tempo de início de presa do cimento em análise;
- Momentos mais tarde verificou-se ainda que a agulha simplesmente já não penetrava a pasta, ou seja colidia com a face superior da pasta e registou-se o tempo. Considerou-se este tempo como sendo o tempo de fim de presa do cimento em análise.



Figura 21. Aparelho de Vicat para início de presa.

5. RESULTADOS, A SUA ANÁLISE E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios de determinação da finura das amostras de cimento pelos métodos de peneiração e permeabilidade ao ar encontram-se nas tabelas 16 e 18 respectivamente. Na tabela 17 encontram-se postados os resultados do ensaio para determinação da densidade das amostras, dado fundamental para a realização do ensaio de Blaine.

Tabela 16. Valores de resíduos de peneiração em percentagem, para as 5 amostras em estudo.

	CP100	CP25CAL	CP30CAL	CP25CV	CP30CV
200 μm	0.0	0.9	2.0	0.0	0.0
90 μm	3.0	9.8	12.9	1.5	1.0
45 μm	13.0	22.0	28.5	9.0	7.0

Tabela 17. Valores das massas, volumes e densidades para as 5 amostras em estudo.

	CP100	CP25CAL	CP30CAL	CP25CV	CP30CV
Massa(g)	65	65	65	65	65
V ocupado(cm^3)	20.50	21.45	21.74	22.03	22.26
$\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	3.17	3.03	2.99	2.95	2.92

Tabela 18. Valores dos Blaines para as 5 amostras em estudo.

	CP100	CP25CAL	CP30CAL	CP25CV	CP30CV
Tempo t (s)	48.34	50.23	43.01	63.01	55.00
Blaine S (cm^2/g)	4122	4396	4122	5057	4773

Na figura 22 encontra-se ilustrada a variação da percentagem de resíduo de peneiração em função da abertura da malha dos peneiros.

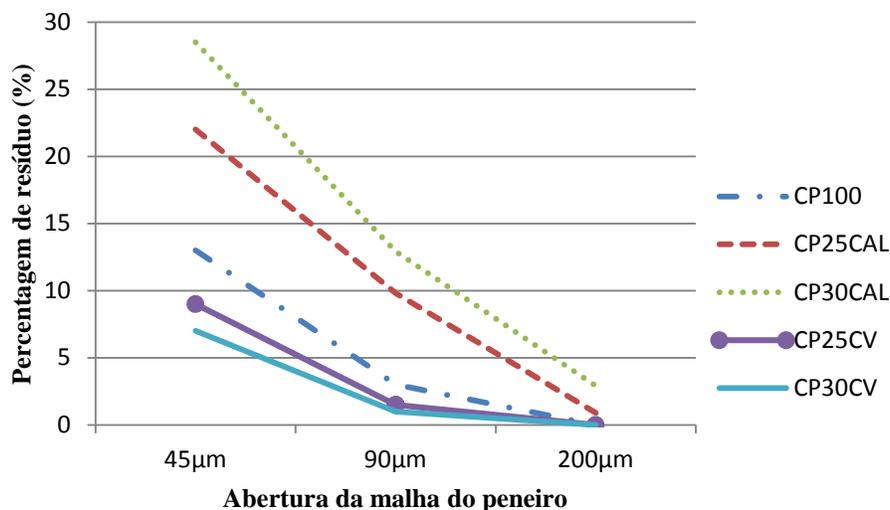


Figura 22. Variação da percentagem de resíduo de peneiração em função da abertura da malha dos peneiros.

As amostras revelaram uma divergência em relação as finuras, onde umas demonstraram serem mais finas em relação as outras. Desta feita constatou-se que:

- O cimento Portland à 100% é ligeiramente mais denso (tabela 17) em comparação com os cimentos contendo cinza volante e calcário cru, que apresentam valores ligeiramente menores, ou seja a introdução de cinzas volantes e calcário não afectou a densidade;
- O cimento contendo cinzas volantes é relativamente mais fino (curvas CP25CV e CP30CV), face ao 100% Portland (curva CP100), e este por sua vez mais fino que o contendo calcário cru (curvas CP25CAL e CP30CAL), tendo em conta que a moagem decorreu em condições aproximadamente iguais (figura 22),
- A acentuada finura que as cinzas volantes já possuíam antes de serem incorporadas no processo de moagem juntamente com o clínquer, veio a facilitar a moagem da mistura podendo desta forma influenciar a finura do cimento após a moagem diferentemente do calcário que por se encontrar cru dificulta o processo de moagem;
- A ausência de humidade também contribui positivamente no resultado, principalmente o obtido pelo método de Blaine (tabela 18) uma vez que a humidade interfere significativamente nos resultados provenientes deste ensaio;

- A presença de material não cozido, o que dificulta de certa forma a moagem, pode contribuir na finura do material, como é o caso do calcário adicionado como substituinte do cimento nas amostras CP25CAL e CP30CAL.

Nas tabelas 19 e 20 encontram-se os resultados dos ensaios para a determinação do teor de água para uma massa de consistência normal, e tempo de presa.

Tabela 19. Teor de água da pasta expresso em percentagem de massa do cimento.

	CP100	CP25CAL	CP30CAL	CP25CV	CP30CV
Cimento(g)	500	500	500	500	500
Água(g)	124	115	114	133	136
%	24.8	23.0	22.8	26.6	27.2

Tabela 20. Valores dos tempos de início e fim de presa dos cimentos em análise.

	CP100	CP25CAL	CP30CAL	CP25CV	CP30CV
Início(h:min)	02:00	02:50	02:20	03:10	03:40
Fim (h:min)	03:10	04:00	03:30	04:20	04:50

O tempo de início de presa sofreu alterações nas amostras contendo cinzas volantes e calcário em relação ao cimento portland 100%. Assim verificou-se que:

- A incorporação do calcário cru, assim como cinzas volantes como substituintes parciais, afecta bruscamente o tempo de início de presa, conduzindo a um aumento considerável em comparação com o cimento 100% Portland, como mostra-se na tabela 20;
- Esta variação pode advir da lenta hidratação do cimento, importunada pela diminuição da quantidade de água livre e disponível para reagir com os compostos activos do cimento;
- O teor de carbono pode afectar o tempo de presa, uma vez que este é capaz de absorver quantidades significativas de água enfraquecendo a hidratação do cimento;
- O carbono contido nas cinzas volantes apresenta uma porosidade elevada e grande superfície específica, o que lhes concede a naturalidade em absorver quantidades significativas não só de água, como de adjuvantes, superplastificantes, agentes introdutores de ar ou retardadores de presa;

- Um outro factor relevante é teor de C_3A e C_4AF , que desempenham um importante papel na presa do cimento;
- Durante a realização do teste para determinação do teor de água foi estabelecido que a quantidade de água varia em dependência da composição da amostra: para composições que possuíam cal apresentaram valores menores em comparação com a amostra padrão e composições com cinzas volantes como mostra a tabela 19.

Na tabela 21 que se segue encontram-se os resultados dos ensaios de resistência a flexão e compressão.

Tabela 21. Dados das resistências a flexão e compressão das 5 amostras.

IDADE	CP100		CP25CAL		CP30CAL		CP25CV		CP30CV	
	Flexão	Comp.	Flexão	Comp.	Flexão	Comp.	Flexão	Comp.	Flexão	Comp.
2DIAS (MPa)	4.4	22.6	2.8	11.6	2.3	7.9	2.7	12.8	2.8	12.8
	4.4	21.0	2.9	11.8	2.0	8.3	2.8	13.2	2.8	12.9
	4.8	22.6	3.1	11.4	2.0	8.4	3.6	12.9	3.0	13.3
		21.4		11.8		8.3		13.6		13.0
		20.4		11.9		7.9		13.0		12.9
		20.6		12.1		8.0		12.8		12.9
\bar{X}	4.5	21.4	2.9	11.8	2.1	8.1	3.0	13.1	2.9	13.0
7DIAS (MPa)	6.9	41.6	5.3	26.8	4.0	18.6	6.1	30.9	6.8	30.9
	7.4	37.0	5.2	25.8	4.6	19.1	5.9	29.6	6.0	31.8
	7.5	40.5	5.5	25.3	4.3	19.3	5.5	32.1	6.3	30.1
		41.5		25.1		19.0		31.0		29.2
		41.3		24.5		19.6		30.7		29.6
		41.9		25.6		19.8		30.4		30.8
\bar{X}	7.3	40.6	5.3	25.5	4.3	19.2	5.8	30.8	6.4	30.4
28DIAS (MPa)	8.7	52.3	6.6	35.3	6.3	28.1	9.7	45.9	8.1	46.8
	9.6	56.9	7.2	35.1	5.0	23.9*	7.1	46.0	8.1	47.0
	8.8	57.7	7.6	36.4	5.9	28.3	8.6	44.6	8.6	40.1*
		56.2		36.0		28.5		43.0		45.6
		49.8		37.5		29.8		47.2		47.6
		56.1		36.3		28.8		45.0		43.6
\bar{X}	9.0	54.8	7.1	36.1	5.7	28.7	8.5	45.3	8.3	46.1

*Valores excluídos no cálculo da média, por estarem fora dos intervalos aceitáveis.

Nas figuras 23 e 24 estão representadas as variações das resistências a flexão e compressão em função das idades de cura respectivamente.

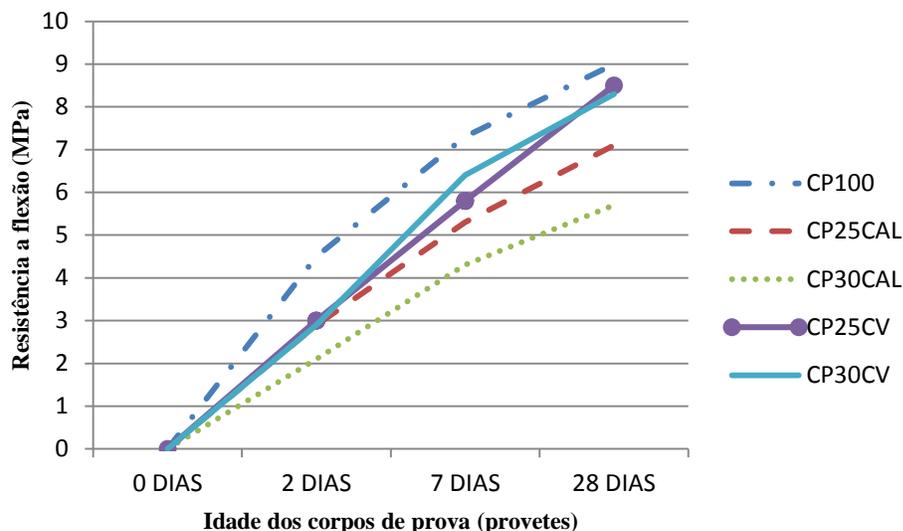


Figura 23. Variação da resistência a flexão em função das idades de cura.

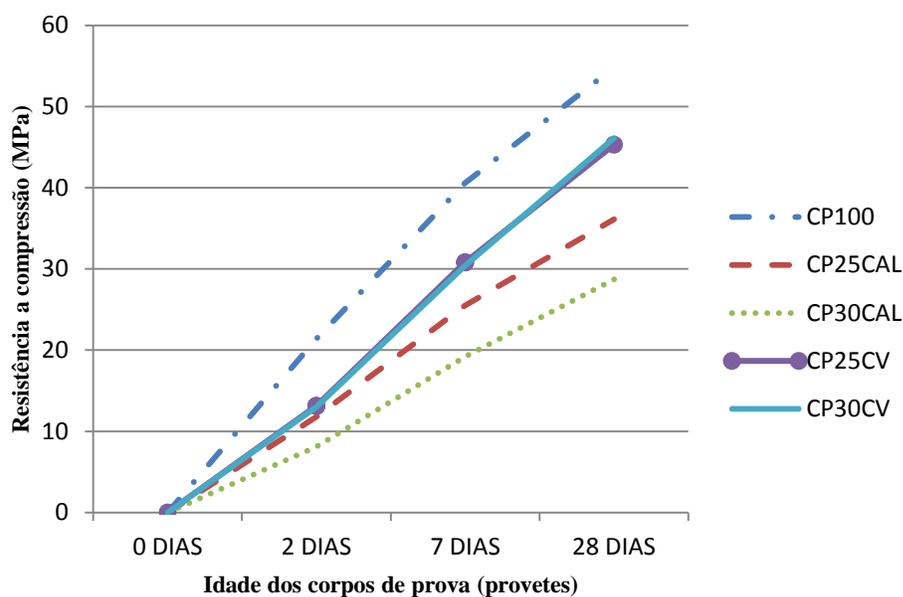


Figura 24. Variação da resistência a compressão em função das idades de cura.

As flexibilidades das amostras CP25CV e CP30CV não diferem tanto entre si, assim como em relação ao do cimento CP100 como mostra a figura 23. Por outro lado as amostras contendo calcário divergem, mostrando serem menos resistentes a flexão perante as restantes. Estes factos podem ter como origem:

- A redução da plasticidade do cimento, provocado pela promoção da secagem de forma acelerada;
- O teor de carbono no cimento, que aumenta com a introdução de cinzas volantes e calcário, pode ser responsável pela absorção das substâncias que conferem uma determinada plasticidade ao cimento;
- A redução da quantidade de clínquer que surge em resultado do uso dos substituintes, o que de certa forma empobrece a mistura final em componentes que conferem ou acrescem qualidades ao cimento.

O fenómeno verificado nas resistências a flexão repete-se nas resistências a compressão.

Por exemplo, as curvas de CP25 e CP30 (figura 23) tem o mesmo comportamento com as curvas CP 25 e CP 30 da figura 24. Podendo-se apoiar em uma das razões anteriormente citadas, que parece sustentar estes resultados, como é o caso do factor substituição. Ainda como causas, para estas variações, podem ser:

- A finura do cimento, que pode conferir mais resistência em casos onde se verificam uma finura elevada, tornando as partículas mais coesas;
- A eficácia da homogeneização, que pode atribuir resistências consideráveis ao cimento;
- A disponibilidade do C_3S e C_2S no cimento, sendo o primeiro responsável pela resistência em todas idades principalmente no primeiro mês.

A partir dos resultados obtidos, constatou-se ainda que:

- A presença de cinza volante e calcário cru no cimento portland diminui consideravelmente as resistências tanto à compressão assim como a flexão, com especial atenção ao teor de calcário, que pode tornar o cimento não conforme;
- O cimento Portland 100% *está conforme* segundo a norma NP EN 197-1:2001, e cumprindo os requisitos mecânicos e físicos especificados pela mesma é enquadrado na classe 52,5N;
- O cimento Portland substituído à 25% e 30% por cinza volante *está conforme* segundo a norma NP EN 197-1:2001, e cumprindo os requisitos mecânicos e físicos especificados pela mesma é enquadrado na classe 42,5N;

- O cimento Portland com calcário cru incorporado 25% em massa *está conforme* segundo a norma NP EN 197-1:2001, e cumprindo os requisitos mecânicos e físicos especificados pela mesma é enquadrado na classe 32,5N.
- Índice de actividade pozolânica com o cimento apontou uma percentagem de 82,7%, fazendo com que o material não seja considerado pozolânico aos olhos da norma, que estipula um mínimo de 85% para que o material se considere pozolânico.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Conclusões

Tendo em conta os objectivos traçados para o presente trabalho, que visava estudar a influência do calcário cru e cinza volante como substituintes do cimento nos teores de 25% e 30% em massa, e os resultados ora obtidos conclui-se que:

1. É possível a utilização de cinzas volantes e calcário no cimento, como substituintes;
2. Foi estabelecido também que a introdução de cinzas volantes e calcário faz com que o cimento mude as suas propriedades físico-químicas e mecânicas, e passe para outra classe de cimento;
3. A substituição de cimento Portland por calcário cru em teores superiores à 30% não é recomendável visto que os resultados obtidos substituindo o cimento à 30% por calcário cru não foram satisfatórios, não podendo, o produto, ser enquadrado em nenhuma das classes de cimentos correntes possíveis.
4. Em resultado do uso de cinzas volantes, faz-se o aproveitamento destes resíduos e diminui-se o impacto ambiental.

6.2 Recomendações

Tendo em conta que o presente trabalho limitou-se na realização de ensaios físico-mecânicos em argamassas, seria adequado também a realização de um estudo mais aprofundado sobre a durabilidade de concretos confeccionados com esta cinza e verificar o seu comportamento frente aos agentes agressivos ao longo do tempo.

Além disso, sugere-se um estudo sobre calcinação das cinzas para a produção de material amorfo e homogéneo quimicamente, com elevada actividade pozolânica, para que seja viável económica e ambientalmente.

Recomenda-se ainda estudos sobre o comportamento de argamassas à base de cinzas volantes alcali-activadas, preparadas com cimentos alcali-activados obtidos na ausência do clínquer, facto que futuramente pode se tornar em mais uma solução para os excedentes de cinzas nas centrais termoeléctricas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARMANGE, Luciana Cristina (2005). *Utilização de Areia de Fundação Residual para uso em Argamassa*. Disponível em: <http://www.tede.udesc.br>. Acesso em: 11.03.11

Associação Brasileira de Cimento Portland (2002). *Guia Básico de Utilização do Cimento Portland*. 7ª edição. São Paulo.

CHILAÚLE, Raúl (2006). *Estudo da adequidade do solo da Rádio Marconi em Boane na produção de blocos solo-cimento sem e com aditivos*. Trabalho de Licenciatura. UEM-Moçambique.

Cimento Itambé (2008). *Origem do Cimento*. Disponível em: <http://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/origem-do-cimento/>. Acesso em: 01.08.2011

Cimento.org (2010). *O mundo do cimento: cimento mundo*. Disponível em: <http://cimento.org>. Acesso em: 13.02.2011

CLARO, Anderson (1999). *Aglomerantes, Agregados e Aditivos*. Concreto in Loco.

CORDEIRO, Guilherme Chagas; Toledo Filho, Romildo Dias; Fairbairn, Eduardo de Moraes Rego (2009). *Influência da substituição parcial de cimento por cinza ultrafina da casca de arroz com elevado teor de carbono nas propriedades do concreto*. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

COSTA, Jhodson (2003). *Materiais de Construção II-Cimento Portland*.

COUTINHO, Joana de Sousa (2006). *Materiais de Construção 2*.

DE AZEVEDO, Aires Fernando Fernandes Leite Camões (2002). *Betões de Elevado Desempenho com Incorporação de Cinzas Volantes*. Tese de Doutorado. Universidade do Minho.

DIMANDE, Arsénio Alfredo (2010). *Implementação e Optimização das técnicas de controlo da qualidade dos cimentos portland com substituição parcial por cinzas volantes. Caso Sunera Cimentos, Lda*. Trabalho de Licenciatura. UEM-Moçambique.

DOS ANJOS, Marcos Alyssandro Soares (2009). *Adição de Resíduo da Biomassa de Cana-de-Açúcar em Pastas para Cimentação de Poços Petrolíferos Produtores de Óleos Pesados*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte-Natal.

DOS SANTOS, Elio Lopes (2005). *Uso de Resíduos Perigosos na Fabricação do Cimento*. São Paulo. Brasil. pp. 2-4.

EBAH (2008). *Cimento e suas análises*. Disponível:

<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABdGAAI/cimento-suas-analises>. Acesso em 04.04.2011

EBAH (2009). *Materiais de Construção II*.

E-Civil (2011). *O Cimento Portland*. Disponível em:

http://www.ecivilnet.com/artigos/cimento_portland.htm. Acesso em: 02.08.2011

GOMES, Aryene Lopes; Ávila, Amaro; Goulart, Emanuele da Silva; de Souza, Frank Pavan (2003). *Aproveitamento de Resíduos Industriais para a Produção de Cimento Portland*.

HERMANOS ALAMO (2010). *Produtos de Vidro*. Disponível em: <http://hermanos-alamo.com/producto/4cef7ebb51d51>. Acesso em: 20.06.2011

Instituto Nacional de Normalização e Qualidade (2006). *Método de ensaio de cimentos-Determinação da finura*. Norma Moçambicana NM NP EN 196-6:2005. Maputo-Moçambique.

Instituto Nacional de Normalização e Qualidade (2006). *Método de ensaio de cimentos, Parte 7: Métodos de colheita e preparação de amostras de cimento*. Norma Moçambicana NM NP EN 196-7:2000. Maputo-Moçambique.

Instituto Nacional de Normalização e Qualidade (2006). *Método de ensaio de cimentos, Parte 1: Determinação das resistências mecânicas*. Norma Moçambicana NM NP EN 196-1:2000. Maputo-Moçambique.

Instituto Nacional de Normalização e Qualidade (2006). *Método de ensaio de cimentos, Parte 3: Determinação do tempo de presa e da expansibilidade*. Norma Moçambicana NM NP EN 196-3:2000. Maputo-Moçambique.

Instituto Português de Qualidade (2001). *Cimento, Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes*. Norma Portuguesa NP EN 197-1:2001. Caparica-Portugal.

Instituto Português de Qualidade (2006). *Métodos de ensaio de cimentos, Parte 5: Ensaio de pozolanicidade dos cimentos pozolânicos*. Norma Portuguesa NP EN 196-5:2006. Caparica-Portugal.

Jornal de Angola (2011)a. *As razões do aumento Segundo a Cimento de Moçambique*. Disponível em: <http://www.opais.co.mz/index.php/sociedade/45-sociedade/8309-as-razoes-do-aumento-segundo-a-cimento-de-mocambique.html>. Acesso em: 10.02.11

Jornal de Angola (2011)b. *Moçambique aumenta fábricas de cimento*.

Jornal Notícias (2009). *Produção de cimento interessa investidores*.

LIMA, Jefferson Maia (2011). *Aglomerantes Cimento Portland*. Faculdade Ideal. Brasil. pp. 2-41.

Macauhub (2010). *Investidores Interessados no Negócio do Cimento em Moçambique*.

Disponível em:

<http://www.clubofmozambique.com/pt/sectionnews.php?secao=investimento&id=15675&tipo=online>. Acesso em: 10.02.11

MACEDO, Pamela Camargo (2009). *Avaliação do desempenho de argamassas com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar*. Tese de Mestrado. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Ilha Solteira-São Paulo. Brasil. pp. 60-63.

Mediafax (2010). *PPC entra na produção de cimento em Moçambique*.

MILANEZ, Bruno (2007). *Co-Incineração de Resíduos Industriais em Fornos de Cimento: Problemas e Desafios*. Curitiba.

PINTO, Amândio Luís Sanches Yrache Teixeira (2002). *Novos Sistemas Ligantes Obtidos por Activação Alcalina (Geopolimerização)*. Construção Magazine nº3.

ROBERTO, Fernando António da Costa (2001). *Balanço Mineral Brasileiro*.

SANTI, Maria Moura; Sevá Filho, Arsénio Oswaldo (2004). *Combustíveis e Riscos Ambientais na Fabricação do Cimento*.

VIEIRA, Nuno Francisco de Almeida Hugo (2008). *Efeito da cal e do pó de pedra na qualidade de blocos de solo estabilizado*. Trabalho de Licenciatura. UEM-Moçambique.

Wikipédia (2011). *Cimento Portland*. Disponível em:

http://pt.wikipedia.org/wiki/Cimento_Portland. Acesso em: 01.08.2011