

ESTUDO DA DURABILIDADE DE BETÃO ESTRUTURAL COM RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS

ANTÓNIO MANUEL OLIVEIRA CORREIA DA SILVA

Relatório de Projecto submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM MATERIAIS E PROCESSOS DE
CONSTRUÇÃO**

Orientador: Professora Doutora Maria Joana Álvares Ribeiro de
Sousa Coutinho

FEVEREIRO DE 2008

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2007/2008

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2007/2008 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

AGRADECIMENTOS

Expresso os meus agradecimentos à Professora Joana Sousa Coutinho pela disponibilidade e forma motivante com que orientou este meu trabalho.

Agradeço ao Manuel, ao Fernando, à Paula e à Eng. Patrícia a ajuda e colaboração prestadas e os bons momentos de convívio.

À D. Maria Teresa expresso os meus agradecimentos por estar sempre disponível para ajudar.

Não esqueço os meus amigos de curso, os elementos da “Irmandade”, que sempre demonstraram um espírito de entajuda, foram sempre uma energia extra nos momentos mais difíceis e souberam transformar as dificuldades em demonstrações de amizade.

Agradeço à minha Família o apoio e o amor que me deram. Sem eles nada disto seria possível.

RESUMO

A maioria dos casos de deterioração do betão (isto é, falta de durabilidade) está relacionada com a corrosão das armaduras devido à despassivação provocada por carbonatação ou ataque por cloretos.

Alguns dos problemas associados ao fabrico do cimento Portland (constituente essencial do betão) são o grande dispêndio de energia e a emissão de dióxido de carbono e outros gases que contribuem para o efeito de estufa.

Tem-se vindo a tornar evidente para a indústria do cimento e betão que a sustentabilidade na construção poderá ser alcançada se o clínquer Portland for parcialmente substituído por subprodutos pozolânicos ou com propriedades hidráulicas latentes. De facto no sector da construção tem vindo a aumentar o uso de adições para dar resposta ao aumento da procura do cimento a nível mundial. Ao usar estas adições é possível poupar tanto em termos energéticos e económicos, como ao mesmo tempo reduzir a “pressão” sobre o ambiente. Para além disto as adições são conhecidas como meios de melhorar a trabalhabilidade e a durabilidade do betão.

No seguimento destas ideias tem vindo a ser considerada uma série de resíduos com vista à sua aplicabilidade na construção, em particular em betão. Assim o presente trabalho diz respeito ao estudo das potencialidades de utilização de cinza de casca de arroz (RHA) e de um resíduo da indústria da pasta de papel (grits) como substitutos parciais do cimento. Estes dois materiais, para além de possuírem características distintas, têm um historial diferente na área dos materiais de construção: sobre as cinzas de casca de arroz foram já efectuados bastantes estudos por todo o mundo, enquanto que a substituição parcial do cimento por grits ainda é francamente incipiente.

Para determinar as potencialidades de utilização de cinza de casca de arroz e grits como substitutos parciais do cimento no betão considerou-se a abordagem habitual de estudar as propriedades em argamassa em primeiro lugar. Assim realizou-se um programa experimental utilizando provetes de argamassa em que o cimento Portland (CEM I) foi substituído em 10% por cinza de casca de arroz ou por grits e procedeu-se ao estudo e comparação de diversos parâmetros (de resistência e principalmente de durabilidade) entre estes provetes e provetes de controlo (nos quais não se efectuou qualquer substituição do cimento).

Os resultados obtidos no programa de ensaios presentes estão muito aquém do que seria esperado. No entanto não significam que a substituição parcial de cimento Portland quer por grits quer por RHA seja inviável, apenas indicam que a utilização destes materiais não é aceitável nas condições em que foram utilizados neste estudo. A principal conclusão deste estudo é que a finura tanto dos grits como da cinza de casca de arroz deve ser controlada de modo a que se complemente com a do cimento.

PALAVRAS-CHAVE: betão, argamassa, durabilidade, resíduo, adição.

ABSTRACT

The majority of concrete deterioration cases (lack of durability) is related with rebar's corrosion due to depassivation of steel induced by carbonation and chloride attack.

Some of the problems associated with the production of Portland cement (concrete's key ingredient) are the intensive use of energy and the emission of CO₂ together with other greenhouse gases.

It has also become obvious to the building sector that sustainable development of the cement and concrete industries can be achieved by partially replacing Portland cement by cementitious and pozzolanic by-products. In fact in the cement and concrete industries there has been an increasing consumption of additions to meet the rising demand for cement worldwide. Substantial energy, environmental load and cost savings can result in the use of additions as their presence in concrete is known to impart significant improvements in workability and durability.

Following these ideas a number of by-products have been considered to assess applicability in construction, particularly in concrete. Thus the present study concerns the study of the potential use of rice husk ash (RHA) and a by-product of the pulp-paper industry (grits) as a partial cement replacement. These two materials have distinct characteristics and a different history in the field of construction materials: many studies on rice husk ash have already been conducted around the world, partial replacement of cement by grits is practically unknown.

To determine the potential use of rice husk ash and grits as a partial cement replacement in the standard approach, of studying the properties in mortar was considered, as a first step. Therefore an experimental program was carried out using mortar samples where 10% of the Portland cement (CEM I) was replaced with rice husk ash or grits and various parameters (strength and mainly durability-related) were compared between these mortars and mortar with no replacement (control mortar).

Results are substantially different of what would be expected. But this doesn't mean that partial replacement of Portland cement or by grits or by RHA is impracticable, it only indicates that the use of these materials is not acceptable under the conditions in which they were used in this study. The main conclusion of this study is that the fineness of both grits and RHA must be controlled so as to complement the fineness of cement.

KEYWORDS: concrete, mortar, durability, by-product, addition.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. CONTEÚDO	5
2. ESTADO DA ARTE	7
2.1. CINZA DE CASCA DE ARROZ (RHA)	7
2.1.1. GENERALIDADES	7
2.1.2. INCINERAÇÃO DA CASCA DE ARROZ	7
2.1.2.1. Generalidades	7
2.1.2.2. Queima a céu aberto	8
2.1.2.3 Forno de leito fluidizado	8
2.1.2.4. Forno industrial	9
2.1.2.5. Outros métodos	9
2.1.3. EFEITO DAS CONDIÇÕES DE INCINERAÇÃO NA QUALIDADE DA RHA	10
2.1.4. MOAGEM DA RHA	11
2.1.5. HIDRATAÇÃO DA PASTA COM RHA	12
2.1.6. PROPRIEDADES DO BETÃO COM RHA	15
2.1.6.1 Generalidades	15
2.1.6.2. Trabalhabilidade	15
2.1.6.3. Tempo de presa	15
2.1.6.4. Resistência à compressão	15
2.1.6.5. Durabilidade	15
2.2. RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DA PASTA DE PAPEL – GRITS	16
2.3. ELEMENTOS NOCIVOS NO BETÃO	20
2.3.1. DESCRIÇÃO DOS ELEMENTOS NOCIVOS	20
2.3.1.1. – Magnésio	20
2.3.1.2. – Sulfatos	21

2.3.1.3. – Álcalis (Sódio e Potássio).....	22
2.3.1.4. – Fósforo	24
2.3.1.5. – Flúor	24
2.3.1.6. – Cloretos.....	24
2.3.1.7. – Crómio.....	27
2.3.1.8. – Zinco.....	27
2.3.1.9. – Estrôncio.....	27

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL..... 29

3.1. ASPECTOS GERAIS 29

3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS..... 29

3.2.1. MATERIAIS UTILIZADOS..... 29

3.2.2. CINZA DE CASCA DE ARROZ (RHA) 30

3.2.2.1. Características gerais..... 30

3.2.2.2. Caracterização físico-química 31

3.2.2.3. Granulometria 32

3.2.3. GRITS (GRT)..... 32

3.2.3.1. Preparação do material 32

3.2.3.2. Granulometria 34

3.2.3.3. Caracterização físico-química 34

3.3. ANÁLISE DOS ELEMENTOS NOCIVOS DA RHA E DOS GRITS EM BETÃO..... 36

3.4. ENSAIOS 37

3.4.1. ASPECTOS GERAIS..... 37

3.4.2. AVALIAÇÃO DA TRABALHABILIDADE..... 38

3.4.3. RESISTÊNCIAS MECÂNICAS..... 39

3.4.4. ÍNDICE DE ACTIVIDADE..... 41

3.4.5. TEMPO DE PRESA 42

3.4.6. EXPANSIBILIDADE..... 44

3.4.7. ENSAIO DE PENETRAÇÃO ACELERADA DE CLORETOS..... 45

3.4.8. ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉCTRICA..... 48

3.4.9. ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE 49

3.4.10. ENSAIO DE CARBONATAÇÃO ACELERADA 51

4. CONCLUSÕES	55
4.1. ANÁLISE DE PROPRIEDADES E RESULTADOS	55
4.2. CONCLUSÕES FINAIS.....	61
4.3. TRABALHOS FUTUROS	61
 BIBLIOGRAFIA	 63
 ANEXOS	 69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Emissões de gases de efeito de estufa, em Gigatoneladas por ano (IPCC, 2007).	2
Figura 2 – Esquema da possível utilização de resíduos no fabrico de clínquer.	3
Figura 3 – Esquema da possível utilização de resíduos no fabrico de cimento (CEM II a CEM V).	4
Figura 4 – Esquema de funcionamento de um forno de leito fluidizado (Sousa, 2005).	9
Figura 5 – Esquema de um fogão de alvenaria para incineração de casca de arroz (Sousa, 2005). ...	10
Figura 6 – Esquema do fogão “Lo-Trau” (Sousa, 2005).	10
Figura 7 – Curva de condições óptimas de incineração para obter RHA reactivo (Chandra <i>et al</i> , 1997). ..	11
Figura 8 – Variação do IAP (avaliado em argamassa) com o tempo de moagem (Sousa, 2005).	12
Figura 9 – Desenho esquemático da hidratação de pasta de cimento com RHA (Chandra <i>et al</i> , 1997). ..	13
Figura 10 – Esquema da zona de transição e da matriz de pasta de cimento no betão (Tiboni, 2007). ..	14
Figura 11 – Mecanismo de preenchimento de vazios e reforço pela RHA da zona de transição (Chandra <i>et al</i> , 1997).	14
Figura 12 – Diagrama com as principais fases na produção de papel pelo método kraft.	18
Figura 13 - Diagrama de recuperação de químicos e energia no processo de fabrico de papel (Pinto, 2005).	19
Figura 14 – Grits.	20
Figura 15 – Degradação de uma manilha de betão por ataque por sulfatos (John <i>et al</i> , 1998).	22
Figura 16 – Deterioração do betão por reacções álcalis-silica reactiva (Sousa Coutinho, 2006).	23
Figura 17 – Corrosão da armadura por "picadas" causada por cloretos (Sousa Coutinho, 2006).	24
Figura 18 – Efeitos da corrosão da armadura: (a)-fendilhação, (b)-descamação, (c)-delaminação e (d)- efeito nos cantos (Sousa Coutinho, 2006)	25
Figura 19 – Classes de exposição aos cloretos (no betão) preconizadas na NP-EN 206-1	25
Figura 20 – Classes de teor de cloretos no betão preconizadas na NP-EN 206-1	26
Figura 21 – Máximo teor de cloretos no betão preconizado na NP EN 206-1	26
Figura 22 – Curva granulométrica do cimento utilizado.	30
Figura 23 – Cinza de casca de arroz.	31
Figura 24 – Curva granulométrica da RHA.	32
Figura 25 – Máquina utilizada na moagem dos grits (esquerda) e subsequente peneiração (direita). ..	33
Figura 26 – Material retido no peneiro 250µm (à esquerda, não utilizado) e restante material (à direita, utilizado nos ensaios).	34
Figura 27 – Granulometria dos grits (moídos, prontos a utilizar).	34
Figura 28 – Avaliação da trabalhabilidade.	39
Figura 29 – Ensaios de resistências mecânicas: compressão (esquerda) e flexão (direita).	40

Figura 30 – Conservação dos provetes em água a $38 \pm 2^\circ\text{C}$	41
Figura 31 – Imagem da esquerda: Vista lateral mostrando o molde em posição vertical para a determinação do tempo de início de presa. 1-Molde em borracha dura. 2-Prato para pesos adicionais. 3-Placa de vidro (NP EN 196-3) (Dimensões em milímetros) Imagem da direita: Aparelho de Vicat para a determinação da consistência da pasta normal e do tempo de presa (a agulha representada é a utilizada para a determinação do tempo de fim de presa).	42
Figura 32 – Determinação do tempo de fim de presa da pasta com RHA.....	43
Figura 33 – Aparelho de Le Chatelier. Medidas em milímetros (Neville, 1995)......	44
Figura 34 – Aparelhos de Le Chatelier contendo pasta com grits (esquerda) e com RHA (direita).	45
Figura 35 – Ensaio de penetração de cloretos segundo a E 463.	46
Figura 36 – Profundidade de penetração de cloretos (parte mais clara).	47
Figura 37 – Curvas de absorção capilar e regressão linear para os provetes ensaiados.	50
Figura 38 – Ensaio de absorção de água por capilaridade.	51
Figura 39 – Câmara de carbonatação acelerada.	52
Figura 40 – Profundidades de carbonatação.	53
Figura 41 – Relação entre as granulometrias dos diferentes materiais.	56
Figura 42 – Índices de actividade exigidos para as diversas adições (Sousa Coutinho, 2006)	59

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Valor limite superior do teor de sulfatos (em % de SO ₃)	21
Quadro 2 – Composição química do cimento utilizado (disponibilizada pela Secil).....	30
Quadro 3 – Composição química da RHA (Cincás).....	31
Quadro 4 – Características físicas da RHA (Cincás).....	32
Quadro 5 – Caracterização físico-química dos grits.	35
Quadro 6 – Análise de potenciais elementos nocivos introduzidos pelos grits ou RHA estudados.	36
Quadro 7 – Quantidades usadas para o fabrico das argamassas (A/L: razão água/ligante).....	38
Quadro 8 – Traços em peso (em função da massa do ligante).....	38
Quadro 9 – Diâmetro de espalhamento (mm) segundo ASTM C 109/90.	39
Quadro 10 – Resistências (flexão e compressão) aos 7, 28 e 90 dias em MPa.	41
Quadro 11 – Resistências (flexão e compressão) aos 28 dias para o ensaio do índice de actividade.	41
Quadro 12 – Tempos de presa dos diferentes tipos de pasta.	43
Quadro 13 – Leituras e resultados do ensaio de expansibilidade.	45
Quadro 14 – Coeficientes de difusão aparente.....	48
Quadro 15 – Resistividade das argamassas.	49
Quadro 16 – Coeficientes de absorção.....	51
Quadro 17 – Resultados do ensaio de carbonatação acelerada.	53
Quadro 18 – Valores de d(0,1), d(0,5) e d(0,9) em µm.....	55
Quadro 19 – Superfície específica dos materiais utilizados.	56
Quadro 20 – Tempo de início de presa de acordo com a classe de resistência dos cimentos.....	57
Quadro 21 – Resultados obtidos para as diferentes argamassas e comparação dos resultados.	58
Quadro 22 – Classes de resistência à penetração de cloretos no betão (Gjorv, 2005)	60
Quadro 23 – Coeficientes de absorção em betão (Browne, 1991).....	60

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

CEM – Cimento

CSH – Silicatos cálcicos hidratados

CTL – Controlo

DEC – Departamento de Engenharia Civil

FAO – Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

GHG – Gases com efeito de estufa

GRT – Grits

IA – Índice de Actividade

LABEST – Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

RHA – Cinza de Casca de Arroz

SP – Superplastificante

D – Coeficiente de Difusão em estado não estacionário [m^2/s]

S – Coeficiente de absorção por capilaridade [$mg/(mm^2 \times min^{1/2})$]

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

O betão armado é o material chave que permite que a Humanidade desenvolva a construção, sendo os respectivos requisitos exigentes quer em termos técnicos quer económicos (Dhir *et al*, 1999) e também no que se refere à durabilidade e sustentabilidade. Na realidade o desenvolvimento sustentável só poderá ser alcançado se os materiais produzidos e utilizados e as estruturas projectadas e construídas apresentarem desempenho suficiente ao longo da vida útil, relações custo-benefício favoráveis e contribuirão positivamente para o ambiente (Swamy *et al*, 2000).

Cerca de 50% dos gastos na indústria da construção na Europa correspondem a reparação e reabilitação (Basheer *et al*, 2002).

A maioria dos casos de deterioração do betão (isto é, falta de durabilidade) está relacionada com a corrosão das armaduras devido à despassivação provocada por carbonatação ou ataque por cloretos (Papadakis, 2000), e de facto as patologias prematuras em estruturas de betão armado ou pré-esforçado são causadas por elevada permeabilidade de betão poroso, protecção insuficiente e subavaliação de actividade corrosiva do ambiente (Petranek, 2006), isto é por falta de durabilidade que poderá ser mitigada se forem utilizadas adições pozolânicas, reconhecendo-se que se pode conseguir um desenvolvimento sustentado das indústrias do cimento e betão recorrendo a subprodutos com características cimentícias ou pozolânicas (Papadakis, 2000).

Alguns dos problemas associados ao fabrico do cimento Portland (constituente essencial do betão) são o grande dispêndio de energia e a emissão de dióxido de carbono e outros gases que contribuem para o efeito de estufa. Tendo-se tomado consciência de que existem problemas ambientais, em resultado do comportamento humano e abuso na utilização de alguns dos recursos naturais, tem-se manifestado o interesse em minimizar as consequências da actividade humana sobre o ambiente global, em particular relativamente à indústria da construção. Na realidade, um metro cúbico de um bom betão estrutural, produzido com 320kg de cimento Portland, gera cerca de 0,41 toneladas de CO₂, que são emitidas para a atmosfera. Por cada tonelada de cimento Portland produzido, as fábricas de produção de cimento geram aproximadamente a mesma quantidade de dióxido de carbono, um dos principais gases com efeito de estufa. A indústria do cimento é uma ávida consumidora de energia, sendo necessários cerca de 1,58GJ para se produzir uma tonelada de cimento Portland (Samarin, 1999). A indústria do cimento contribui com cerca de 5% das emissões antropogénicas de CO₂ (das quais metade é intrínseca ao próprio processo químico de produção, 40% é proveniente dos combustíveis utilizados e os restantes 10%, emitidos de forma indirecta, que resultam da utilização de energia eléctrica e transportes (Cimpor, 2007)), tornando a indústria cimenteira num importante sector nas estratégias de redução das

emissões de CO₂. No seu conjunto, as emissões em 1994, dos 10 principais países produtores de cimento totalizaram 63% das emissões totais de CO₂ referentes à produção de cimento (Worrell *et al*, 2001).

Devido ao fenómeno do aquecimento global, a emissão de gases com efeito de estufa (GHG) é uma das questões ambientais que merecem mais atenção. As metas apontadas pelo protocolo de Quioto não estão a ser atingidas, significando isto que apesar de terem sido tomadas algumas medidas para minimizar o problema, as emissões de CO₂ continuam a aumentar (Sousa Coutinho, 2007).

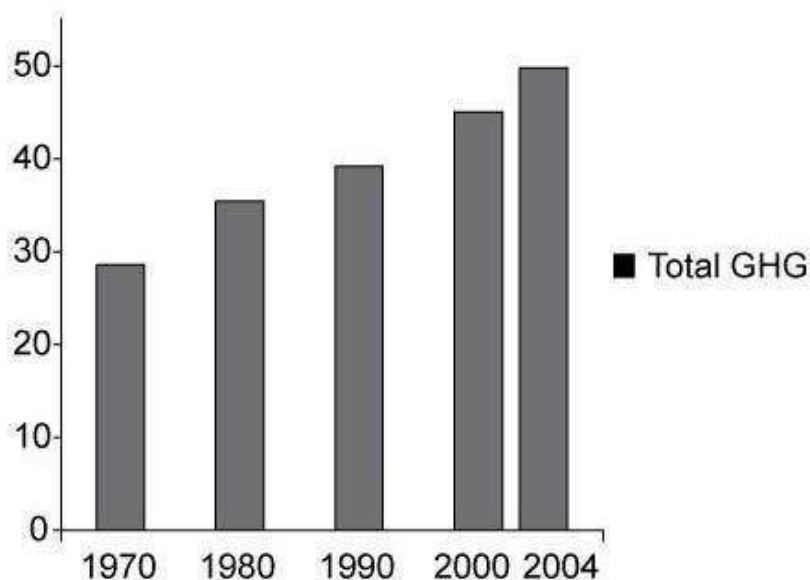


Figura 1 – Emissões de gases de efeito de estufa, em Gigatoneladas por ano (IPCC, 2007).

A redução das emissões de CO₂ associadas à produção de cimento pode ser conseguida (Cimpor, 2007):

- **Reduzindo a quantidade de clínquer no fabrico de cimento** (substituindo-se parte do clínquer por outros materiais reactivos adequados)
- **Aumentando a eficiência energética do processo de produção de clínquer** (que se prende quase exclusivamente com a tecnologia da linha de produção)
- **Aumentando a percentagem de energia proveniente de combustíveis alternativos** (por substituição dos combustíveis fósseis não-renováveis por combustíveis alternativos, provenientes de resíduos ou subprodutos industriais ou urbanos, como por exemplo o uso de pneus)
- **Substituindo combustíveis com factores de emissão de CO₂ elevados, por outros com factores de emissão mais reduzidos** (utilizando por exemplo pneus triturados ou coque de petróleo em detrimento do carvão)

Em consonância com o primeiro ponto apresentado em cima, tem-se vindo a utilizar cinzas volantes, escórias de alto forno, sílica de fumo, cinza de casca de arroz (RHA) e outros subprodutos industriais ou naturais, tais como minerais como a diatomite ou o metacaulino, que podem ser usados como “extensões” do cimento Portland, as chamadas “adições” do betão. De facto, nas indústrias do cimento e betão tem vindo a aumentar o uso de adições para dar resposta ao aumento da procura do cimento a

nível mundial. Ao usar estas adições é possível poupar tanto em termos energéticos e económicos, como ao mesmo tempo reduz-se a pressão sobre o ambiente. Para além disto as adições são conhecidas como meios de melhorar a trabalhabilidade e a durabilidade do betão.

Em 2001 eram produzidas cerca de 1,5 mil milhões de toneladas de cimento em cada ano em todo o mundo (Glass, 2001), mas prevê-se que esta quantidade aumente para 3,5 mil milhões de toneladas por ano por volta de 2015. Por estas razões, a maior parte do aumento do consumo de cimento será colmatado pelo uso de adições. Na realidade, durante o século XX, verificou-se um aumento no consumo de adições minerais pela indústria do cimento e betão, prevendo-se um crescimento acrescido nos próximos anos.

O conhecimento do betão tem de prosseguir a sua evolução de modo a que este material continue a satisfazer as necessidades crescentes dos seus utilizadores. A reutilização de resíduos de consumo e subprodutos industriais é essencial para conduzir a uma produção de betão cada vez mais “verde” (Basheer *et al*, 2002) A utilização de subprodutos constitui, na realidade, um método ambientalmente correcto de consumo de grandes quantidades de resíduos que de outra forma poderiam poluir o solo, águas e ar (Mehta, 1994).

Na realidade um resíduo constitui um material cuja génese não se pode facilmente evitar e sem interesse económico, sendo necessária a sua remoção. A primeira regra que se deve observar na gestão de resíduos é evitar, na medida do possível, a sua produção. Se a produção de um determinado resíduo não poder ser evitada deve-se procurar criar condições de forma a gerar procura do resíduo por exemplo valorizando-o para reciclagem. A procura de um resíduo é torná-lo economicamente atraente (boa relação custo/benefício) para o consumidor final. Os benefícios podem incluir a eliminação de custos substanciais tais como o custo de remoção, para além de outras vantagens, como por exemplo a redução da poluição e um melhor controlo da contaminação ambiental. Geralmente o custo de “purificação” de um resíduo versus a tolerância às impurezas do betão contendo esse resíduo “purificado” determinará, por fim, a sua adaptabilidade para uso no betão. (Samarin, 1999)

Os resíduos podem ser utilizados como substitutos parciais das matérias-primas ou combustível no fabrico de clínquer Portland ou então adicionados ao clínquer já pronto para formar diferentes tipos de cimentos.

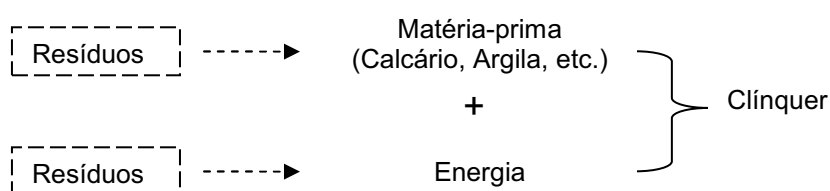


Figura 2 – Esquema da possível utilização de resíduos no fabrico de clínquer.

Um exemplo de um resíduo que pode ser utilizado no fabrico de clínquer é a casca de arroz, que pode ser utilizada como combustível e simultaneamente com a vantagem de contribuição de SiO₂ (substituição parcial da SiO₂ necessária, geralmente proveniente da argila).

Para se substituir matéria-prima ou combustível utilizados no fabrico do clínquer devem ser observados os seguintes princípios (Uchikawa *et al*, 1997):

1. Os resíduos industriais devem ser mais económicos do que as matérias-primas ou combustíveis convencionais de modo a serem atractivos às indústrias do sector. (Deve ainda considerar-se os custos de adaptação a um novo material ou tecnologia de processamento.);
2. Os resíduos industriais não devem afectar negativamente a qualidade do cimento;
3. O uso de resíduos industriais não pode causar poluição do ambiente;
4. O resíduo industrial deve ser fornecido em quantidades suficientes e sem quebras de fornecimento.

A NP EN 197-1 define 5 principais tipos de cimento, consoante a sua composição:

- CEM I Cimento Portland
- CEM II Cimento Portland Composto
- CEM III Cimento de alto forno
- CEM IV Cimento pozolânico
- CEM V Cimento composto

Os cimentos do tipo CEM II a CEM V incorporam, dependendo do tipo, diferentes constituintes (cinzas volantes, escória de alto forno, sílica de fumo, etc.) que já foram considerados resíduos e que hoje são matéria-prima do cimento. Há que avaliar portanto a capacidade de outros resíduos, que possam oferecer a capacidade de substituição parcial de clínquer.

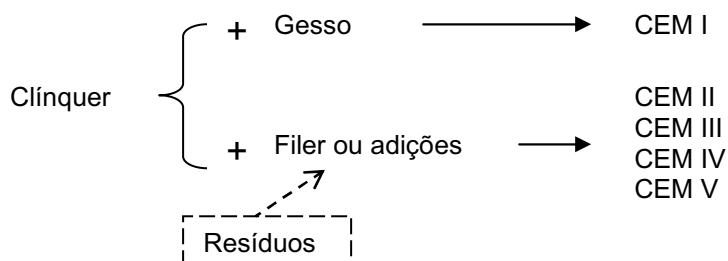


Figura 3 – Esquema da possível utilização de resíduos no fabrico de cimento (CEM II a CEM V).

O êxito do uso de resíduos ou subprodutos industriais em betão (e cimento) depende das propriedades requeridas para o betão. Em última instância, são os factores económicos que determinarão se um resíduo poderá ser incorporado no betão. Estes factores económicos devem abranger um estudo relativo ao custo de transporte e remoção (por exemplo aterro), no caso de valorização do resíduo, deverá ser considerado o custo de transporte para a indústria de processamento do resíduo tendo sempre em consideração os regulamentos ambientais em vigor (Samarin, 1999). Em 1999 nos EUA, quase 4,2 mil milhões de toneladas de resíduos não tóxicos, provenientes de fontes domésticas, industriais e minerais eram depositados em aterro por não existirem alternativas economicamente viáveis. O uso de aterros é a solução menos desejável porque para além de criar elevadas despesas aos produtores de resíduos também os torna responsáveis pelo que possa acontecer no futuro (por exemplo, contaminação de lençóis freáticos). Para além disto, a falta de zonas para aterro e o aumento das restrições de índole ambiental estão a provocar uma escalada dos custos associados à deposição

em aterro. A reciclagem dos resíduos não só permite poupar relativamente aos custos associados à deposição em aterro como também permite reduzir o consumo de recursos naturais, e em alguns casos providenciar benefícios técnicos e económicos (Naik *et al*, 1999).

No seguimento destas ideias tem vindo a ser considerada uma série de resíduos com vista à sua aplicabilidade na construção, em particular em betão. Assim o presente trabalho diz respeito ao estudo das potencialidades de utilização de **cinza de casca de arroz** (RHA) e de um resíduo da indústria da pasta de papel (**grits**) como substitutos parciais do cimento. Estes dois materiais, para além de possuírem características distintas, têm um historial diferente na área dos materiais de construção: sobre as cinzas de casca de arroz foram já efectuados bastantes estudos por todo o mundo, enquanto que a substituição parcial do cimento por grits ainda é francamente incipiente.

1.2. CONTEÚDO

O presente relatório de projecto está organizado em quatro capítulos. Nos parágrafos seguintes é efectuado um pequeno resumo de cada capítulo.

No Capítulo 1 (Introdução) faz-se o enquadramento do tema do projecto, tecendo-se considerações sobre a utilização de resíduos pela indústria do betão e cimento e a sustentabilidade na construção.

No Capítulo 2 (Estado da Arte) apresentam-se as bases de conhecimento com que se partiu para a realização deste trabalho, referentes quer à cinza de casca de arroz (RHA) quer aos resíduos da indústria de pasta de papel (grits). Descrevem-se as características, formas de obtenção da RHA e as propriedades de betão com RHA. Faz-se também uma breve descrição do fabrico de pasta de papel e dos processos que originam os grits. São também descritos alguns elementos nocivos em betão, cuja presença deve ser acautelada.

No Capítulo 3 (Programa Experimental) é feita a caracterização dos materiais utilizados. Neste capítulo apresentam-se também as metodologias e os resultados obtidos nos vários ensaios realizados para as diferentes composições de argamassa em estudo. Os ensaios realizados foram:

- Avaliação da **trabalhabilidade**;
- Ensaio das **resistências mecânicas** – compressão e flexão;
- Determinação do **índice de actividade**;
- Ensaio de **penetração acelerada de cloretos**;
- Ensaio de **resistividade eléctrica**;
- Ensaio de **absorção de água por capilaridade**;
- Ensaio de **carbonatação acelerada**.

Foram também realizados ensaios com as pastas de ligante nas quais se determinou o **tempo de presa** e da **expansibilidade**.

Por último, no Capítulo 4 (Conclusões), são apresentadas as principais conclusões do trabalho realizado, bem como algumas sugestões tendo em vista futuros desenvolvimentos da temática abordada.

ESTADO DA ARTE

2.1. CINZA DE CASCA DE ARROZ (RHA)

2.1.1. GENERALIDADES

A cinza de casca de arroz (RHA) é obtida pela queima controlada da casca de arroz. Este material, quando devidamente produzido, possui uma grande quantidade de sílica amorfa que é um material adequado a ser usado como substituto parcial do cimento devido à sua elevada actividade pozolânica.

A casca de arroz é um dos resíduos agrícolas mais abundantes a nível mundial, sendo produzidos anualmente cerca de 640 milhões de toneladas de arroz em “bruto” (correspondendo a cerca de 430 milhões de toneladas de arroz para consumo) (FAO, 2007). Cerca de 20% do peso do arroz em “bruto” corresponde à casca (Chandra *et al*, 1997), portanto são produzidas anualmente (a nível mundial) cerca de 128 milhões de toneladas de casca de arroz. Devido às características físicas e químicas deste subproduto, tais como baixa densidade (90 a 150 kg/m³), carácter abrasivo, baixo valor nutritivo e alto teor em sílica, apenas um volume reduzido é aproveitado. Assim sendo, esta quantidade de cascas de arroz torna-se de difícil depósito, criando muitas vezes problemas de índole ambiental.

Segundo um relatório da FAO de Setembro de 2007 (FAO, 2007), em Portugal existem cerca de 25000 hectares de terreno destinados à orizicultura, com uma produtividade média de 6,05 toneladas por hectare por ano, sendo produzidos então cerca de 151250 toneladas de arroz “em bruto” em cada ano em Portugal. A esta produção estão associadas 30250 toneladas de casca de arroz.

A casca de arroz é essencialmente constituída por celulose, lenhina e SiO₂, que é o principal componente da RHA. Para transformar a casca de arroz em RHA apta para substituição parcial do cimento é necessário proceder à sua queima controlada e moagem.

2.1.2. INCINERAÇÃO DA CASCA DE ARROZ

2.1.2.1. Generalidades

Após o processo de incineração, a maioria dos componentes evaporáveis são libertados lentamente, ficando os silicatos. As características das cinzas dependem dos componentes, temperatura e tempo de queima. A fim de obter uma cinza com elevada actividade pozolânica, a sílica deve permanecer num estado não-cristalino e com uma elevada estrutura microporosa. Assim, o processo de queima deve ser controlado para remover a celulose e a lenhina, preservando a estrutura celular original da casca de arroz. A quantidade de cinza obtida é cerca de 20% da quantidade de casca de arroz (Chandra *et al*,

1997), embora em ensaios realizados até agora na FEUP o rendimento tenha sido de apenas 12%. A perda de massa da casca de arroz durante a incineração pode ser dividida em 4 fases (Sousa, 2005):

- 1) Libertação física da água contida na casca a temperaturas superiores ou iguais a 100°C, que corresponde a cerca de 4-6% da massa total da casca;
- 2) Libertação dos voláteis existentes na lenhina e na celulose, que se decompõem entre 225-500°C e 325-375°C respectivamente. Durante esta fase pode-se perder cerca de 45% da massa existente da casca. Nesta fase verifica-se um aumento considerável de fumo originado pela queima;
- 3) Aos 350°C a perda da massa é atribuída à incineração parcial do carbono existente na casca. Nesta fase ocorre praticamente a restante perda de massa da casca de arroz;
- 4) Se a temperatura ultrapassasse os 800-900°C então ocorreria a cristalização da sílica existente na RHA.

Para realizar a incineração controlada da casca de arroz podem ser utilizados diferentes processos, desde a queima a céu aberto até ao uso de fornos industriais.

2.1.2.2. Queima a céu aberto

As temperaturas neste tipo de incineração variam com a localização e com as condições atmosféricas existentes no momento da queima, mas geralmente rondam os 550°C. As desvantagens deste processo são a possível contaminação, o consumo incompleto de carbono, as perdas verificadas e ainda o facto de depender das condições atmosféricas para a realização da incineração. É no entanto comum que a cinza se encontre cristalizada pois a duração da incineração pode ser muito prolongada (três a quatro dias) (Sousa, 2005).

A queima a céu aberto da casca de arroz não só produz cinza de fraca qualidade mas está também proibida em muitos países devido a problemas de poluição (Chandra *et al*, 1997).

2.1.2.3 Forno de leito fluidizado

Um forno de leito fluidizado permite o controlo da queima da casca de arroz. Neste processo o calor gerado pela combustão da casca de arroz pode ser utilizado para produzir vapor ou electricidade. É mantido um controlo apertado sobre o tempo de queima e a temperatura, possibilitando a produção de cinza altamente pozolânica (Chandra *et al*, 1997).

A combustão em leito fluidizado consiste na incineração dos resíduos num leito de chamas composto por partículas inertes como areia siliciosa ou cinzas (Sousa, 2005) para facilitar o processo de fluidização das cascas de arroz (Fang *et al*, 2003), os quais são fluidizados com a passagem do ar de combustão, isto é mantidas em suspensão, e num ambiente oxidante de elevada temperatura, portanto em combustão com alta turbulência, provocando um contacto eficiente de toda a superfície das partículas com o ar de combustão tendo como consequência uma alta taxa de transferência de calor no interior do leito. (Sousa, 2005)

A RHA altamente pozolânica é produzida mantendo as temperaturas da queima da casca entre 500 e 700°C por um período de tempo relativamente longo para remover a maior parte do carbono, ou então a temperaturas por volta dos 700-800°C durante menos de um minuto.

Análises químicas de amostras de RHA produzidas num forno de leito fluidizado apresentaram uma percentagem de SiO_2 entre 80 a 95%, 1 a 2% de K_2O e 3 a 18% de carbono não incinerado. Esta cinza era altamente celular, com superfície específica de $50\text{-}60\text{m}^2/\text{g}$ medida por adsorção de azoto. A textura fibrosa da sílica na cinza resulta presumivelmente da sua disposição nos microporos entre as fibrilhas de celulose (Chandra *et al*, 1997).

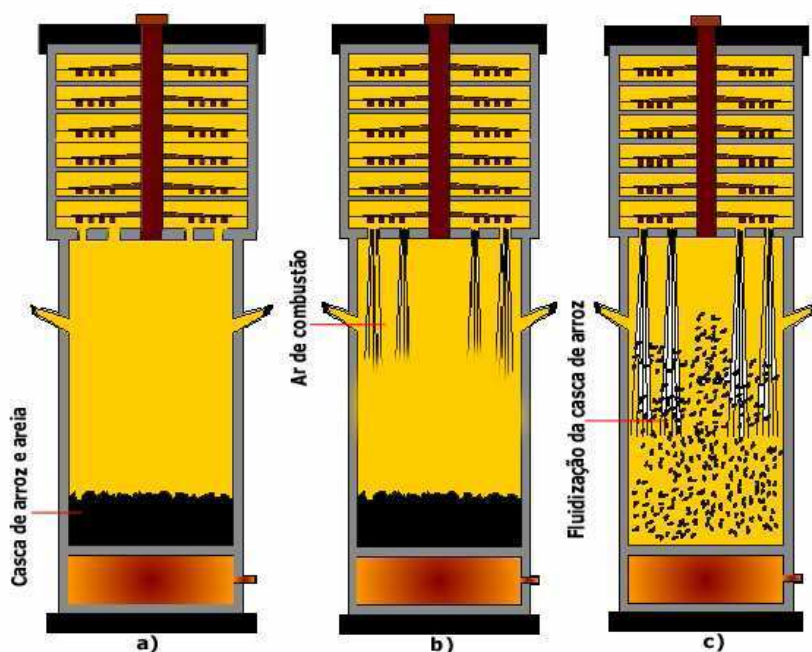


Figura 4 – Esquema de funcionamento de um forno de leito fluidizado (Sousa, 2005).

2.1.2.4. Forno industrial

Um forno industrial foi recentemente utilizado por razões económicas e ambientais. Dependendo da eficiência da combustão, o conteúdo em sílica da RHA pode-se encontrar na faixa dos 90 a 95% com carbono residual como principal ingrediente restante. Para além do carbono residual, os álcalis (1 a 3%) formam as restantes impurezas. Com a combustão controlada no forno industrial é possível produzir facilmente RHA com sílica num estado amorfo e forma altamente celular, com superfície específica na ordem dos 50 a $100\text{ m}^2/\text{g}$. Este tipo de RHA é altamente pozolânico (Chandra *et al*, 1997).

2.1.2.5. Outros métodos

Para além destes fornos acima apresentados, que são os que actualmente permitem produzir RHA de um modo mais eficiente e com melhor qualidade, existem outros tipos de fornos que embora possuam características menos industrializadas e tenham produtividades inferiores, permitem a produção de RHA com boas características ou o uso da casca de arroz como combustível.

Um exemplo de um forno que permite obter RHA com boas características é o fogão de alvenaria, adequado para produzir cinza branca com elevada reactividade devida à boa circulação de ar que permite uma redução do teor de carbono e também porque as temperaturas não atingem valores excessivos. O arrefecimento pode ser controlado através da remoção da cinza enquanto quente ou

deixando a cinza arrefecer lentamente dentro do fogão. Este tipo de fogão já foi testado e aprovado pelo Instituto “Central Glass and Ceramic Research Institute, Calcutta, India” (Sousa, 2005).

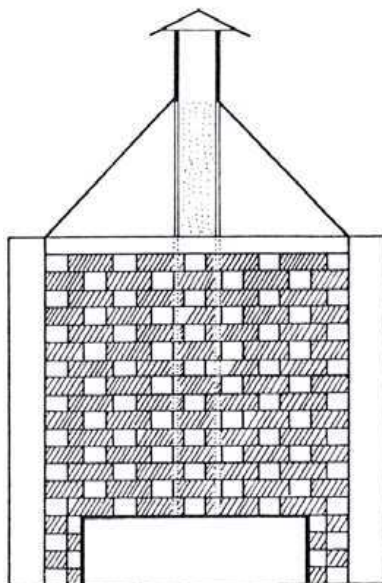


Figura 5 – Esquema de um fogão de alvenaria para incineração de casca de arroz (Sousa, 2005).

O fogão “Lo-Trau” é um exemplo de uso da casca de arroz fornecer energia (neste caso para cozinhar). Este fogão é originário do Vietname e foi desenvolvido no Senegal pela FAO (Food And Agriculture Organizations of the United Nations) com financiamento holandês (Sousa, 2005).

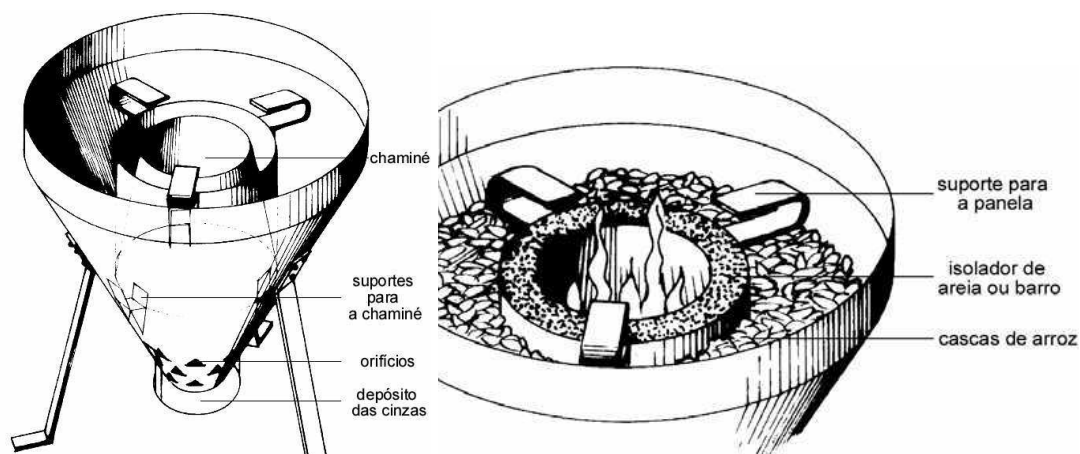


Figura 6 – Esquema do fogão “Lo-Trau” (Sousa, 2005).

2.1.3. EFEITO DAS CONDIÇÕES DE INCINERAÇÃO NA QUALIDADE DA RHA

A RHA deve ser obtida tendo em atenção a temperatura mas também o tempo de queima, de forma a ser obtida a actividade pozolânica pretendida, removendo-se o carbono enquanto a sílica permanece num estado amorfo e com estrutura altamente celular (Chandra *et al*, 1997).

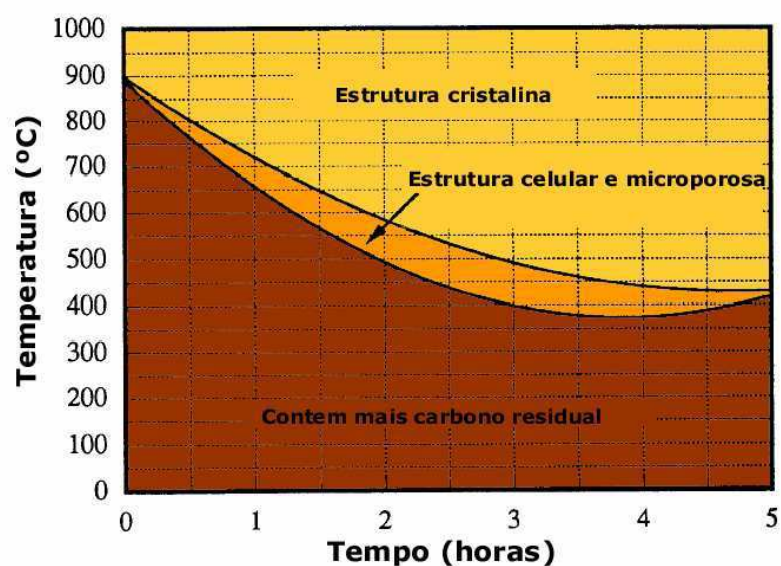


Figura 7 – Curva de condições ótimas de incineração para obter RHA reactivo (Chandra *et al*, 1997).

Tanto a substituição parcial do cimento por RHA como os métodos para a obter foram já alvo de vários e exaustivos estudos, sendo possível obter o gráfico acima apresentado na Figura 7. O diâmetro dos poros de RHA é máximo quando a queima é processada entre os 600 e 700°C, portanto, a reacção pozolânica deverá ser também maior na cinza formada a estas temperaturas. Quanto mais baixa for a temperatura da queima mais baixo é o consumo de energia. A produção de RHA a temperaturas entre os 600 e 700°C não envolve um dispêndio excessivo de energia quando comparado com a do cimento (Chandra *et al*, 1997).

2.1.4. MOAGEM DA RHA

Depois de se obter a RHA é necessário efectuar uma moagem para se aumentar a finura e obter uma melhor homogeneização. Existem diversos processos de moagem, podendo ser usados os mesmos do processo de moagem do clínquer (Sousa, 2005). O grau de moagem é um factor importante, pois modifica propriedades físicas da RHA tais como a superfície específica e a finura. A moagem torna as partículas de RHA, que são originalmente aciculares, mais próximas do formato esférico (Tiboni, 2007).

O grau de moagem da RHA influencia significativamente o seu desempenho, medido por exemplo pelo índice de actividade (IA – ver 3.4.4.). Segundo Luiz Júnior (Júnior *et al*, 2003), a partir de uma certa finura, o índice tende a diminuir, provavelmente pela dificuldade depois de dispersar as partículas demasiado finas na argamassa (Sousa, 2005).

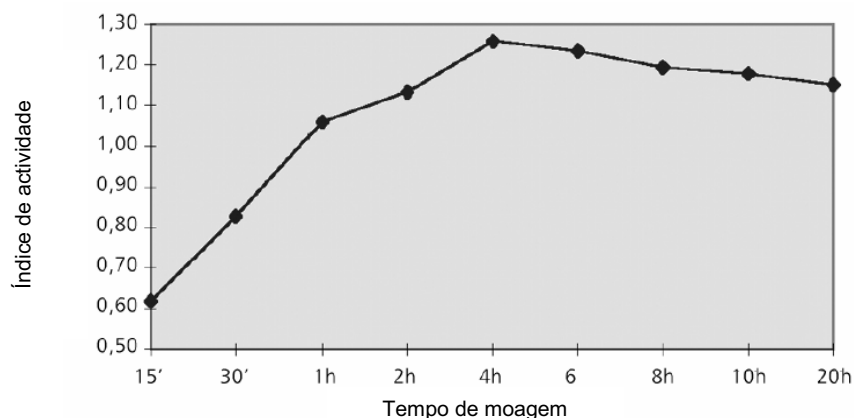


Figura 8 – Variação do IA (avaliado em argamassa) com o tempo de moagem (Sousa, 2005).

A variação do tempo de moagem conduz a diferentes superfícies específicas e influencia de forma significativa a actividade pozolânica da RHA. É necessário estudar o tempo de moagem ideal de acordo com a origem da casca de arroz, para se produzir RHA que atinja a máxima pozolanicidade.

2.1.5. HIDRATAÇÃO DA PASTA COM RHA

Nas primeiras 3 horas do processo de hidratação da pasta de cimento com RHA, iões de cálcio do cimento começam a migrar para a superfície da RHA. A sílica activa disponível na RHA reage com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (hidróxido de cálcio) para formar silicatos cálcicos hidratados (CSH) (Kumar, 1993; Pacewska *et al*, 2003). Nesta fase, algum C_3A (do cimento) reage com o sulfato de cálcio (gesso) em solução. À superfície do grão forma-se gel amorfo rico em aluminatos e também se desenvolvem a partir do gel e na solução, agulhas curtas de etringite (Sousa Coutinho, 2006).

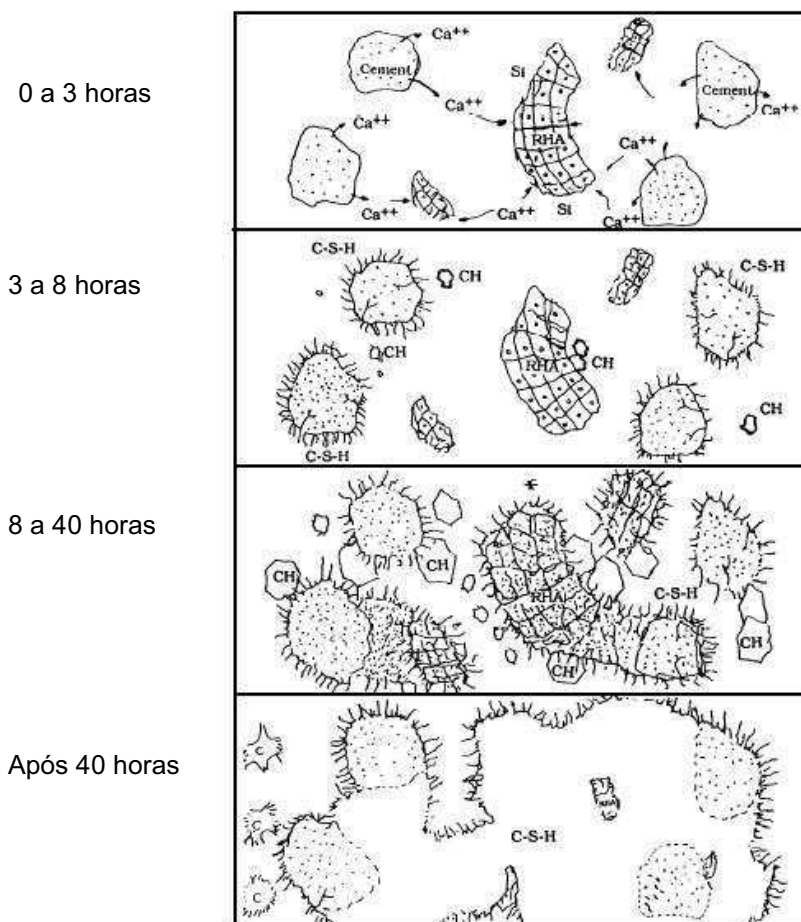


Figura 9 – Desenho esquemático da hidratação de pasta de cimento com RHA (Chandra *et al*, 1997).

Pode definir-se zona de transição como a zona de ligação entre a pasta de cimento e um outro material (como por exemplo os agregados, armaduras de aço, fibras, etc.). Apesar de esta zona de transição ser constituída pelos mesmos elementos da pasta de cimento, a estrutura física é diferente.

Mesmo em betões (**sem RHA**) com uma razão água/cimento baixa, o volume e o tamanho dos poros capilares que se encontram na zona de transição são maiores do que na matriz constituída unicamente por pasta de cimento. Isto leva a que, na maioria das vezes, a fase com menor resistência mecânica seja precisamente esta zona de transição.

Os cristais de CH (hidróxido de cálcio) possuem uma menor superfície específica (por serem maiores) e conseqüentemente têm uma menor capacidade de ligação (as ligações químicas – forças de van der Waals – são mais fracas) e representam também pontos de clivagem preferencial devido à sua estrutura orientada (Tiboni, 2007). Pela Figura 10, abaixo representada, pode-se visualizar que estes cristais se acumulam na zona de transição.

2.1.6. PROPRIEDADES DO BETÃO COM RHA

2.1.6.1 Generalidades

Em seguida apresentam-se resumidamente algumas características do betão com RHA, já estudadas por vários autores. Importa referir que os resultados são grandemente influenciados pela qualidade da RHA utilizada.

2.1.6.2. Trabalhabilidade

Para uma dada razão água/cimento, uma pequena adição (menos de 2 a 3% do peso de cimento) de RHA pode ser vantajosa para melhorar a estabilidade e a trabalhabilidade do betão por reduzir a tendência de exsudação e segregação devido principalmente à grande superfície específica da RHA (Chandra *et al*, 1997). A necessidade de água diminui com o aumento da finura da RHA (Kumar, 1993). Adições em grandes quantidades provocam misturas secas ou mesmo não trabalháveis a menos que se usem redutores de água ou superplastificantes. Devido ao carácter adsorvente das partículas celulares da RHA, o betão com RHA requer mais água para uma dada consistência (Chandra *et al*, 1997).

2.1.6.3. Tempo de presa

Contrariamente a outros materiais pozolânicos, a RHA tende a encurtar o tempo de presa. Isto pode dever-se à capacidade da RHA adsorver a água, fazendo diminuir a razão água/cimento circundantes (Chandra *et al*, 1997).

Tiboni (Tiboni, 2007) apresenta ensaios em que o tempo de presa foi aumentado, o que pode ser explicado pela substituição de um cimento de alta resistência inicial (com um tempo de início de presa de cerca de 1h45m) por um material pozolânico.

2.1.6.4. Resistência à compressão

A RHA adsorve uma grande quantidade de água devido à sua elevada superfície específica, o que reduz a exsudação. Contudo, para conseguir resistências elevadas é importante adicionar a quantidade correcta de RHA pois quantidades excessivas têm um efeito adverso e reduzem a resistência. Para a mesma razão água/cimento, as resistências iniciais mantêm-se semelhantes comparando com betão sem RHA, mas a resistência última será maior devido às reacções pozolânicas (Chandra *et al*, 1997).

2.1.6.5. Durabilidade

A adição de pozolanas pode melhorar as propriedades do betão, modificando a micro e macro-estrutura da pasta de cimento. O efeito benéfico das partículas finas e celulares da RHA na exsudação e segregação do betão deve-se à elevada capacidade de adsorção de água, elevada superfície interna, assim como às partículas microporosas e amorfas.

Até agora, nenhum adjuvante ou técnica de processamento do betão é capaz de produzir betão com tão baixa permeabilidade aos cloretos como as conseguidas com a utilização de RHA. Assim é óbvia a potencial utilidade da RHA, como adição ou substituto parcial do cimento no betão, para aplicações onde a corrosão das armaduras de aço é de especial preocupação. Portanto, o uso de RHA é

significativo em zonas em que o betão tem que oferecer a necessária resistência à água, e durabilidade tais como em ambientes marinhos.

As adições minerais que reagem lentamente a temperaturas normais podem beneficiar do calor de hidratação do cimento Portland sem prejuízo da resistência a longo prazo. O uso de RHA para substituir parcialmente o cimento reduz directamente a evolução do calor reduzindo a possibilidade de fendilhação térmica, em grandes massas de betão ou fendilhação por retracção plástica em grandes superfícies planas.

A adição de RHA resulta numa excelente resistência do material a ambientes ácidos. No que respeita à durabilidade do cimento a ataques por ácidos, pode-se apontar que o cimento Portland contém entre 60 a 65% de CaO e, aquando da hidratação, uma parte considerável de cal é libertada sob a forma de Ca(OH)_2 , que é o principal responsável pelo fraco desempenho do cimento Portland em ambientes ácidos. Cimentos com incorporação de RHA que apresentam resistências da mesma ordem de grandeza do cimento Portland normal, contêm menores percentagens de CaO que podem atingir os 20%. Assim, após a hidratação destes cimentos não existirá cal sob a forma de Ca(OH)_2 , existindo apenas silicatos hidratados de cálcio e sílica gel que, são mais resistentes ao ataque por ácidos (Chandra *et al*, 1997).

Pelo preenchimento dos poros e reacção pozolânica da RHA, devido à elevada superfície específica e estrutura celular, a permeabilidade do betão e argamassas pode ser significativamente reduzida. O uso de RHA já demonstrou em diversos estudos uma melhoria das propriedades do betão, portanto o seu uso deve ser considerado não só tendo em conta razões económicas e ambientais mas também razões ligadas à durabilidade e melhor desempenho do betão.

Como RHA proveniente de espécies de arroz e locais diferentes pode ter características diferentes (Tiboni, 2007) é importante que se façam estudos relativos às cinzas que se pensam usar, assim como definir meios de produção adequados (nomeadamente a queima e a moagem) e um sistema de controlo de qualidade. Estudos mais recentes (Tiboni, 2007) indicam ainda que se deve dimensionar a finura e granulometria da RHA com a granulometria do próprio cimento para assim se conseguirem melhores resultados na resistência à compressão.

2.2. RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DA PASTA DE PAPEL – GRITS

A indústria papeleira tem um peso importante na economia portuguesa, sendo o quarto ramo com maiores exportações em termos líquidos (depois das indústrias dos têxteis, couro e madeiras). Segundo a Celpa – Associação de Indústria Papeleira, em 2007 o sector representava 0,8% do PIB nacional e 4,5% do produto industrial. Era ainda detentora de 185000 hectares de floresta, correspondentes a 5,8% do total da floresta nacional (Celpa, 2008a).

Esta indústria não produz resíduos considerados perigosos, no entanto, produz quantidades consideráveis de resíduos sólidos. A maior parte das unidades deste sector possui aterros controlados para a deposição segura destes resíduos, assim como mecanismos para a sua separação por tipos, o que permite o tratamento, reciclagem, reutilização ou valorização energética de parte dos resíduos produzidos, reduzindo deste modo a necessidade da sua deposição em aterro. Desde 1997 a produção de pasta de papel aumentou 15%, tendo sido acompanhada também por um crescimento na produção de papel de cerca de 55%. A estes aumentos de produção estão associados aumentos nos resíduos produzidos, sendo necessário então utilizar os resíduos como recursos e perceber que os resíduos podem ter valor, tanto em termos económicos como ambientais (Pinto, 2005).

Um dos resíduos sólidos provenientes do processo de fabrico da pasta de papel é conhecido como “grits”. Este resíduo, por ser essencialmente constituído por CaCO_3 poderá eventualmente ser utilizado como substituto parcial do cimento Portland, no entanto foram até agora, realizados muito poucos estudos acerca desta possibilidade.

O processo de produção de pasta de papel (pelo processo kraft) é constituído por diversas etapas, a começar pela preparação da madeira e cozimento das aparas com a obtenção de pasta crua, seguindo-se a fase de branqueamento e a transferência para a fábrica de papel. Este processo inclui a recuperação de energia e químicos e envolve ainda a fase de produção de dióxido de cloro e o tratamento de efluentes (Modolo, 2006).

As etapas do processo kraft englobam as seguintes operações (adaptado de Pinto (Pinto, 2005) e Celpa (Celpa, 2008b)):

- Corte dos troncos de madeira e transporte para a fábrica. A madeira é transportada em camiões na forma de toros, da floresta até à fábrica onde é entregue. À chegada faz-se a avaliação do volume e da qualidade da madeira. A Madeira que se apresente queimada ou deteriorada, é imediatamente rejeitada no acto da recepção;
- Separação da casca através de jactos de água à pressão ou por outros métodos (a casca das árvores, pobre em fibras de celulose, não tem qualquer aproveitamento para a produção de pasta de papel);
- Transformação dos troncos em aparas ou cavacos nos destroçadores (No destroçamento, um disco de navalhas acopladas radialmente desmembrará cada tronco em pequenas aparas);
- Armazenamento de aparas (para o abastecimento do processo);
- Entrada das aparas na zona de baixa pressão dos digestores, onde, em contracorrente com o vapor, aquecem na descida. É nesta etapa que se inicia a libertação e recuperação dos produtos voláteis da madeira;
- As aparas passam à zona de impregnação, onde, à pressão de cerca de 0,9 MPa e à temperatura de 155 a 170°C, ficam em contacto com a lixívia de digestão (chamado licor branco, uma mistura de hidróxido de sódio e sulfureto de sódio) durante cerca de 1h30min;
- A digestão é interrompida por um rápido arrefecimento com lixívia fria e descompressão. Nesta fase, as fibras de lenhina e de celulose encontram-se separadas dando origem ao licor negro (mistura das fibras de lenhina com o licor) e à pasta crua (rica em fibras de celulose que devido à presença residual de lenhina apresenta uma cor acastanhada);
- Lavagem, com remoção de nós da madeira e dos pedaços mal digeridos em crivos centrífugos pressurizados. Saída da pasta espessa e adensada;
- Na recuperação de químicos activos (reutilização) e de matéria orgânica (combustível do processo) o licor negro, proveniente da digestão, é recirculado;
- A pasta é então branqueada por oxidação (principalmente pelo dióxido de cloro) e destruição dos pigmentos da madeira;
- A seguir ao branqueamento, a pasta é novamente lavada, espessada, seca e armazenada em torres de abastecimento de máquinas de fabricação de papel, ou ainda, convertida em mantas de enrolar e enfardar, para transporte para as fábricas de papel.

Para que a pasta seja transformada em papel, ou seja, para a produção do papel, é necessário que haja refinação da pasta, através de processos que envolvem a dispersão das fibras e durante os quais se faz a homogeneização da mistura (pasta + aditivos). Em seguida, há o processamento da mistura em máquinas de fabrico contínuo, que a transformam em papel com as características, acabamento e dimensões específicas para cada tipo de aplicação (Modolo, 2006).

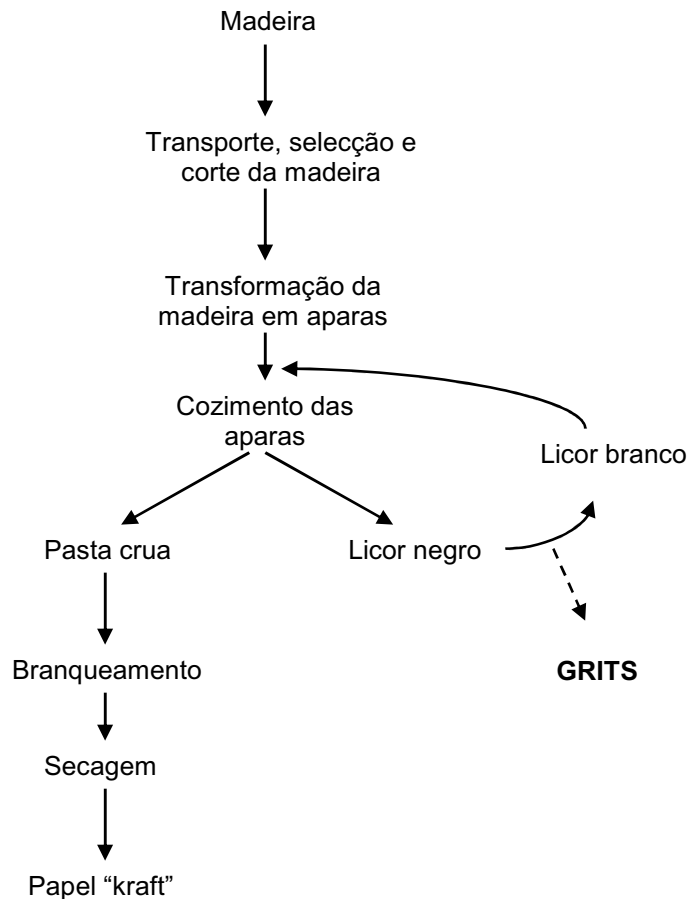


Figura 12 – Diagrama com as principais fases na produção de papel pelo método kraft.

Paralelamente ao processo de fabrico da pasta de papel pelo processo kraft, faz-se a recuperação de químicos e de energia a partir do licor negro obtido aquando da separação das fibras de lenhina e celulose. Com este processo cíclico é possível transformar o licor negro em licor branco, novamente apto para uso no processo kraft, ao mesmo tempo que se produz energia na caldeira de recuperação.

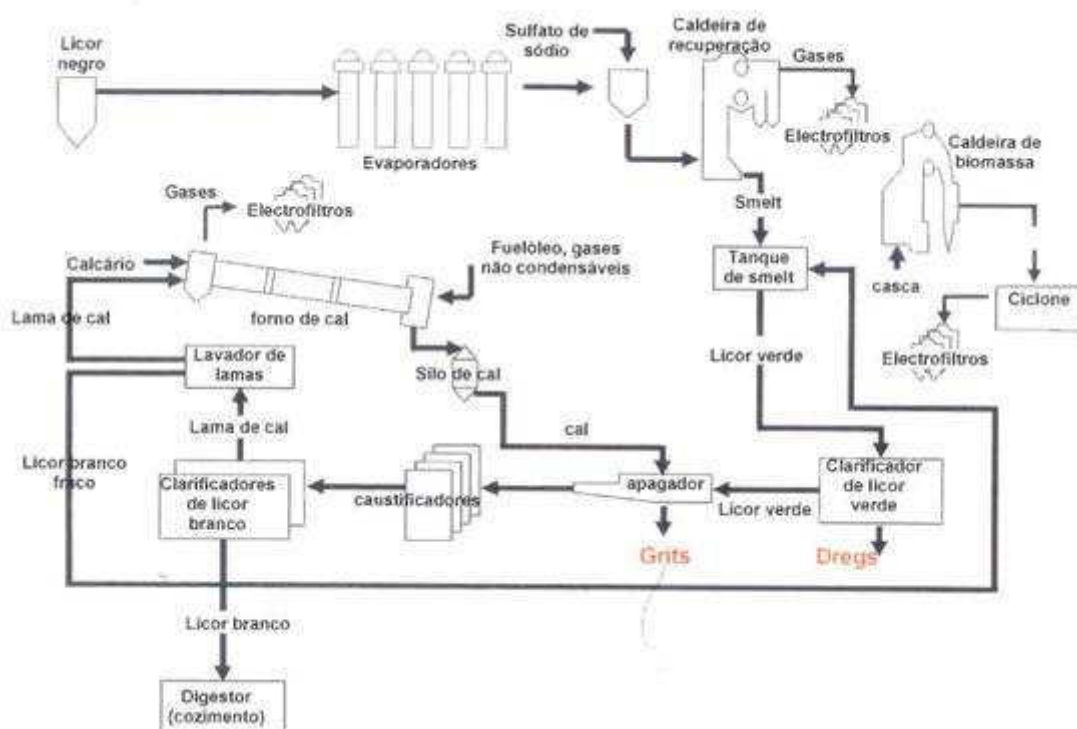
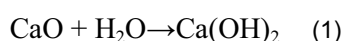


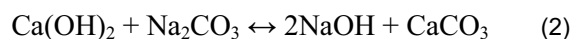
Figura 13 - Diagrama de recuperação de químicos e energia no processo de fabrico de papel (Pinto, 2005).

Durante este processo cíclico de recuperação de químicos e energia existe uma fase em que é adicionada cal ao licor verde. A cal utilizada é proveniente de um forno de cal que, para além do calcário, utiliza lamas de cal (provenientes do processo de recuperação).

A cal (CaO) é adicionada no apagador, dando-se a reacção:



Ao mesmo tempo ocorre a reacção de caustificação do carbonato de sódio, recuperando o hidróxido de sódio necessário ao processo de cozimento kraft:



Como as lamas de cal apresentam sódio residual (que funde no forno de cal) a cal quando inserida no apagador forma grânulos que são recolhidos e retirados para o exterior do apagador. A estes grânulos dá-se o nome de grits, um material de cor acinzentada, com cerca de 15 a 25% de humidade dependendo da unidade fabril.



Figura 14 – Grits.

Para se dar escoamento às grandes quantidades de grits produzidos (uma unidade fabril produz cerca de 6300 toneladas por ano) é necessário que a sua utilização passe por uma indústria com capacidade de lidar com grandes tonelagens, como é o caso da indústria do cimento. Um dos principais constrangimentos que se levanta para a utilização de resíduos a uma escala industrial e de cariz comercial reside, essencialmente, na dificuldade de transporte de grandes quantidades de resíduos a grande distância, pelo aumento de custos envolvidos. Esta dificuldade terá que ser avaliada, do ponto de vista económico, pelos parceiros industriais envolvidos na troca, uma vez comprovada a viabilidade técnica da substituição parcial do cimento Portland por grits. Nesta avaliação económica dever-se-á ter em conta os custos actuais de deposição em aterro (Pinto, 2005). Assim nesta fase do conhecimento torna-se fundamental avaliar a viabilidade técnica da utilização dos grits ou mesmo grits valorizados, como substituto parcial do clínquer Portland.

2.3. ELEMENTOS NOCIVOS NO BETÃO

2.3.1. DESCRIÇÃO DOS ELEMENTOS NOCIVOS

2.3.1.1. - Magnésio

Na produção de clínquer Portland procura-se controlar o magnésio pois quando a fase líquida cristaliza, o óxido de magnésio poderá cristalizar em cristais grandes (**periclase**) o que provoca a instabilidade e expansibilidade do volume da pasta de cimento endurecido. De facto o óxido de magnésio é reactivo apenas sob a forma cristalina de periclase (em quantidade superior a 2% do cimento, em massa, pois até 2% combina-se com os componentes principais do cimento, isto em cimento portland) (Sousa Coutinho, 2006)

Segundo Uchikawa (Uchikawa *et al*, 1997) a variação da presença de magnésio no cimento não altera significativamente a estrutura da rede porosa na pasta de cimento já endurecida. No entanto um aumento do teor em magnésio reduz o tempo de presa e as resistências iniciais aumentam ligeiramente, mas as resistências aos 7 e aos 28 dias diminuem.

Na Europa e em Portugal a regulamentação não prevê ensaios para verificar a expansibilidade do óxido de magnésio pois não é costume a presença de grandes quantidades de magnésio na matéria-prima usada (Sousa Coutinho, 2006).

2.3.1.2. - Sulfatos

Os sulfatos representam um dos maiores riscos de agressão química para o betão, sendo o seu teor limitado no cimento (em percentagem de SO₃) pela NP EN 197-1, segundo o quadro seguinte:

Quadro 1 – Valor limite superior do teor de sulfatos (em % de SO₃)

Tipo de Cimento	Valores limite para resultados individuais					
	Classe de resistência					
	32,5N	32,5R	42,5N	42,5R	52,5N	52,5R
CEM I						
CEM II ^{a)}		4,0			4,5	
CEM IV						
CEM V						
CEM III/A				4,5		
CEM III/B						
CEM III/C				5,0		

^{a)} O cimento do tipo CEM II/B-T pode conter até 5,0% de SO₃ em todas as classes de resistência.

Importa ainda referir que a nova versão da NP EN 197-1, em fase de revisão, será mais restritiva, sendo todos estes limites diminuídos em 0,5%.

Existem três diferentes tipos e ataques por sulfatos:

1. Ataque clássico por sulfatos
2. Formação retardada de etringite (DEF – delayed ettringite formation)
3. Ataque por sulfatos com formação de taumasite.

Nos dois primeiros tipos de ataque (clássico e DEF), o ião sulfato ataca os aluminatos do cimento Portland endurecido ou cimento com clínquer Portland, formando-se sobretudo etringite (e algum gesso), que é uma reacção muito expansiva no caso de água em presença ser suficiente. Esta reacção pode ser de tal modo expansiva que o volume final seja 2,5 vezes o inicial, causando tensões internas e fissuração irregular do betão, facilitando a penetração posterior de mais substâncias agressivas e progressão da deterioração. (Sousa Coutinho, 2005). O que difere entre o ataque clássico e a formação retardada de etringite é que contrariamente ao ataque clássico não são necessárias fontes exteriores de sulfatos para se dar a formação retardada de etringite. Este tipo de ataque (DEF) é habitual em betões de cimento Portland que tenham sido curados com tratamento térmico e depende dos materiais, condições de cura e condições ambientais (Sousa Coutinho, 2001).

Hoje sabe-se que os sulfatos podem atacar também os silicatos cálcicos em certas condições, formando-se taumasite e transformando o betão numa massa esponjosa e sem coesão. O ataque por

sulfatos com formação de taumasite difere do ataque comum (com formação de gesso e etringite) pois não são os aluminatos cálcicos hidratados que são atacados mas sim os silicatos cálcicos hidratados (CSH). Estes compostos são o principal agente ligante do cimento Portland incluindo o cimento resistente aos sulfatos. As condições necessárias à formação de taumasite são a disponibilidade de:

- Iões sulfatos;
- Iões carbonato;
- Silicatos cálcicos ou silicatos cálcicos hidratados;
- Humidade, água.

Os tipos de estruturas susceptíveis de ataque dos sulfatos com formação de taumasite são fundações e lajes de pavimento em contacto com solos com sulfatos, estradas e sub-bases, túneis e tubagens de esgotos sobretudo em ambientes de temperaturas baixas (Sousa Coutinho, 2001).

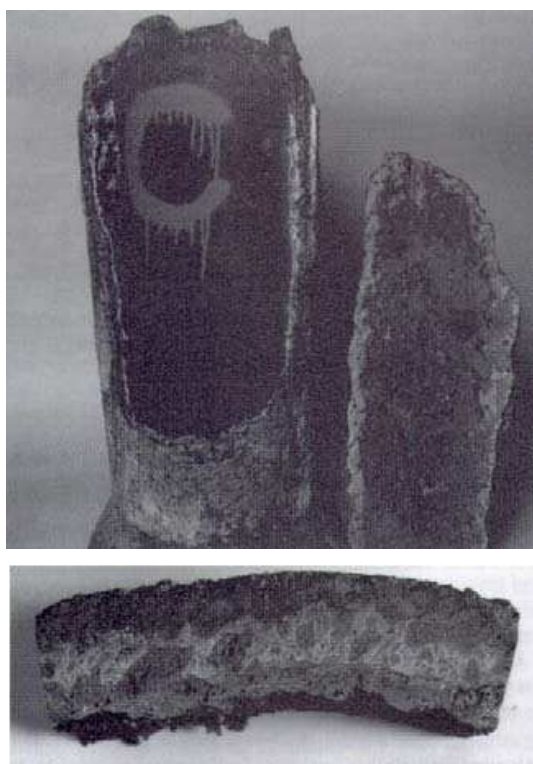


Figura 15 – Degradação de uma manilha de betão por ataque por sulfatos (John *et al*, 1998).

2.3.1.3. – Álcalis (Sódio e Potássio)

O sódio e potássio, cuja quantidades no cimento é possível determinar facilmente usando espectrometria, afectam a velocidade de aumento de resistência (Neville, 1995) fazendo aumentar a porosidade da pasta de cimento já endurecida (Uchikawa *et al*, 1997) o maior problema relativo à presença de álcalis no ligante tem a ver com a reacção álcalis-sílica.

Para que se realize a reacção álcalis-sílica reactiva é necessário que se verifiquem as três condições seguintes, simultaneamente:

- Humidade suficiente;
- Fluido que circula nos poros com álcalis (Na; K) e iões cálcio (Ca^{2+}) suficientes;
- Quantidade mínima de sílica reactiva.

A reacção começa com um ataque à sílica não perfeitamente cristalizada, pelos hidróxidos alcalinos da solução intersticial que circula nos poros e fendas do betão. Como resultado forma-se um gel de silicatos alcalinos quer em planos de debilidade ou nos poros do agregado onde existe a sílica reactiva, ou então, à superfície das partículas do agregado. Neste último caso forma-se uma superfície alterada típica, que pode vir a destruir a aderência entre as partículas de agregado e a pasta de cimento envolvente. Este gel de silicatos alcalinos é expansivo pois permite a passagem para o seu interior de moléculas de água. Como o gel que se vai formando encontra-se confinado pela pasta de cimento hidratado circundante, resultam tensões internas cada vez mais elevadas até, eventualmente, causarem expansões, fissuração e rotura da pasta de cimento (Sousa Coutinho, 2006).

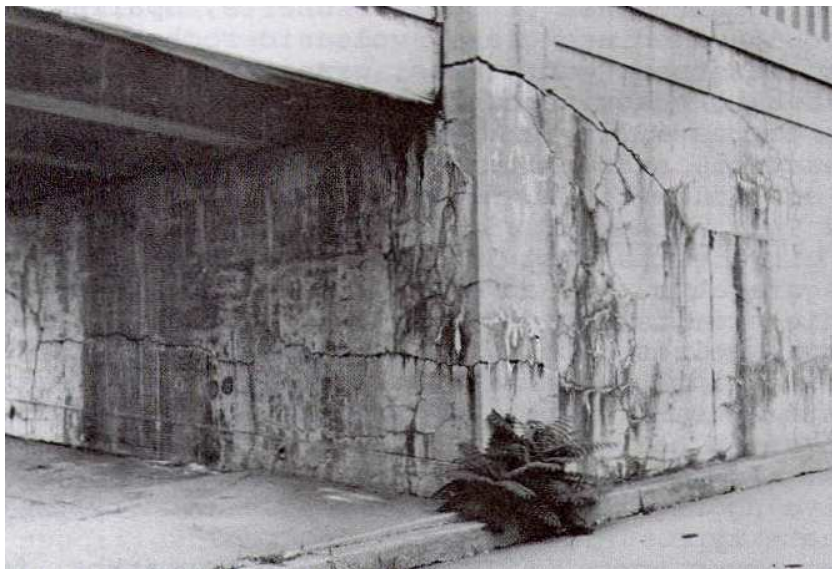


Figura 16 – Deterioração do betão por reacções álcalis-sílica reactiva (Sousa Coutinho, 2006).

Pensa-se que a formação de gel de silicatos alcalinos apenas se verifica na presença de iões cálcio (Ca^{2+}). Este factor tem importância em relação à prevenção deste tipo de reacção pois é possível reduzir a quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – hidróxido de cálcio da solução intersticial pelo uso de ligantes com pozolanas, cinzas, sílica de fumo, cinza de casca de arroz ou metacaulino (Sousa Coutinho, 2006).

Embora possa assumir proporções relevantes, a reacção álcalis-sílica pode levar muito tempo a manifestar-se em termos de deterioração do betão (Sousa Coutinho, 2005).

As rochas carbonatadas também podem estar sujeitas ao ataque pelos álcalis, embora a ocorrência desta reacção seja muito menos frequente que a reacção anterior. Quando contém o mineral dolomite, a acção dos álcalis pode causar uma desdolomitização. Este processo pode conduzir a uma fissuração em mapa e a uma posterior destruição do betão (Sousa Coutinho, 2005).

Embora a velocidade de reacção aumente com o crescimento do teor em álcalis, ensaios de investigação (considerando que os álcalis provem apenas do cimento) indicam que existe um limite inferior abaixo do qual não se verifica degradação do betão, mesmo na presença de agregado reactivo. Este limite corresponde a cerca de 3.5 - 4 kg por metro cúbico de betão o que equivale a cerca de 0.6% da massa do cimento. Os cimentos com uma quantidade de álcalis inferior a este valor designam-se por cimentos de baixo teor em álcalis (o teor em álcalis é expresso, em geral, pela massa total de óxido de sódio equivalente que é igual a $\text{Na}_2\text{O} + 0.685 \text{K}_2\text{O}$) (Sousa Coutinho, 2006).

2.3.1.4. - Fósforo

Em termos de produção de clínquer portland a resistência da pasta de cimento parece atingir o nível máximo quando o teor de fósforo no clínquer, sob a forma de P_2O_5 é de 0,5%, independentemente do tempo de cura a que foi sujeita. A partir do valor de 0,5%, o aumento do teor em fósforo provoca um decréscimo da resistência. O fósforo tem pouco efeito na durabilidade (Uchikawa *et al*, 1997).

2.3.1.5. - Flúor

O flúor quando presente no cimento atrasa a presa e faz aumentar, quer a permeabilidade ao ar, quer a penetração de água na pasta de cimento, o que acarreta uma diminuição da durabilidade (Uchikawa *et al*, 1997). Na ausência de um aumento substancial de SO_3 no clínquer uma quantidade de 0,3% de fluor conduz a um aumento da resistência nalguns cimentos, enquanto que quantidades na ordem dos 0,5-0,6% tendem a diminuir a resistência (Jackson, 1998)

2.3.1.6. - Cloretos

Embora os cloretos não sejam uma ameaça ao próprio betão (Uchikawa *et al*, 1997) provocam uma dissolução localizada da película passiva que envolve as armaduras de aço, originando corrosão por picadas que pode reduzir drasticamente a secção do aço em intervalos de tempo relativamente curtos (Sousa Coutinho, 2006).

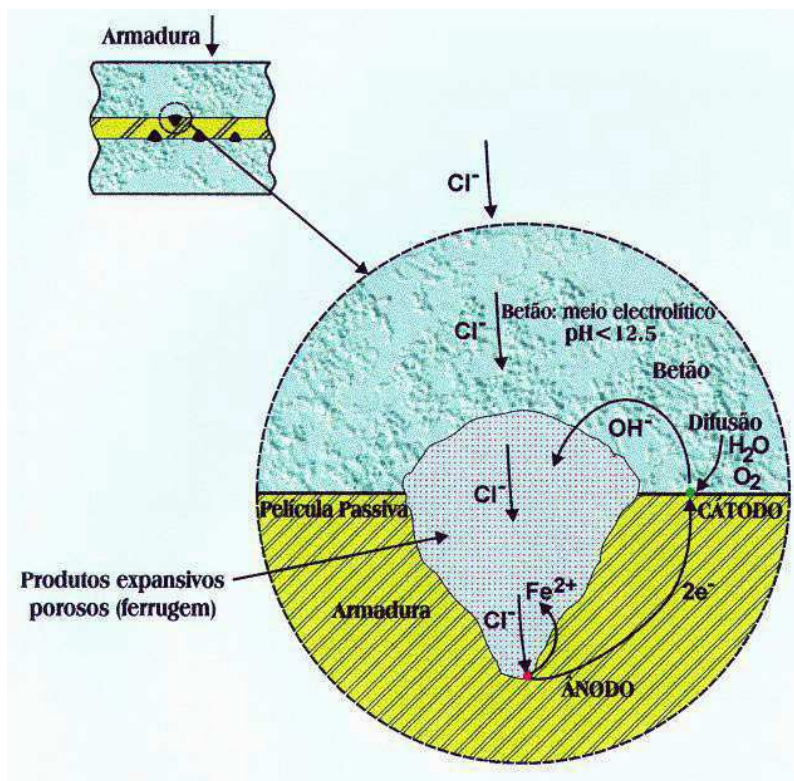


Figura 17 – Corrosão da armadura por "picadas" causada por cloretos (Sousa Coutinho, 2006).

A oxidação das armaduras provoca não só a diminuição de secção como também expansões, pois a ferrugem forma-se com um notável aumento de volume (de 2 a mais de 6 vezes o volume original).

Este aumento de volume acaba por romper o revestimento do betão – Figura 18, o que acelera mais ainda o processo de corrosão (Sousa Coutinho, 2006).

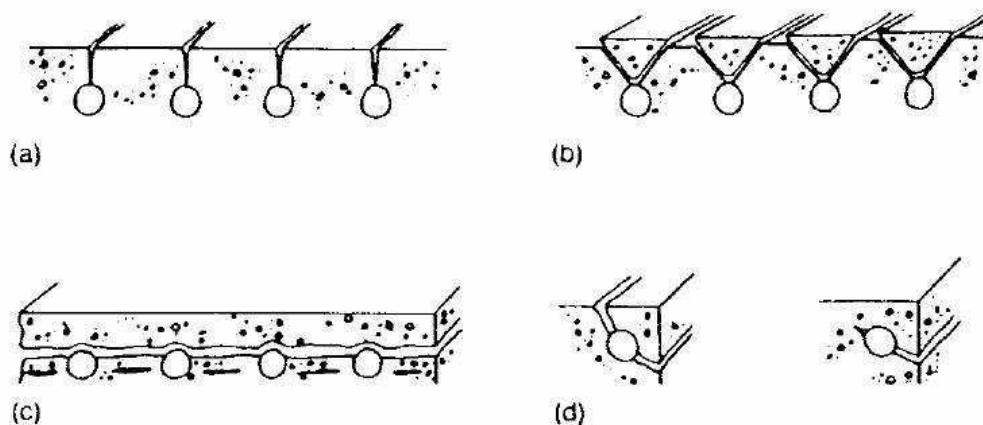


Figura 18 – Efeitos da corrosão da armadura: (a)-fendilhação, (b)-descamação, (c)-delaminação e (d)-efeito nos cantos (Sousa Coutinho, 2006) .

Os cloretos podem surgir na massa de betão por estarem contidos na matéria-prima (adjuvantes, água, cimento e/ou agregados) ou por terem penetrado a partir do exterior, no caso de a estrutura se encontrar num ambiente rico em cloretos (ambiente marítimo ou industrial) ou se encontrar submetida à acção de sais de degelo contendo cloretos. A NP-EN 206-1 define para as estruturas, classes de exposição aos cloretos segundo o ambiente em que se encontra o betão – Figura 19.

Designação da classe	Descrição do ambiente	Exemplos informativos onde podem ocorrer as classes de exposição
3 Corrosão induzida por cloretos não provenientes da água do mar		
Quando o betão armado ou contendo outros metais embebidos se encontrar em contacto com água, que não água do mar, contendo cloretos, incluindo sais descongelantes, a exposição ambiental deve ser classificada como se segue: <i>NOTA: No que respeita às condições de humidade ver também a secção 2 deste Quadro.</i>		
XD1	Moderadamente húmido	Superfícies de betão expostas a cloretos transportados pelo ar
XD2	Húmido, raramente seco	Piscinas; Betão exposto a águas industriais contendo cloretos
XD3	Ciclicamente húmido e seco	Partes de pontes expostas a salpicos de água contendo cloretos; Pavimentos; Lajes de parques de estacionamento de automóveis
4 Corrosão induzida por cloretos da água do mar		
Quando o betão, armado ou contendo outros metais embebidos, se encontrar em contacto com cloretos provenientes da água do mar ou exposto ao ar transportando sais marinhos, a exposição ambiental deve ser classificada como se segue:		
XS1	Ar transportando sais marinhos mas sem contacto directo com a água do mar	Estruturas na zona costeira ou na sua proximidade
XS2	Submersão permanente	Partes de estruturas marítimas
XS3	Zonas de marés, de rebentação ou de salpicos	Partes de estruturas marítimas

Figura 19 – Classes de exposição aos cloretos (no betão) preconizadas na NP-EN 206-1

Em função da classe de exposição ambiental é possível definir as classes de teor de cloretos de betão aplicáveis em Portugal (Figura 20).

Utilização do betão	Classes de exposição ambiental	
	XC, XF, XA	XS, XD
Betão sem armaduras de aço ou outros metais embebidos, com excepção de dispositivos de elevação resistentes à corrosão	Cl 1,0	Cl 1,0
Betão com armaduras de aço ou outros metais embebidos	Cl 0,4 ⁽¹⁾	Cl 0,2 ⁽¹⁾
Betão com armaduras pré-esforçadas	Cl 0,2 ⁽¹⁾	Cl 0,1 ⁽¹⁾
<i>(1) Estas classes podem deixar de se aplicar se forem tomadas medidas especiais de protecção contra a corrosão, como protecção do betão ou recobrimentos, devidamente justificados, ou utilização de aço inox.</i>		

Figura 20 – Classes de teor de cloretos no betão preconizadas na NP-EN 206-1

O teor de cloretos de um betão, expresso em percentagem de iões cloreto por massa de cimento não deve exceder o valor dado na Figura 21 para a classe seleccionada.

Utilização do betão	Classe do teor de cloretos ^{a)}	Máximo teor de Cl ⁻ por massa de cimento ^{b)}
Sem armaduras de aço ou outros metais embebidos, com excepção de dispositivos de elevação resistentes à corrosão	Cl 1,0	1,0 %
Com armaduras de aço ou outros metais embebidos	Cl 0,20	0,20 %
	Cl 0,40	0,40 %
Com aço de pré-esforço	Cl 0,10	0,10 %
	Cl 0,20	0,20 %
<i>a) Para um uso específico do betão, a classe a aplicar depende das disposições válidas no local de utilização do betão **.</i>		
<i>b) Quando forem utilizadas adições do tipo II e quando estas forem consideradas para a dosagem de cimento, o teor de cloretos é expresso em percentagem de iões cloreto por massa de cimento mais massa total das adições consideradas.</i>		

Figura 21 – Máximo teor de cloretos no betão preconizado na NP EN 206-1

Em relação ao limite máximo de cloretos adicionados durante a amassadura do betão, provenientes dos constituintes, é importante referir que parte dos cloretos se combina com os compostos de alumínio e ferro do cimento hidratado, pelo que só são perigosos os que não se combinam, isto é, os que permanecem livres. A proporção entre cloretos livres e combinados não é constante, dado que é influenciada pela finura do cimento, teor em gesso, temperatura durante a presa e a humidade dos poros do betão e vai depois variando ao longo da vida da estrutura, por exemplo com a carbonatação do betão de recobrimento.

A NP EN 197-1 limita o teor de cloretos no ligante a 0,10%.

2.3.1.7. - Crómio

O crómio acelera a presa do cimento e faz com que as resistências iniciais sejam melhoradas, contudo, quando a quantidade de crómio (presente como Cr_2O_3) excede os 0,5% as resistências decrescem com o aumento de crómio, independentemente do tempo de cura (Uchikawa *et al*, 1997).

A NP EN 196-10 limita o teor de crómio (VI) para minimizar a ocorrência do aparecimento de dermatite de contacto alérgica relacionada com o cromato, resultante da utilização do cimento ou de preparações com cimento. Assim, de acordo com esta norma, é proibida a venda e utilização de cimentos e preparações com cimento que, quando hidratados incluem mais do que 0,0002% de crómio hexavalente solúvel em água, determinado em percentagem em massa de cimento seco.

2.3.1.8. - Zinco

Por cada sensivelmente 0,1% de zinco presente no cimento tanto o tempo de início de presa como o tempo de fim de presa são aumentados de 45 minutos. Na produção de clínquer portland, sobretudo quando se utilizam resíduos como combustível alternativo (coincineração), é desejável limitar a quantidade de Zinco no clínquer a um valor inferior a 0,1%.

A permeabilidade ao ar e a penetração de água aumentam quando o teor de Zn sob a forma de ZnO excede sensivelmente 0,5%, porque a estrutura da pasta se torna mais porosa (Uchikawa *et al*, 1997).

2.3.1.9. - Estrôncio

O estrôncio tem pouca influência no número de poros capilares de maiores dimensões, apresentando tendência para acelerar a presa e diminuir a resistência, independentemente do tempo de cura.

Nos níveis em que habitualmente se encontra presente no cimento, o estrôncio apresenta pouca influência sobre a durabilidade (Uchikawa *et al*, 1997).

PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. ASPECTOS GERAIS

Para determinar as potencialidades de utilização de RHA e GRT como substitutos parciais do cimento no betão considerou-se a abordagem habitual de estudar as propriedades em argamassa em primeiro lugar. Assim realizou-se um programa experimental utilizando provetes de argamassa em que o cimento Portland (CEM I) foi substituído em 10% por RHA ou por GRT e procedeu-se ao estudo e comparação de diversos parâmetros entre estes provetes e provetes de controlo (nos quais não se efectuou qualquer substituição do cimento).

Para os devidos efeitos foram realizados vários ensaios, sendo eles:

- Avaliação da **trabalhabilidade** (ASTM C 109/90 e ASTM 230)
- Ensaios das **resistências mecânicas** – compressão e flexão (NP EN 196-1)
- Determinação do **índice de actividade** (NP 4220)
- Ensaio de **penetração acelerada de cloretos** (E463)
- Ensaio de **resistividade eléctrica**
- Ensaio de **absorção de água por capilaridade** (E393)
- Ensaio de **carbonatação acelerada** (E391)

Também foram realizados ensaios com as pastas de ligante (100% de cimento e substituição de 10% por RHA ou GRT), nas quais se determinou o **tempo de presa** e da **expansibilidade** (NP EN 196-3).

3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.2.1. MATERIAIS UTILIZADOS

Na preparação das argamassas ensaiadas foram utilizados os seguintes materiais:

- Cimento Portland (CEM I) da classe 42,5R;
- Água potável;
- Superplastificante Sika ViscoCrete 3006
- Areia normalizada CEN (Comité Europeu de Normalização);
- Cinza de casca de arroz de origem espanhola – RHA;
- Grits – GRT.

De seguida apresenta-se a composição química e a granulometria obtida pelo granulómetro laser do LABEST (Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural) do cimento utilizado.

Quadro 2 – Composição química do cimento utilizado (disponibilizada pela Secil).

Perda ao fogo	%	P.F.	2,85
Resíduo insolúvel	%	R.I.	1,12
Óxido de silício	%	SiO ₂	20,41
Óxido de alumínio	%	Al ₂ O ₃	4,74
Óxido de ferro	%	Fe ₂ O ₃	3,08
Óxido de cálcio	%	CaO	62,28
Óxido de magnésio	%	MgO	1,90
Sulfatos	%	SO ₃	3,11
Cloretos	%	Cl ⁻	0,0146
Cal livre	%		1,01

d(0.1): 2.429 um

d(0.5): 19.912 um

d(0.9): 55.760 um

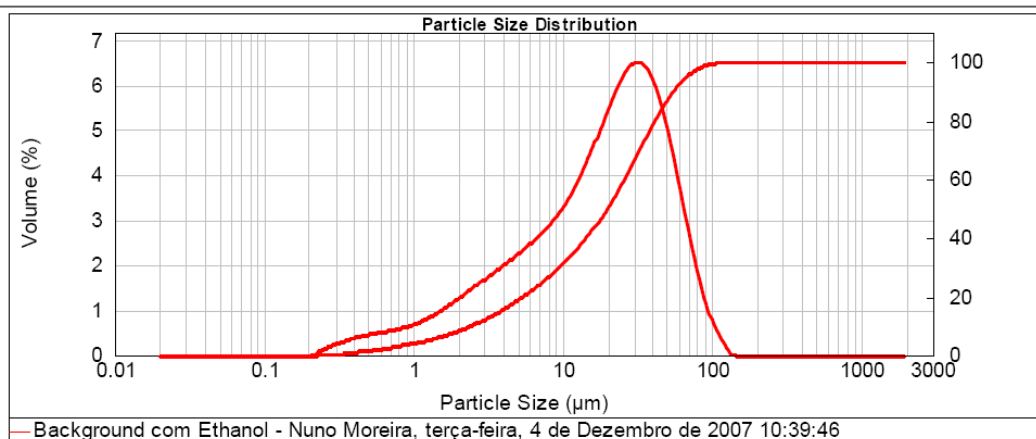


Figura 22 – Curva granulométrica do cimento utilizado.

O superplastificante usado, Sika ViscoCrete 3006 é composto por policarboxilatos modificados em base aquosa. É isento de cloretos ou quaisquer outros ingredientes corrosivos para as armaduras, podendo ser usado sem restrições em betão armado e betão pré-esforçado e cumpre os requisitos da norma NP EN 934-2:T3.1/3.2.

Por merecerem especial atenção são em seguida expostos mais pormenorizadamente os processos de obtenção e caracterização da cinza de casca de arroz e dos grits.

3.2.2. CINZA DE CASCA DE ARROZ (RHA)

3.2.2.1. Características gerais

A cinza de casca de arroz (RHA) utilizada neste programa experimental é de origem espanhola e foi fornecida pela Cincás – Comércio de Cinza e Casca de Arroz, Unipessoal, Lda. Esta cinza foi disponibilizada num estado pronto a usar, não sendo necessário proceder a qualquer tratamento ou moagem.

As primeiras características que se denotam nesta cinza são a sua cor preta e a baixa massa volúmica. Este material não apresenta efeitos adversos à saúde humana, efeitos nocivos ao meio ambiente e não é classificado como produto perigoso de acordo com as directrizes europeias de classificação de produtos perigosos e preparações.



Figura 23 – Cinza de casca de arroz.

3.2.2.2. Caracterização físico-química

As características físicas e químicas da RHA utilizada foram disponibilizadas pela empresa fornecedora, e apresentam-se em seguida.

Quadro 3 – Composição química da RHA (Cincás).

Alumínio	0,052 %
Cálcio	0,220 %
Dióxido de Silício	89,80 %
Enxofre	0,160 %
Fósforo Total	0,160 %
Magnésio	0,072 %
Nitrogénio Total	0,760 %
Potássio	0,830 %
Sódio	0,026 %
Carbono Orgânico	1,080 %

foi necessário levar a cabo um processo de moagem e peneiração que permitisse obter um material com características mais adequadas.



Figura 25 – Máquina utilizada na moagem dos grits (esquerda) e subsequente peneiração (direita).

Assim sendo utilizou-se a “máquina de Los Angeles” para se moer os grits. A máquina foi lavada com água e areia (para além das esferas de aço) para se retirarem quaisquer resíduos que pudessem “contaminar” os grits e foi posteriormente limpa e seca, sendo ainda aspirada no dia seguinte. Os grits em estado “bruto” foram então inseridos no interior da máquina conjuntamente com as esferas de aço e a máquina foi selada com fita adesiva para se evitar que as partículas de maior finura se perdessem durante o processo de moagem. Após algumas tentativas verificou-se que após as 2000 voltas a granulometria dos grits não parecia alterar-se significativamente e foi este o número de voltas usado para obter os grits usados no processo experimental aqui documentado. Tomou-se o cuidado de não se introduzirem grandes quantidades de grits em estado “bruto” de uma só vez na máquina para tornar o processo de moagem mais eficaz.

Após esta fase os grits, já moídos, foram secos em estufa a 105°C até massa constante e posteriormente realizou-se a sua peneiração, separando o material retido no peneiro 250µm, que foi retirado e guardado à parte, não sendo usado neste programa experimental.



Figura 26 – Material retido no peneiro 250 μ m (à esquerda, não utilizado) e restante material (à direita, utilizado nos ensaios).

3.2.3.2. Granulometria

A granulometria dos grits obtida pelo granulómetro laser do LABEST (Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural) é apresentada em seguida.

d(0.1): 9.165 um d(0.5): 28.235 um d(0.9): 171.731 um

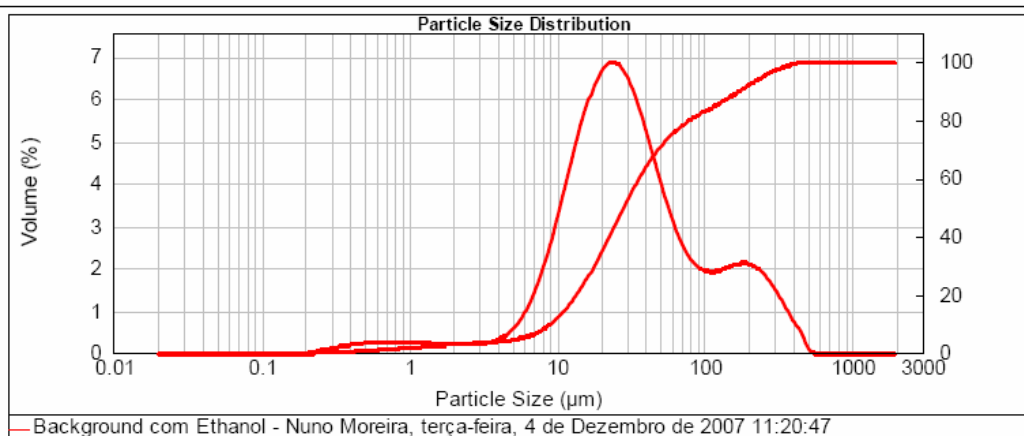


Figura 27 – Granulometria dos grits (moídos, prontos a utilizar).

3.2.3.3. Caracterização físico-química

A caracterização físico-química aqui apresentada foi realizada pela própria empresa fornecedora dos resíduos.

Quadro 5 – Caracterização físico-química dos grits.

Parâmetro	Máximo	Mínimo	Média
pH	13,2	12,4	12,8
Condutividade (mS/m)	27501	375	1434
Massa volúmica (g/cm ³)	1,94	1,18	1,56
Fibra (%R)	-	-	-
Solubilidade em água fria (%R)	19,8	2,1	8,0
Carbono total (C) (%R)	10,8	8,5	9,7
Azoto Kjeldhal (N) (%R)	0,01	0,001	0,004
Azoto Amoniacal (N) (%R)	0,334	0,001	0,066
Azoto Nítrico (N) (%R)	0,04	0,014	0,028
Fósforo total (P) (%R)	0,82	0,07	0,33
Humidade (%B)	21,4	8,7	14,2
Sólidos totais (105±3°C) (%B)	91,3	66,5	84,1
Sólidos totais fixos (550±25°C) (%T)	99,9	82,6	96,9
Sólidos totais voláteis (550±25°C) (%T)	17,4	0,1	3,1
Sílica + silicatos (insolúvel) (%R)	0,97	0,15	0,52
Cloretos solúveis (Cl ⁻) (%R)	0,74	0,01	0,18
Valor Neutralizante (CO ₃ ²⁻) (%R)	60,4	48,3	55,1
Sulfatos (SO ₄ ²⁻) (%R)	2,73	0,12	0,80
Sulfuretos solúveis (%R)	0,76	0,05	0,16
AOX no Eluato (mg/L)	0	0	0
Metais (% do resíduo seco)			
Cálcio (Ca)	51,97	31,67	39,88
Magnésio (Mg)	0,57	0,13	0,27
Sódio (Na)	1,93	0,27	1,08
Potássio (K)	0,14	0,01	0,07
Ferro (Fe)	0,87	0,05	0,28
Alumínio (Al)	0,67	0,04	0,20
Manganês (Mn)	0,03	0,003	0,012
Metais potencialmente tóxicos (mg/kg de resíduo seco)			
Níquel (Ni)	45,6	10,7	26,2

Cobre (Cu)	10,7	2,64	5,0
Chumbo (Pb)	40,4	13,3	39,1
Zinco (Zn)	15	15	15,0
Cádmio (Cd)	6,18	3,17	4,83
Mercúrio (Mg)	0,49	0,04	0,180
Crómio (Cr)	26,0	6,0	14,4
Cobalto (Co)	27,5	1,41	20,1

(%R) – Medido em percentagem do resíduo seco.

(%B) – Medido em percentagem do peso bruto.

(%T) – Medido em percentagem dos sólidos totais.

Como a utilização deste resíduo para substituição parcial do cimento não se encontra ainda estudada nem documentada, surgiu a necessidade de se conhecer o material mais abrangentemente possível de forma a realçar qualquer característica inerente a este material que constitua um problema para o seu uso como substituto parcial do cimento no betão.

Por esta razão apresentam-se em seguida considerações sobre alguns elementos que quando estão presentes no cimento são nocivos para o betão.

3.3. ANÁLISE DOS ELEMENTOS NOCIVOS DA RHA E DOS GRITS EM BETÃO

Ao substituir parte do cimento Portland por grits ou RHA é necessário ter em consideração algum elemento que seja prejudicial ao betão à vista do que foi referido no capítulo 2 relativo a elementos nocivos. Para se verificar esta situação utilizaram-se as análises químicas da RHA, dos grits e do cimento e compararam-se os valores da composição “Cimento + RHA” e “Cimento + grits” com os valores limite.

Quadro 6 – Análise de potenciais elementos nocivos introduzidos pelos grits ou RHA estudados.

Substância Nociva	Percentagem na RHA	Percentagem nos grits	Percentagem no cimento ^{a)}	Percentagem total ^{b)}		Limite ^{c)}
				RHA	GRT	
Magnésio	0,072%	0,27%				1% (Macphee <i>et al</i> , 1998)
Sulfatos (SO ₃)	0,4%	2%	3,04%	2,8%	2,9%	≤ 4% Ver Quadro 1 na página 21 (NP EN 197-1)

Substância Nociva	Percentagem na RHA	Percentagem nos grits	Percentagem no cimento ^{a)}	Percentagem total ^{b)}		Limite ^{c)}
				RHA	GRT	
Sódio	0,026%	1,08%				0,6% (ver pág. 23)
Potássio	0,830%	0,07%				0,6% (ver pág. 23)
Fósforo	0,160%	0,33%	0,06%	0,07%	0,09%	0,5% (Uchikawa <i>et al</i> , 1997)
Flúor	0	0	0	0	0	± 0,3% (Jackson, 1998)
Cloretos	0	0,18%	0,03%	0,027%	0,045%	0,10% (NP EN 197-1)
Crómio	0	0,00144%				0,0002% (NP EN 196-10)
Zinco	0	0,0015%				0,1% (Uchikawa <i>et al</i> , 1997)

^{a)} – Amostra de CEM I 42,5 R

^{b)} – Correspondente a uma substituição de 10% do cimento por RHA ou por grits.

^{c)} – Imposto por norma ou recomendado por bibliografia da especialidade.

3.4. ENSAIOS

3.4.1. ASPECTOS GERAIS

Utilizando os materiais descritos no ponto anterior fabricaram-se provetes de argamassa com vista a realizar os ensaios programados. Para manter uma fiabilidade de resultados tão alta quanto possível e para ser possível comparar o desempenho dos diferentes tipos de adições, manteve-se também constante a razão água/ligante (A/L) e acertando-se a trabalhabilidade com o recurso ao superplastificante (SP), tomando como modelo o espalhamento obtido para a primeira argamassa de controlo produzida (que se fixou como sendo 220 ± 10 mm). Note-se que não foi necessário utilizar superplastificante para a argamassa com grits (GRT). Assim sendo, as quantidades de materiais usadas e o traço das argamassas foram os seguintes:

Quadro 7 – Quantidades usadas para o fabrico das argamassas (A/L: razão água/ligante)

		CTL	GRT	RHA
Cimento	(g)	450	405	405
GRT	(g)	-	45	-
RHA	(g)	-	-	45
Superplastificante (SP)	(g)	-	-	4,25
SP/L	(%)	-	-	0,9
Areia	(g)	1350	1350	1350
Água	(g)	225	225	225
A/L	(g)	0,5	0,5	0,5

Quadro 8 – Traços em peso (em função da massa do ligante)

	Ligante		Areia	Água	Superplastificante (SP)
	Cimento	GRT ou RHA			
CTL	1	0	3	0,5	0
10%GRT	0,9	0,1	3	0,5	0
10%RHA	0,9	0,1	3	0,5	0,009

O procedimento utilizado no fabrico dos provetes foi, em geral, o preconizado na NP EN 196-1 com excepção do período final de mistura que foi aumentado de 3 minutos para garantir o efeito do superplastificante e uma boa mistura das adições (RHA ou GRT), levando a que o tempo total deste procedimento fosse de 7 minutos. O superplastificante foi adicionado directamente na água de amassadura e as adições (RHA ou GRT) foram adicionadas conjuntamente com o cimento.

Após a mistura, a argamassa foi compactada e introduzida em moldes nos quais permaneceu 24 horas, decorrido esse tempo os provetes foram desmoldados e colocados em água até à data dos ensaios.

3.4.2. AVALIAÇÃO DA TRABALHABILIDADE

A trabalhabilidade foi avaliada logo após a preparação da argamassa estar finalizada. Foi utilizada uma mesa de espalhamento, molde e procedimento que estão de acordo com as normas americanas ASTM C 109/90 e ASTM 230. Neste ensaio, a argamassa é colocada num molde tronco-cónico em duas camadas compactadas e depois rasado e alisado. Em seguida o provete é desmoldado e submetido a 25 quedas da mesa durante 15 segundos. No final, são medidos três diâmetros cuja média corresponde ao diâmetro de espalhamento (em milímetros).



Figura 28 – Avaliação da trabalhabilidade.

Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 9.

Quadro 9 – Diâmetro de espalhamento (mm) segundo ASTM C 109/90.

Amassadura	CTL	GRT	RHA
1	220,3	224,7	220,7
2	219,0	221,3	222,7
3	216,3	216,0	223,7
4	217,0	221,0	220,7
5	212,7	224,7	224,3
6	219,0	220,7	216,0
7	212,3	214,3	226,3
8	210,3	210,3	218,7
Diâmetro médio [mm]	215,9	219,1	221,6
Desvio padrão [mm]	3,7	5,1	3,3

3.4.3. RESISTÊNCIAS MECÂNICAS

Foram determinadas as resistências à flexão e à compressão aos 7, 28 e 90 dias. Para determinar as resistências mecânicas foi seguida a norma NP EN 196-1 com excepção da resistência mecânica aos 7 dias, para a qual apenas estavam disponíveis 2 provetes 40×40×160 mm (o terceiro provete de cada tipo de argamassa destinou-se ao ensaio de carbonatação). No ensaio de resistência à flexão os provetes resultantes correspondem a meios prismas, e depois, cada um é submetido ao ensaio de compressão.

Os resultados obtidos no ensaio permitem obter as resistências a partir das expressões apresentadas em seguida.

- Resistência à compressão R_c (MPa)

$$R_c = \frac{F}{A} \quad (3)$$

Em que:

F – carga máxima à rotura, em N

A – área da secção transversal, em mm^2

- Resistência à flexão R_f (MPa)

$$R_f = \frac{1,5 \times F \times l}{b^3} \quad (4)$$

Em que:

F – carga máxima à rotura, em N

l – espaçamento dos roletes inferiores em mm

b – dimensões laterais do provete em mm (neste caso só é apresentada uma dimensão b pois a largura toma o mesmo valor da altura, 40mm)

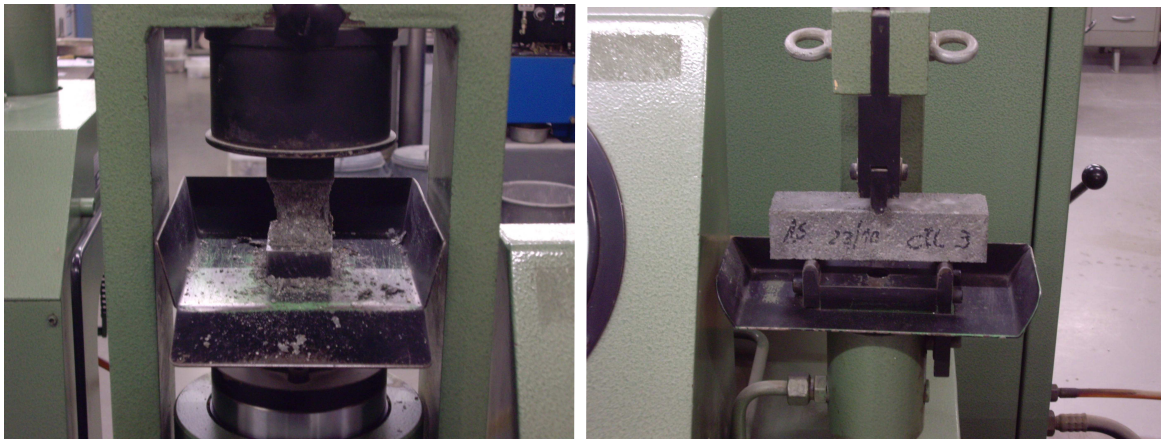


Figura 29 – Ensaio de resistências mecânicas: compressão (esquerda) e flexão (direita).

Os resultados obtidos encontram-se no Quadro 10.

Quadro 10 – Resistências (flexão e compressão) aos 7, 28 e 90 dias em MPa.

		CTL	GRT	RHA
7d	$R_{flexão}$	7,1	6,1	5,1
	R_{compr}	33,9	32,6	28,7
28d	$R_{flexão}$	$8,4 \pm 0,4$	$7,8 \pm 0,5$	$6,8 \pm 0,2$
	R_{compr}	$49,4 \pm 2,8$	$39,2 \pm 0,9$	$35,1 \pm 1,2$
90d	$R_{flexão}$	$8,9 \pm 0,2$	$6,9 \pm 0,3$	$7,1 \pm 0,2$
	R_{compr}	$60,5 \pm 2,2$	$40,2 \pm 1,2$	$45,4 \pm 1,8$

3.4.4. ÍNDICE DE ACTIVIDADE

Para a determinação deste índice foi seguido o preconizado no ponto 3.4 da NP 4220 com duas excepções. A percentagem de GRT ou RHA utilizada foi de 10% e não 25% como preconizado na norma. Utilizou-se o mesmo princípio considerado para os outros ensaios, de fixar a trabalhabilidade e portanto usou-se superplastificante para os RHA, como descrito em 3.4.1. A determinação do Índice de Actividade basicamente corresponde a uma comparação de resistência à compressão aos 28 dias das argamassas contendo RHA ou GRT e a argamassa de controlo. O que difere de um normal ensaio à compressão é a conservação dos provetes, que são mantidos em água a $38 \pm 2^\circ\text{C}$ desde 24 horas após a amassadura até 24 horas antes do ensaio, com o intuito de acelerar as reacções.

As resistências mecânicas dos provetes utilizados neste ensaio apresentam-se no Quadro 11. Note-se que os resultados obtidos foram surpreendentemente baixos.

Quadro 11 – Resistências (flexão e compressão) aos 28 dias para o ensaio do índice de actividade.

	CTL	GRT	RHA
$R_{flexão}$	$8,5 \pm 0,5$	$7,3 \pm 0,5$	$6,2 \pm 0,4$
R_{compr}	$40,2 \pm 2,3$	$33,0 \pm 1,5$	$35,1 \pm 1,2$



Figura 30 – Conservação dos provetes em água a $38 \pm 2^\circ\text{C}$.

A partir dos valores do Quadro 11 calculou-se o índice de actividade da argamassa contendo RHA e da argamassa contendo grits, obtendo-se os seguintes valores:

- $IA_{RHA} = \frac{35,1}{40,2} = 87\%$
- $IA_{GRT} = \frac{33,0}{40,2} = 82\%$

3.4.5. TEMPO DE PRESA

Para avaliar a influência dos substitutos parciais do cimento (GRT e RHA) no tempo de presa, foi efectuado o ensaio de determinação do tempo de presa. Neste ensaio, normalizado pela NP EN 196-3, mede-se a resistência de uma pasta de cimento à penetração de uma agulha com 1 mm^2 de secção, sob a acção de um peso de 300g. Distinguem-se em geral dois períodos para o tempo de presa: início e fim. O primeiro é o tempo decorrido entre a amassadura e a perda da plasticidade, e o fim de presa é o tempo necessário para que a pasta adquira a firmeza suficiente para resistir a uma certa pressão (Sousa Coutinho, 2006).

Em primeiro lugar, e seguindo a norma supracitada, fabricou-se uma pasta de consistência normalizada. Por tentativas, foram-se juntando diferentes quantidades de água até a pasta colocada no molde tronco-cónico oferecer a resistência necessária à penetração de uma sonda normalizada (com 10 mm de diâmetro) aplicada no aparelho de Vicat para que a sonda penetre na pasta até uma distância de $6 \pm 1 \text{ mm}$ da base.

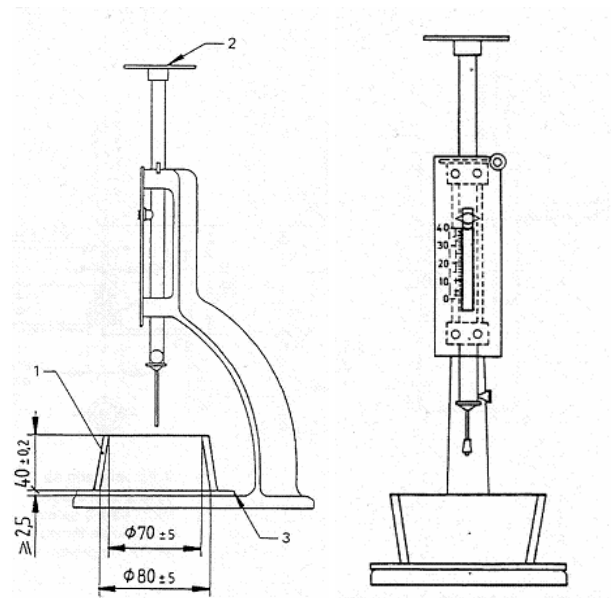


Figura 31 – Imagem da esquerda: Vista lateral mostrando o molde em posição vertical para a determinação do tempo de início de presa. 1-Molde em borracha dura. 2-Prato para pesos adicionais. 3-Placa de vidro (NP EN 196-3) (Dimensões em milímetros) Imagem da direita: Aparelho de Vicat para a determinação da consistência da pasta normal e do tempo de presa (a agulha representada é a utilizada para a determinação do tempo de fim de presa).

Obtida a pasta de consistência normal, passou-se à determinação do início de presa. Fizeram-se leituras em intervalos de tempo sucessivos, com o aparelho de Vicat munido da agulha de Vicat, até ao momento em que a agulha já não conseguiu atravessar a pasta até ao fundo, ficando a 4 ± 1 mm da base. Nesse momento registou-se o tempo decorrido como sendo o tempo de início de presa.

Para determinar o tempo de fim de presa utilizou-se uma agulha semelhante à anteriormente usada, mas provida de um anel com 5 mm de diâmetro de modo a deixar a extremidade da agulha a 0,5 mm para além da aresta deste anel. Quando a agulha, assente na superfície do bloco de ensaio, deixou a sua marca mas o anel não deixou qualquer sinal, significando isto que a agulha penetrou menos de 0,5 mm registou-se o tempo decorrido como sendo o tempo de fim de presa.



Figura 32 – Determinação do tempo de fim de presa da pasta com RHA.

No quadro seguinte apresentam-se os tempos de início e fim de presa, assim como a razão A/C (ou A/L no caso das pastas com substituição parcial do cimento) com que se obteve a pasta de consistência normal para os diferentes tipos de pastas:

Quadro 12 – Tempos de presa dos diferentes tipos de pasta.

	Consistência normal		Tempo de presa	
	Água (g)	A/L	Início	Fim
CTL	155	0,31	3h05m	4h15m
GRT	145	0,29	3h30m	4h30m
RHA	190	0,38	3h25m	4h00m

3.4.6. EXPANSIBILIDADE

É essencial que a pasta de cimento, após presa não sofra grandes variações de volume, em particular expansões que, se impedidas podem causar a destruição do material. Esse tipo de expansões pode ser causado por hidratação retardada ou lenta (ou outras reacções) de alguns compostos presentes tais como:

- óxido de cálcio livre
- óxido de magnésio
- sulfato de cálcio

Como a expansibilidade apenas se manifesta alguns meses ou mesmo anos depois do fabrico, é importante verificar esta característica através de um ensaio acelerado, criado por Le Chatelier e regulamentado pela norma NP EN 196-3 (Sousa Coutinho, 2006).

Este ensaio com o aparelho de Le Chatelier apenas detecta a expansibilidade provocada por óxido de cálcio livre (Neville, 1995).

Para determinar a expansibilidade, utilizou-se então a pasta de consistência normal que foi colocada em dois aparelhos de Le Chatelier (dois aparelhos por cada tipo de pasta), que consiste num pequeno cilindro com 30 mm de diâmetro interno e 30 mm de altura, feito de chapa de latão com 0,5 mm de espessura. O cilindro tem uma abertura vertical, estando-lhe soldadas duas agulhas, com 150 mm de comprimento, de um lado e outro da abertura.

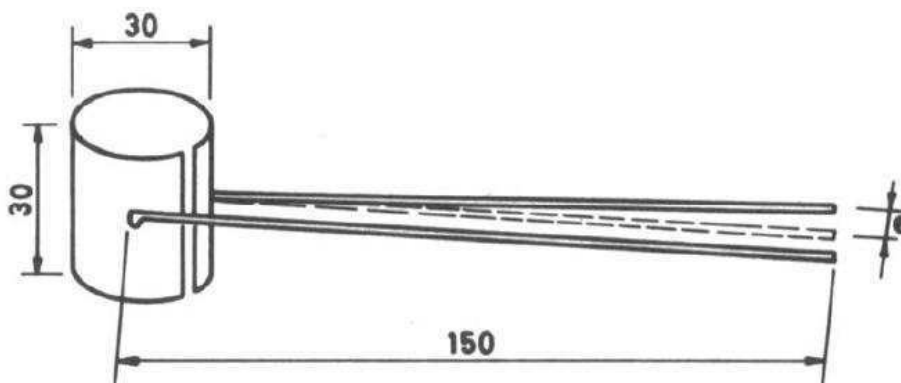


Figura 33 – Aparelho de Le Chatelier. Medidas em milímetros (Neville, 1995).

Depois de cheio com pasta de cimento, o molde foi coberto com duas placas de vidro e comprimido por um pequeno peso de encontro à pasta, sendo o conjunto mantido dentro de água a $20 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 24 horas. Ao fim deste intervalo de tempo mediu-se o afastamento entre as duas agulhas (anotando este valor como sendo A), e elevou-se a temperatura da água até 100°C em 1 hora, mantendo-se depois esta temperatura durante 3 horas. Após estas 3 horas retiraram-se os provetes da água e mediu-se novamente a distância entre agulhas (medição B). Após os provetes arrefecerem mediu-se novamente a distância entre as agulhas (medição C). A diferença entre as medições C e A representa a expansibilidade da pasta de cimento a qual não deve exceder, de acordo com as normas NP EN 197-1 e NP 4326 o valor de 10mm.

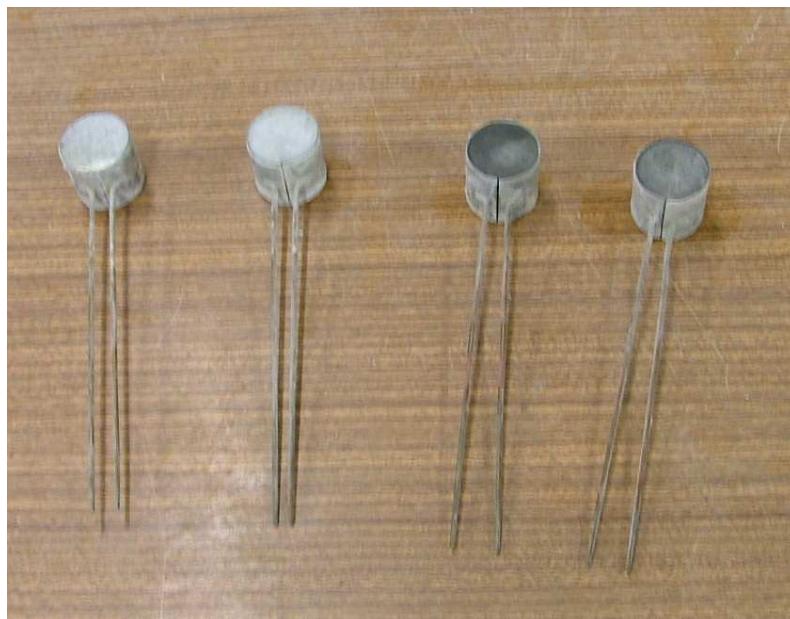


Figura 34 – Aparelhos de Le Chatelier contendo pasta com grits (esquerda) e com RHA (direita).

No Quadro 13 apresentam-se os valores das leituras e a diferença média entre as leituras A e C.

Quadro 13 – Leituras e resultados do ensaio de expansibilidade.

	Medições dos afastamentos entre agulhas [mm]			Média da diferença C-A [mm]
	A	B	C	
CTL	2	2,5	2,5	0,25
	9	9	9	
GRT	9	9	9	0,5
	3	4	4	
RHA	10,5	10,5	10,5	0
	13	13	13	

3.4.7. ENSAIO DE PENETRAÇÃO ACELERADA DE CLORETOS

Como já foi referido no capítulo 3, a penetração de cloretos destrói a camada de passivação que protege as armaduras em betão, se a concentração de cloretos for superior a um dado limite. Sem esta camada, e se existir humidade e oxigénio, ocorre a corrosão das armaduras. Por esta razão, o ensaio de penetração (acelerada) de cloretos é um ensaio muito importante quando se quer estudar aspectos relacionados com a durabilidade.

Seguiu-se a especificação do LNEC E-463 para avaliar a penetração (acelerada) de cloretos. Utilizaram-se nove provetes cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 50 mm de altura: três provetes relativos à argamassa de controlo (CTL), três provetes relativos à argamassa contendo cinza de casca de arroz (RHA) e três provetes relativos à argamassa contendo grits (GRT). Conforme o preconizado

por aquela especificação, submeteu-se cada provete, entre as faces circulares (d direcção pela qual se dá a penetração dos cloretos) a um potencial eléctrico externo, o que faz com que os iões cloro externos (provenientes de uma solução de NaCl), inicialmente apenas em contacto com a superfície do provete, migrem para o interior do provete.

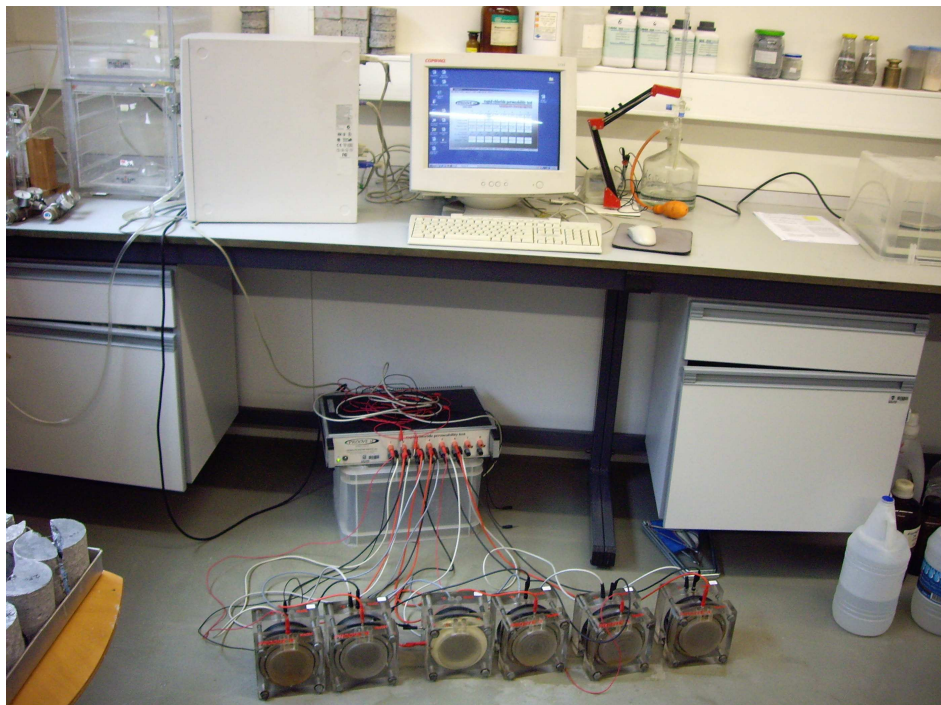


Figura 35 – Ensaio de penetração de cloretos segundo a E 463.

Finalizado este processo de migração (24 horas de duração neste caso) os provetes foram abertos axialmente por compressão linear e, para se visualizar e medir as profundidades de penetração, pulverizaram-se as secções rectangulares com uma solução de nitrato de prata. Estas secções foram sujeitas à luz de uma lâmpada fluorescente para que se visualizasse mais facilmente o precipitado branco de cloreto de prata. Após ser visível a profundidade de penetração facultada pelo precipitado branco de cloreto de prata, procedeu-se à medição da profundidade de penetração de 10 mm em 10 mm, segundo o diâmetro do provete, com uma folga de 10 mm a cada bordo, obtendo deste modo sete valores para a profundidade. Estas medições foram realizadas com a precisão de 0,1mm.

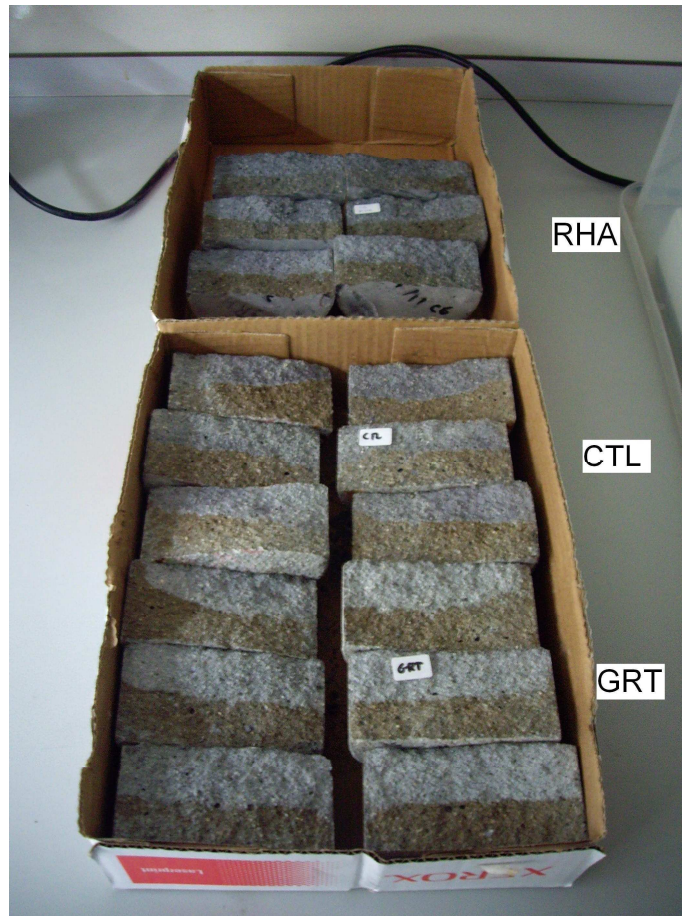


Figura 36 – Profundidade de penetração de cloretos (parte mais clara).

O coeficiente de difusão em regime não estacionário é calculado com base na equação 5 (LNEC E 463):

$$D = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \left(x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)Lx_d}{U - 2}} \right) \quad (5)$$

Na qual:

D é o coeficiente de difusão no estado não estacionário, $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$;

U é o valor absoluto da voltagem aplicada, em V;

T é o valor médio das temperaturas inicial e final na solução anódica, em °C;

L é a espessura do provete, em mm;

x_d é o valor médio da profundidade de penetração, em mm;

t é a duração do ensaio, em horas.

Os resultados obtidos para os diferentes tipos de argamassas são apresentados no Quadro 14.

Quadro 14 – Coeficientes de difusão aparente.

Tipo de argamassa	Provete	Coeficiente de difusão, $D_{ns} \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Média do coeficiente de difusão $D_{ns} \times 10^{-12}$ m^2/s
CTL	CTL1	10,7	11,5 ± 0,7
	CTL2	11,7	
	CTL3	12,2	
GRT	GRT1	12,7	12,7 ± 0,3
	GRT2	12,3	
	GRT3	13,0	
RHA	RHA1	13,1	13,4 ± 0,2
	RHA2	13,6	
	RHA3	13,3	

3.4.8. ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉCTRICA

A importância da resistividade como parâmetro da durabilidade do betão tem vindo a tornar-se cada vez mais evidente e tem sido progressivamente inserida pelos meios científicos europeus numa abordagem probabilística para o projecto de durabilidade de estruturas marítimas (Gjorv, 2005). Na realidade quando os poros do betão estão totalmente saturados a corrente eléctrica flui com maior ou menor facilidade através do betão de acordo com a natureza e conectividade da rede porosa.

Em consequência, considerou-se importante o cálculo da resistividade possibilitada pela realização dos ensaios de penetração de cloretos em condições de saturação total dos provetes. Apresentam-se no Quadro 15 os valores da resistividade obtidos, calculada pela equação 6.

$$\rho \equiv R \cdot \frac{A}{L} \equiv \frac{V \cdot A}{L \cdot I} \quad (6)$$

Na qual:

ρ – Resistividade eléctrica ($\Omega \cdot \text{m}$)

R – Resistência eléctrica (Ω - Ohm)

I – Corrente (Amperes)

V – Diferença de potencial (Volt)

L – Comprimento do provete (m)

A – Área transversal do provete atravessado pela corrente (m^2).

Quadro 15 – Resistividade das argamassas.

Tipo de argamassa	Provete	Resistividade $\Omega.m$	Média das Resistividades $\Omega.m$
CTL	CTL 1	52,3	52,2 ± 0,9
	CTL 2	53,0	
	CTL 3	51,2	
GRT	GRT 1	53,7	53,7 ± 0,5
	GRT 2	53,2	
	GRT 3	54,2	
RHA	RHA 1	62,0	68,3 ± 6,6
	RHA 2	67,6	
	RHA 3	75,2	

3.4.9. ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

A durabilidade de uma estrutura de betão é influenciada pela presença de água (com eventual presença de substâncias dissolvidas e gases) e pelo seu transporte através dos poros e fendas. Esta presença e transporte de água são resultantes da absorção de água por capilaridade por parte da rede porosa do betão.

Define-se sucção capilar ou absorção como a entrada de água na rede porosa do betão devido a forças capilares que resultam da diferença de pressão entre a superfície livre da água no exterior do betão e a sua superfície nos poros capilares e depende do diâmetro capilar. Este mecanismo ocorre se o betão está sujeito a ciclos de molhagem e secagem.

Para analisar quantitativamente este fenómeno utilizaram-se nove provetes de $100 \times 100 \text{ mm}^2$ de base e aproximadamente 50 mm de altura e seguiu-se a norma especificação do LNEC E 393, na parte aplicável, que está de acordo com a recomendação da RILEM TC 116 PCD. Assim sendo utilizaram-se três provetes relativos à argamassa de controlo (CTL), três provetes relativos à argamassa contendo cinza de casca de arroz (RHA) e três provetes relativos à argamassa contendo grits (GRT).

Os provetes foram secos em estufa a 40°C até a sua massa ser constante (o que indica que toda a água por eles absorvida foi eliminada) e deixaram-se à temperatura ambiente para arrefecerem. Após esta secagem e retorno à temperatura ambiente, os provetes foram colocados num recipiente com uma grelha plástica no fundo (para permitir que a água acesse facilmente à face inferior – face relativa à superfície cofrada) e encheu-se o recipiente até o nível de água ter atingido $5 \pm 1 \text{ mm}$. Este enchimento foi efectuado com o cuidado necessário para não molhar os provetes na zona que deve permanecer emersa.

Este ensaio tem como objectivo o cálculo do coeficiente de absorção (S) que corresponde ao gradiente da curva de absorção nas primeiras quatro horas e meia de ensaio, ou seja:

$$A = a_0 + S \times t^{0,5} \quad (7)$$

Na qual:

A – Absorção de água por unidade de superfície de betão (mg/mm²)

S – coeficiente de absorção do material (mg/(mm²×min^{0,5}))

t – tempo passado desde o instante inicial (min)

a₀ – água inicialmente absorvida pelos poros em contacto com a água (mg/mm²)

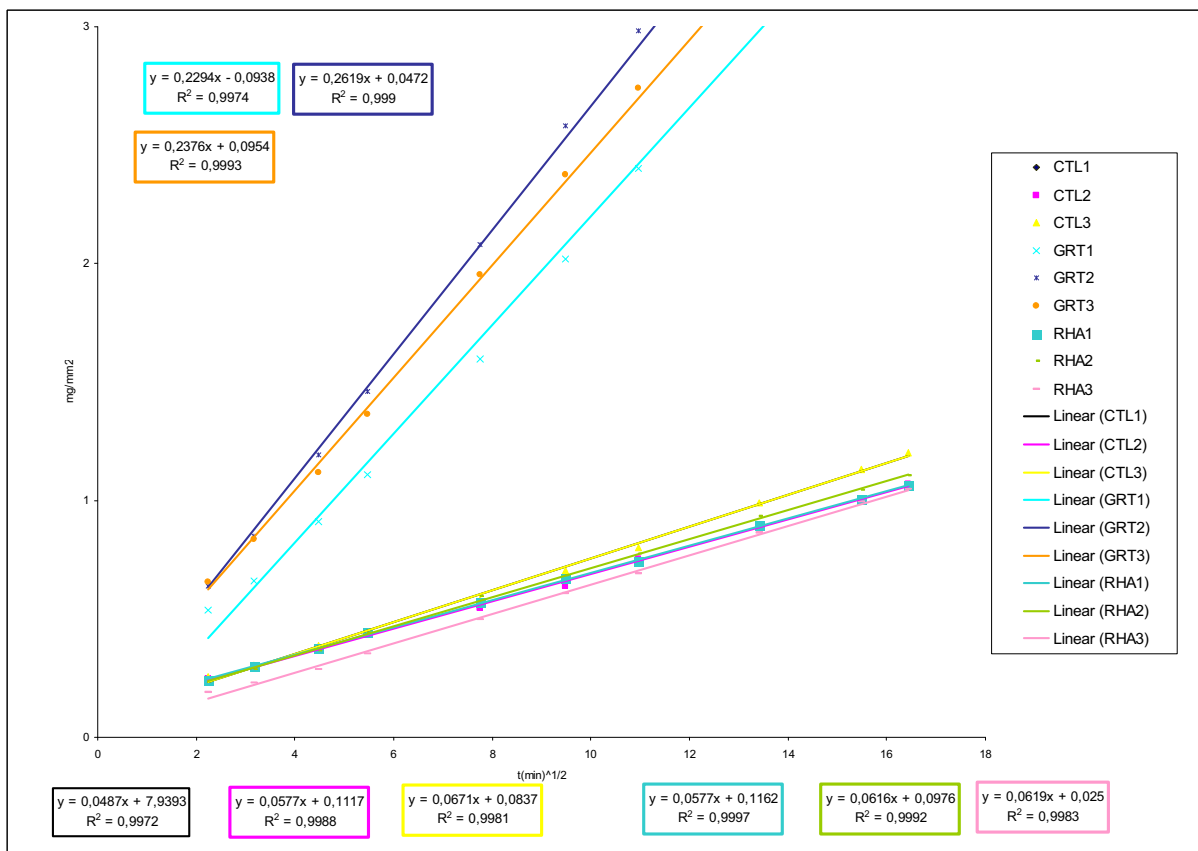


Figura 37 – Curvas de absorção capilar e regressão linear para os provetes ensaiados.

Os coeficientes de absorção, calculados por regressão linear a partir das curvas de absorção relativas aos provetes ensaiados apresentam-se no Quadro 16.

Quadro 16 – Coeficientes de absorção.

Tipo de argamassa	Provete	Coeficiente de absorção, S mg/(mm ² ×min ^{1/2})	Média do coeficiente de absorção, S
CTL	CTL1	0,0487	0,0578 ± 0,0092
	CTL2	0,0577	
	CTL3	0,0671	
GRT	GRT1	0,2294	0,2430 ± 0,0169
	GRT2	0,2619	
	GRT3	0,2376	
RHA	RHA1	0,0577	0,0604 ± 0,0023
	RHA2	0,0616	
	RHA3	0,0619	



Figura 38 – Ensaio de absorção de água por capilaridade.

3.4.10. ENSAIO DE CARBONATAÇÃO ACELERADA

A carbonatação é de especial importância pois este processo faz baixar a alcalinidade do betão destruindo a camada protectora da armadura designada por filme passivo, o que leva a uma posterior corrosão da armadura se o oxigénio e humidade necessários forem providenciados.

A determinação da resistência à carbonatação baseia-se na especificação do LNEC E 391 tendo sido analisados três provetes de dimensões 40×40×160 mm, um relativo a cada tipo de argamassa.

A carbonatação acelerada foi levada a cabo durante 44 dias numa câmara de carbonatação acelerada, como se pode ver na Figura 39, onde os provetes se encontravam na posição vertical com uma das faces 40×40 mm assentes na base da câmara.



Figura 39 – Câmara de carbonatação acelerada.

A câmara apresenta uma humidade relativa (HR) de 65%, sendo a temperatura aproximadamente de 20°C, com uma concentração de CO₂ de 5%. Estes parâmetros são controlados por equipamento inserido na própria câmara.

Cortou-se dos provetes retirados da câmara, uma fatia de cerca de 1cm da parte superior de cada um e pulverizaram-se as secções rectangulares com solução de fenolftaleína. A fenolftaleína apresenta uma cor rosa forte nas zonas isentas de carbonatação mantendo-se incolor nas zonas que foram afectadas por esta.

Para a obtenção dos resultados importa referir as duas definições seguintes:

- Profundidade de carbonatação: distância média, medida em milímetros, desde a superfície do betão ou argamassa até à frente de carbonatação;
- Frente de carbonatação: linha limite da zona onde o dióxido de carbono reduziu a alcalinidade do material para valores de pH detectáveis pela viragem do indicador de fenolftaleína. (pH entre 8 e 10).

Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 17.

Quadro 17 – Resultados do ensaio de carbonatação acelerada.

	CTL	GRT	RHA
Profundidade média (mm)	4,0	4,5	6,0
Profundidade máxima (mm)	6,0	5,0	6,5

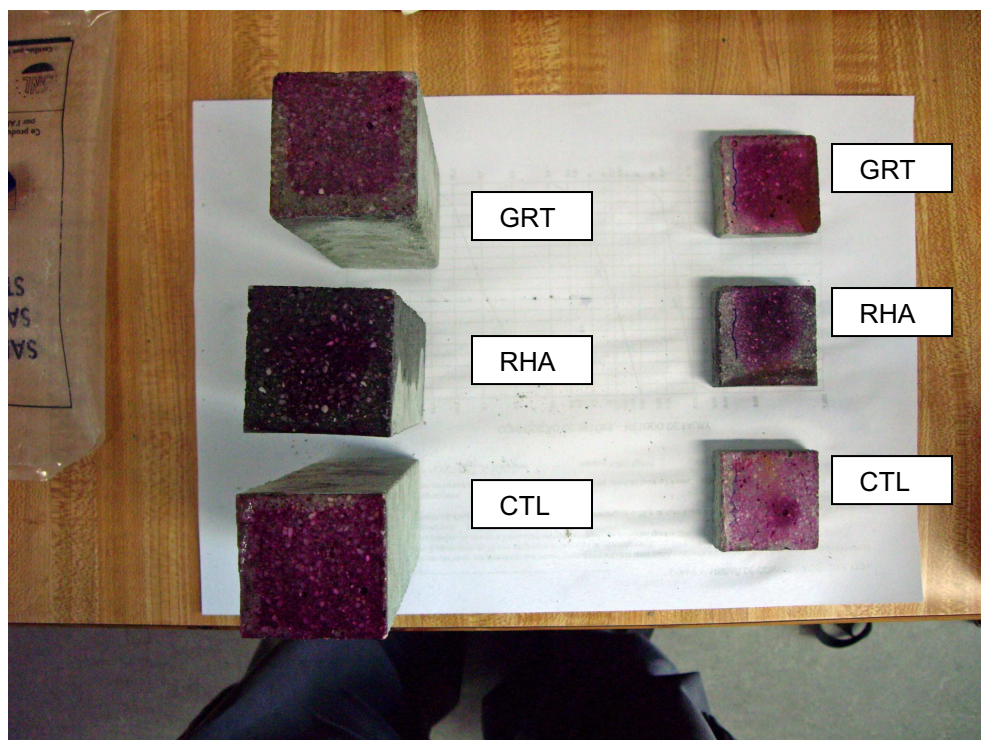


Figura 40 – Profundidades de carbonatação.

CONCLUSÕES

4.1. ANÁLISE DE PROPRIEDADES E RESULTADOS

No capítulo anterior foi analisada uma série de propriedades relativas, em primeiro lugar, aos materiais utilizados e, posteriormente, às argamassas obtidas com substituição parcial do cimento por cinza de casca de arroz (RHA) e grits (GRT) com vista a determinar as potencialidades de utilização destes materiais como substituição parcial do cimento em betão estrutural.

Considerando em primeiro lugar os materiais RHA e GRT, e perante os resultados presentemente disponíveis, poder-se-ão tecer as seguintes elacções em relação a:

- **Granulometria**

Torna-se evidente pela análise das propriedades granulométricas, só conhecidas depois do fabrico de todos os provetes do presente programa experimental, que nem a RHA nem os GRT foram suficientemente moídos, podendo este facto comprometer fortemente o desempenho deste tipo de material. Note-se que a RHA foi entregue com a informação de possibilidade de utilização imediata, não tendo sido fornecidos dados minuciosos sobre a granulometria (ver Quadro 4 - Características físicas da RHA Cincás). Em relação aos GRT, a moagem deste material foi realizada em laboratório, como descrito anteriormente, mas não foi possível controlar a finura na altura, pois o granulómetro encontrava-se desactivado. Provavelmente também o equipamento de moagem utilizado não seria suficientemente eficaz para se obter a finura necessária.

Na realidade se as finuras da RHA e dos GRT forem comparadas com a finura do cimento observamos uma grande discrepância de valores. No Quadro 18 os valores de $d(0,1)$, $d(0,5)$ e $d(0,9)$ indicam que 10%, 50% e 90% das partículas medidas têm uma finura igual ou inferior ao valor do diâmetro apresentado.

Quadro 18 – Valores de $d(0,1)$, $d(0,5)$ e $d(0,9)$ em μm .

	$d(0,1)$	$d(0,5)$	$d(0,9)$
CEM	2,429	19,912	55,760
GRT	9,165	28,235	171,731
RHA	34,702	113,942	314,228

Pela análise do Quadro 18 fica claro que ao substituir cimento Portland por RHA ou GRT, substituir um material de uma certa finura por materiais de o novo material é constituído por partículas mais grossas.

De facto, comparando as curvas granulométricas obtidas no granulómetro, retirando as partículas 10% mais grossas e as 10% mais finas dos 3 materiais e comparando os GRT e a RHA com o cimento, verifica-se que só 29% do GRT e apenas 8% da RHA se enquadram nessa gama de partículas do cimento, isto é de 2,429 a 55,760 microns.

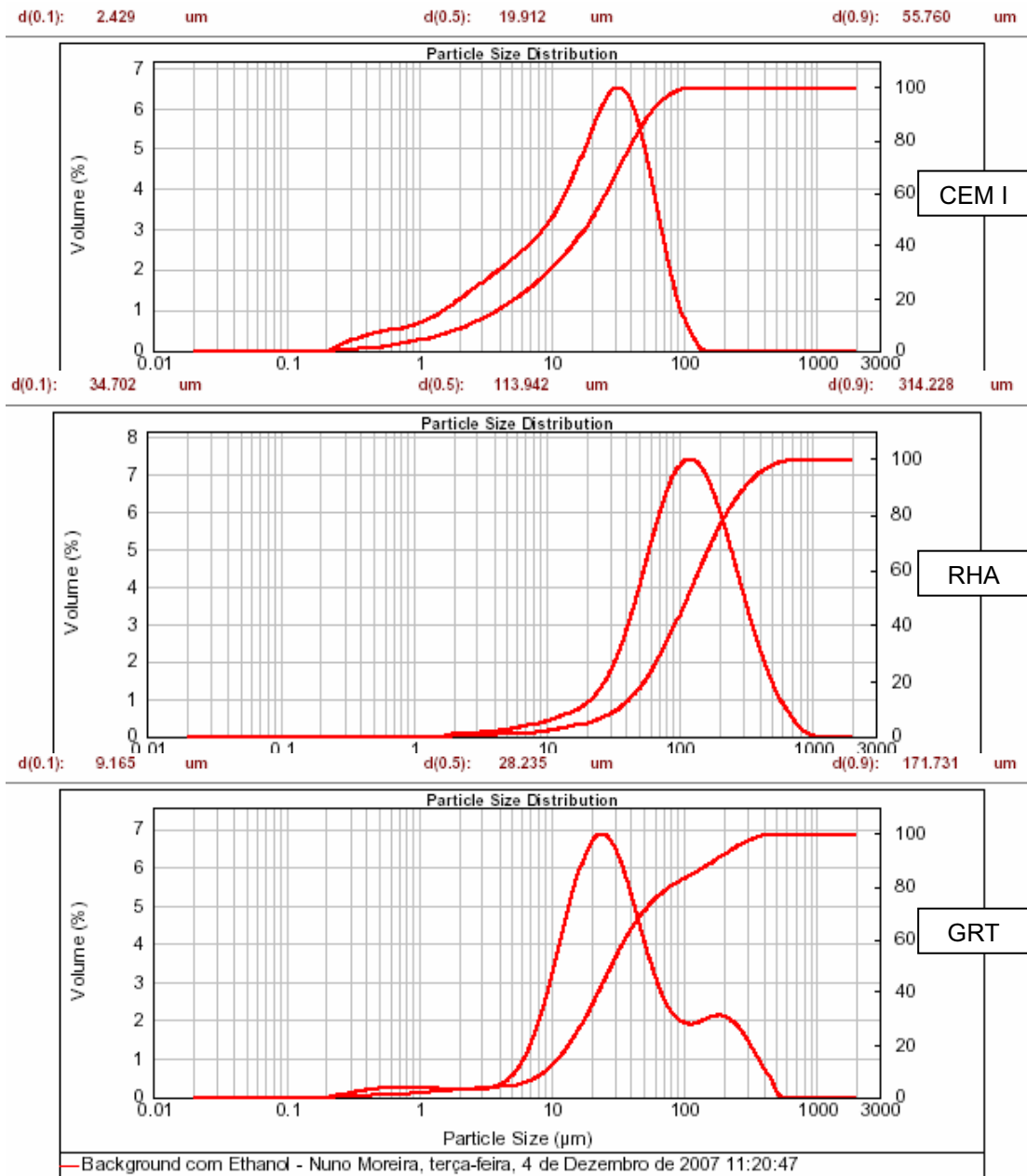


Figura 41 – Relação entre as granulometrias dos diferentes materiais.

Estas diferenças de granulometria acarretam uma perda da superfície específica como se pode ver pelo Quadro 19 (refira-se que estes valores resultaram do estudo da granulometria laser e portanto não foram avaliados pelo método de Blaine e como tal, têm outra ordem de grandeza).

Quadro 19 – Superfície específica dos materiais utilizados (granulometria laser).

Superfície específica (m ² /kg)	
CEM	1110
GRT	539
RHA	99,6

- **Elementos nocivos**

Analisando os resultados disponíveis para o caso presente do cimento com substituição parcial pelos materiais estudados, RHA e GRT, não parece que a quantidade de nenhuma substância potencialmente nociva possa afectar o desempenho de betão ou argamassa fabricados com esta percentagem de 10% substituição como se pode constatar pelo Quadro 6.

- **Tempo de início e fim de presa**

A substituição parcial do cimento Portland por GRT faz com que o tempo de início e fim de presa aumente ligeiramente e que a água necessária para obter a pasta de consistência normal reduza. A substituição parcial do cimento Portland por RHA faz com que o tempo de início de presa aumente um pouco mas o de fim de presa diminua, sendo a água necessária para obter a pasta de consistência normal bastante mais elevada.

A regulamentação em vigor (NP EN 197-1) limita inferiormente o tempo de início de presa de acordo com a classe de resistência do cimento, de acordo com os valores do Quadro 20.

Quadro 20 – Tempo de início de presa de acordo com a classe de resistência dos cimentos (NP EN 197-1).

Classe de resistência	Tempo de início de presa (minutos) de acordo com:	
	NP EN 197-1	NP 4326 (cimentos brancos)
32,5 N	≥75	≥45
32,5 R		
42,5 N	≥60	
42,5 R		
52,5 N	≥45	
52,5R		

Todas as pastas de cimento ensaiadas cumprem estes limites.

- **Razão A/L (água/ligante) para consistência normal**

Recordando que para o fabrico dos provetes a quantidade de superplastificante foi doseada de forma a obter uma trabalhabilidade semelhante (22cm) para os 3 tipos de argamassa, o facto de ter sido

necessário adjuvante apenas para a argamassa com RHA confirma os resultados da razão A/L: a razão A/L para consistência normal foi praticamente a mesma para CTL e GRT mas mais elevada para RHA.

- **Expansibilidade:**

Pela análise deste quadro verifica-se que nenhuma das pastas ensaiadas apresenta problemas de expansibilidade provocada por óxido de cálcio livre.

Considerando agora os resultados das propriedades resistência mecânica, Índice de Actividade (IA), difusão de cloretos, resistividade eléctrica e carbonatação acelerada relativas aos provetes de argamassa fabricados com 100% de cimento (CTL), 10% de substituição de cimento por GRT e 10% de substituição de cimento por RHA, no quadro 21 apresentam-se os resultados obtidos bem como a comparação entre a argamassa de controlo e as argamassas com substituição parcial de cimento Portland.

Quadro 21 – Resultados obtidos para as diferentes argamassas e comparação dos resultados.

Propriedade		CTL	10%GRT	10%RHA	Melhoria (+) de GRT versus CTL	Melhoria (+) de RHA versus CTL
σ_{7d}	MPa	33,9	32,6	28,7	-4%	-15%
σ_{28d}	MPa	49,4	39,2	35,1	-21%	-29%
σ_{90d}	MPa	60,5	40,2	45,4	-34%	-25%
IA	%	-	87	82	-13%	-18%
D_{ns}	$\times 10^{-12} m^2/s$	11,5	12,7	13,4	-10%	-17%
Resistividade	Ohm.m	52,2	53,7	68,3	+3%	+31%
C^{te} . absorção	$mg/(mm^2 \times min^{0,5})$	0,0578	0,2430	0,0604	-320%	-4.5%
Carbonatação	Profundidade média (mm)	4,0	4,5	6,0	-13%	-50%

X_{SUB} – resultado da propriedade X para a argamassa com substituição de cimento por GRT ou RHA

$$Melhoria = \frac{X_{SUB} - X_{CTL}}{X_{CTL}}$$

X_{CTL} – resultado da propriedade X para a argamassa de controlo

- **Resistências mecânicas**

Pela análise do conjunto dos resultados conclui-se que a substituição de 10% do cimento por cinza de casca de arroz ou por grits resulta numa perda de resistência (que pode chegar a uma diferença de 25% aos 90 dias, no caso da RHA e 34%, no caso dos grits).

• **Índice de Actividade**

Embora os valores não sejam elevados como seria desejável, encontram-se próximo do limite mínimo considerado para as pozolanas ou para as cinzas volantes silicosas (Figura 42), que é de 85% para uma substituição de 25% de cimento. Repare-se que certamente estes valores do IA crescerão substancialmente se os materiais de substituição forem moídos mais finamente.

Adição/const. principal do cimento	composição	Documento normativo	Substituição de CEMI* pela adição	Índice de Actividade IA
Escórias adição	Pelo menos 2/3 de CaO, MgO e SiO ₂ com (CaO+MgO/ SiO ₂) >1	EN 375:1993	30%	É determinada a resistência aos 7 e 28 dias R _{7d} ≥ 12 MPa R _{28d} ≥ 24 MPa
	restante Al ₂ O ₃ + ...	prEN 15167-1	50%	IA _{7d} ≥ 45% IA _{28d} ≥ 70%
Pozolana natural adição	Sobretudo SiO ₂ (>25%) e Al ₂ O ₃ mas tb. Fe ₂ O ₃ + ...	NP 4220:1993	25%	IA _{28d} ≥ 85% **
Xisto cozido no cimento		NP EN 197-1	0	R _{28d} ≥ 25 MPa
Cinza volante Calcária W no cimento (prop. pozolánicas)	CaO (reactivo) >10% SiO ₂ Al ₂ O ₃ mas tb. Fe ₂ O ₃ + Se 10 < CaO < 15% então SiO ₂ > 25%	NP EN 197-1		Se CaO(reactivo) > 15% → É determinada a resistência aos 28 dias R _{28d} ≥ 10 MPa
Cinza volante Siliciosa V no cimento (prop. pozolánicas e hidráulicas)	SiO ₂ > 25% Al ₂ O ₃ CaO (reactivo) ≤ 10%	NP EN 197-1		
Cinza volante siliciosa adição	SiO ₂ > 25% Al ₂ O ₃ CaO(reactivo) ≤ 10%	NP EN 450-1:2006	25%	IA _{7d} ≥ 75% IA _{28d} ≥ 85%
Sílica de fumo no cimento	SiO ₂ > 85% (BET > 15 m ² /g)	NP EN 197-1		
Sílica de fumo adição	SiO ₂ > 85% (15 < BET < 35 m ² /g)	NP EN 13263-1:2006	10%	IA _{28d} ≥ 100%

* Em cada documento normativo são referidas as características do CEMI

** Procedimento acordo com a NP EN 196-1, salvo no referente à conservação do provete decorridas 24 h após a amassadura e até 24 horas antes do ensaio, que deve ser feita em água a 38 ± 2°C

Figura 42 – Índices de actividade exigidos para as diversas adições (Sousa Coutinho, 2006).

• **Difusão de cloretos**

É possível através dos valores obtidos por Gjørsv representados no Quadro 22, classificar o betão em termos de resistência à penetração de cloretos de acordo com os valores obtidos para D_{ns}. No caso de argamassa poder-se-á supor que os limites das classes apresentados serão mais altos uma vez que não existirão partículas de agregado grosso a dificultar o percurso dos cloretos. Assim, os 3 tipos de argamassa oferecerão provavelmente uma resistência semelhante e mais do que moderada, à penetração de cloretos.

Quadro 22 – Classes de resistência à penetração de cloretos no betão (Gjorv, 2005).

Coeficiente de difusão em estado não estacionário, D_{ns}	Classe de resistência à penetração de cloretos
$D_{ns} \geq 15 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Baixa
$10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} < D_{ns} < 15 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Moderada
$5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} < D_{ns} < 10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Elevada
$2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} < D_{ns} < 5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Muito elevada
$D_{ns} \leq 2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Extremamente elevada

- **Resistividade eléctrica**

Os valores obtidos indicam que a introdução de RHA parece oferecer maior resistência à passagem de corrente relativamente a CTL e GRT.

- **Coeficiente de absorção por capilaridade**

Relativamente ao coeficiente de absorção por capilaridade os betões podem ser classificados segundo o Quadro 23.

Quadro 23 – Coeficientes de absorção em betão (Browne, 1991).

Qualidade	Coeficiente de absorção por capilaridade, S
Baixa	$S > 0.2 \text{ mg}/\text{mm}^2 \times \text{min}^{0.5}$
Média	$0.1 \text{ mg}/\text{mm}^2 \times \text{min}^{0.5} < S < 0.2 \text{ mg}/\text{mm}^2 \times \text{min}^{0.5}$
Elevada	$S < 0.1 \text{ mg}/\text{mm}^2 \times \text{min}^{0.5}$

No caso de se considerar argamassa poder-se-á prever que os limites apresentados serão mais elevados. Na realidade a absorção será, em princípio, mais intensa numa argamassa relativamente a um betão semelhante, pois o agregado grosso dificultará os percursos da água através da rede porosa.

Neste parâmetro de análise da durabilidade houve um ligeiro decréscimo na argamassa com RHA enquanto que a argamassa com GRT apresentou um desempenho mais de três vezes inferior, à argamassa de controlo.

- **Carbonatação acelerada**

A substituição de 10% de cimento Portland por cinza de casca de arroz ou por grits resulta numa diminuição da resistência à carbonatação.

4.2. CONCLUSÕES FINAIS

Os resultados obtidos no presente programa de ensaios estão muito aquém do que seria esperado. No entanto esta situação não significa que a substituição parcial de cimento Portland, quer por grits quer por RHA, seja inviável, apenas indicam que a utilização destes materiais não é aceitável nas condições em que foram utilizados neste estudo.

Assim, relativamente à cinza de casca de arroz, material internacionalmente reconhecido como possuidor de propriedades pozolânicas e com benefícios para a durabilidade do betão (Chandra *et al*, 1997; Tiboni, 2007; SousaCoutinho, 2003; Sousa, 2005; Júnior *et al*, 2003; Pacewska *et al*, 2002; Kumar, 1993), é necessário compreender as causas dos fracos resultados obtidos neste estudo. Sabe-se também que para obter uma cinza apta para substituição parcial do cimento Portland é necessário ter em conta dois aspectos importantes: o modo como a casca de arroz é incinerada e a moagem da cinza daí resultante. Como anteriormente referido (capítulo 2) a queima da casca de arroz tem que ser controlada para se obter uma elevada quantidade de sílica amorfa. A cor negra da RHA utilizada neste estudo reflecte a presença de carbono e desconhece-se o estado da sílica (à data de impressão deste trabalho os resultados das análises de um laboratório independente ainda não se encontravam disponíveis). Se a sílica presente na RHA se encontrar no estado cristalino não é reactiva, pelo que não irá possuir características pozolânicas e o seu desempenho não será o esperado. Iguamente importante é a granulometria da RHA utilizada como substituto parcial do cimento Portland.

De facto após análise das curvas granulométricas, cujos resultados, como referido anteriormente, só ficaram disponíveis depois de todos os provetes terem sido confeccionados, torna-se evidente que nem os GRT nem a RHA foram suficientemente moídos sendo ambos constituídos por partículas mais grossas que o cimento. Este facto permite explicar o insucesso destes materiais no caso presente. De facto se as adições não forem mais finas que o cimento, não ocorrerá o preenchimento dos espaços deixados entre as partículas de cimento e o seu efeito benéfico esperado poderá mesmo tornar-se negativo. Na realidade se as partículas introduzidas por substituição são maiores que as de cimento, apenas afastarão ainda mais essas partículas entre si e criarão mais espaços vazios, isto é, mais porosidade e portanto menos resistência e durabilidade. Assim parece óbvio, pelos resultados deste estudo, que foi precisamente a finura insuficiente dos materiais que ditou resultados negativos. Em trabalhos subsequentes será portanto essencial garantir a finura adequada de modo a que se possa, de facto, avaliar as vantagens de utilização destes materiais.

4.3. TRABALHOS FUTUROS

Perante o exposto anteriormente parece evidente que a investigação deve prosseguir começando por controlar a finura dos materiais de modo a que se complemente com a do cimento. Em termos dos 2 tipos de materiais utilizados terá eventualmente algum interesse estudar a RHA pois em Portugal existe uma produção de arroz suficiente para se produzirem cerca de 3630 toneladas de RHA por ano (FAO, 2007), uma quantidade suficiente para se melhorar a durabilidade de cerca de 91000 metros cúbicos de betão (substituição de 10% do cimento por RHA). Relativamente aos grits é fundamental prosseguir a investigação na aplicabilidade deste resíduo pois de facto utilizar um resíduo para substituir parcialmente o cimento em betão, poderá ter enormes vantagens do ponto de vista de:

- Não aterro de um resíduo que de outra forma poderia poluir a água, terra ou ar;
- Redução de emissões de CO₂ pelo facto de se reduzir a quantidade de clínquer utilizado;
- Redução de energia dispendida CO₂ pelo facto de se reduzir a quantidade de clínquer utilizado;

- Aumento da durabilidade do betão estrutural com conseqüente redução de utilização de recursos para reparação e reabilitação.

Isto é, demonstrar que estes materiais apresentam todas estas vantagens constitui uma solução ambientalmente correcta e é contribuir para a sustentabilidade na construção.

BIBLIOGRAFIA

ASTM C 109/90 *ASTM Designation C109-90-Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*

ASTM C 230. *ASTM Designation C230M-98-Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of hydraulic Cement.*

Basheer, P., Long, A., Rankin, G, (2002). *In-Situ evaluation of the effects of a controlled permeability formwork on properties of near surface concrete.* Innovations and Developments in Concrete Materials and Construction, Proceedings of the International Conference, University of Dundee, Scotland, Edt Ravindra K. Dhir, Peter C. Hewlett, Laszlo J. Csetenyi, pp. 673-683, 9-11 Sept. 2002,UK

Browne, R., (1991). *Field Investigations: site & laboratory tests: maintenance repair and rehabilitation of concrete structures*, CEEC, Lisboa

Celpa (2008a). www.celpa.pt Acesso em 1 de Fevereiro de 2008.

Celpa (2008b). http://www.celpa.pt/images/articles/213/art213_pasta_celulose.pdf Acesso em 1 de Fevereiro de 2008.

Chandra, S., Hwang, C. (1997). *Waste materials used in concrete manufacturing; Chapter 4: The use of rice husk ash in concrete.* William Andrew Publishing/Noyes

Cimpor (2007). *Relatório de sustentabilidade 2006*, Abril 2007, Lisboa

Dhir, K., Trevor, G., Jappy, Telford H., (1999). *Preface to Exploiting wastes in concrete*, Proceedings of the International Seminar held at University of Dundee, Scotland, UK, Edit. Ravindra

E 391: 1993. *Betões. Determinação da resistência à carbonatação*

E 463: 2005 *Especificação LNEC. BETÃO. Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário.*

Fang, M., Yang, L., Chen, Y., Shi, Z., Luo, Z., Cen, K. (2003) – *Experimental study on rice husk combustion in a circulating fluidized bed.* Institute for Thermal Power Engineering, pp.1273-1282, Zhejiang University, Hangzhou 310027, PR China; Zhejiang University City College, Hangzhou 310015, PR China. Elsevier Science Ltd.,

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations - Trade and Markets Division (2007). *Rice Market Monitor, September 2007, Volume 10 Issue No. 3.*

Fib (2004). *Bulletin 28 – Fédération Internationale du Béton CEB – FIB, “Environmental design – state of – the-art report*

Gjoerv, O (2005). *Durability Design of Marine Concrete Structures- European Perspective*, Florida

Glass, J. (2001) *Ecoconcrete, The contribution of cement and concrete to a more sustainable built environment.* BCA

IPCC – Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas das Nações Unidas (2007), 4^o Relatório de Avaliação, Novembro 2007- *Summary for Policymakers*. Genebra

Jackson, P. (1998). *Portland Cement: Classification and Manufacture*, Chapter 2, Lea's Chemistry of Cement and Concrete, 4th Edt., Edt. By Peter C. Hewlett, Arnold, London

John, A., Poole, A., Sims, I.,(1998). *Concrete Petrography*, Ed. Arnold, U.K.

Júnior, L., Santos, S., Dafico, D. (2003). *Utilização de Resíduos na Construção Habitacional; capítulo 8 - Cinza da casca de arroz*. Coletânea Habitar ANTAC Porto Alegre, vol.4 pp.241-261, Porto Alegre.

Kumar, A (1993). *Rice husk ash based cements*. pp.342-367, Central and Ceramic Research Institute Jadavpur, Calcutta 700 032, India.

LNEC: E393 1993. *Betões. Determinação da absorção de água por capilaridade*

Macphee, D., Lachoswski, E. (1998). *Cement Components and their Phase Relations*, Chapter 3, Lea's Chemistry of Cement and Concrete, 4th Edt., Edt. By Peter C. Hewlett, Arnold, London

Mehta, P. (1994). *Mineral admixtures for concrete – an overview of recent developments*. Advances in cement and concrete, Proceedings of an Engineering Foundation Conference, ASCE, pp. 243-256, University of Newhampshire, Durham.

Mehta, P. (2001). *Reducing the environment impact of concrete – concrete can be durable and environmentally friendly*. pp 61-66, Concrete International

Modolo, R. (2006)., *Valorização de resíduos do sector de pasta e papel em produtos da construção civil*, Tese de Mestrado, Departamento de Eng. Cerâmica e do Vidro, Universidade de Aveiro

Naik, T., Kraus, R. (1999) *Use of industrial by-products in cement-based materials, Exploiting wastes in concrete*. Proceedings of the International Seminar held at University of Dundee, Ed. Ravindra K. Dhir and Trevor G. Jappy. Thomas Telford, Scotland, UK

Neville, A.(1995). *Properties of Concrete*, 4th Edt., Longman, England

NP 4220: 1993. *Pozolanas para betão. Definições, especificações e verificação da conformidade*.

NP EN 196-1: 1996. *Métodos de ensaio de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas*

NP EN 196-10: 2007. *Métodos de ensaio de cimentos. Parte 10: Determinação do teor de crómio (VI) solúvel em água no cimento*.

NP EN 196-3: 2006. *Métodos de ensaio de cimentos. Parte 3: Determinação do tempo de presa e expansibilidade*.

NP EN 197-1: 2001. *Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes*.

NP EN 206-1: 2007. *Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade.*

Pacewska, B., Bukowska, M., Motly, D., Szafran, M., Blazdell, P., (2002). *Rice-husk ash as pozzolanic material in cement pastes.* NOCMAT/3 pp.392-398.– Vietnam International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies, 12-13 March 2002 Hanoi, Vietnam

Papadakis, V (2000). *Efficiency Factors (K-values) for supplementary cement materials regarding carbonation and chloride penetration.* CANMET/ACI, International Conference on Durability of Concrete, vol.1, pp. 173-187 Ed. By V.M. Malhotra, Barcelona, Spain

Petranek, V. (2006) *Special Protective Coatings for Concrete Structures.* Fédération Internationale du Béton. Paper in Proceedings of the 2nd International Congress. ID 15-43 Session 15 – Durability of concrete structures, – Naples, Italy

Pinto S. (2005)., *Valorização de resíduos da indústria da celulose na produção de agregados leves,* Tese de Mestrado, Departamento de Eng. Cerâmica e do Vidro, pp7-18, Universidade de Aveiro

RILEM TC116-PCD. *Permeability of concrete as a criterion of its durability, C: Determination of the capillary absorption of water of hardened concrete. Materials and Structures 1999; 32:178-179.*

Samarin, A. (1999). *Wastes in concrete: converting liabilities into assets,* Exploiting wastes in concrete. Proceedings of the International Seminar held at University of Dundee, Ed. Ravindra K. Dhir and Trevor G. Jappy, Thomas Telford, Scotland, UK

Sousa Coutinho, J. (1999). *Agregados para argamassas e betões.* Edições DEC FEUP, Porto.

Sousa Coutinho, J. (2001). *Ataque por sulfatos,* Mestrado de Estruturas de Engenharia Civil, FEUP, Porto

Sousa Coutinho, J. (2003). *The combined benefits of CPF and RHA in improving the durability of concrete structures.* - “Cement and Concrete Composites” Ed. R.N. Swamy and A.E. Naaman, Elsevier, 25, pp.51-59

Sousa Coutinho, J. (2005). *Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento da Cofragem.* FEUP edições, Porto

Sousa Coutinho, J. (2006). *Materiais de Construção 2 – 1ª Parte: Ligantes e Caldas,* DEC- FEUP, 2002 actualizado 2006.

Sousa Coutinho, J. (2007). *Cinza de casca de arroz (RHA) industrial – Ensaíos.* IC-NOCMAT 2007 Maceió. International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies: Ecological Materials and Technologies for Sustainable Building. 14th – 18th October 2007, Maceió, Lagos, Brasil

Sousa, S. (2005). *Betões Eco-Eficientes com Cinza de Casca de Arroz.* Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Swamy, N., Barbosa, R., Lynsdale, C. (2000). *Sustainable concrete for infrastructure regeneration and reconstruction. Sustainable Construction into the next Millennium: Environmentally friendly and*

innovative cement based materials. Paper in Proceedings of the International Conference, Ed. N.P., pp. 15-43, 2-5 November 2000 João Pessoa, Brasil

Tiboni, R. A Utilização da Cinza da Casca de Arroz de Termoelétrica como Componente do Aglomerante de Compósitos à Base de Cimento Portland (2007). Dissertação de Mestrado, Departamento de Estruturas, EESC. Universidade de São Paulo. São Carlos - SP

Uchikawa, H., Hanehara, S. (1997). *Waste materials used in concrete manufacturing; Chapter 8: Recycling of waste as an alternative raw material and fuel in cement manufacturing*. William Andrew Publishing/Noyes

Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, (2001) *Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement I, Industry, Annual Review of Energy and Environment*, C. & Meida, L. O., Vol. 26, pp. 303-329

ANEXOS

Espalhamentos da argamassa de controlo.

CTL			
espalhamento em mm			média
221	218	222	220,33
219	216	222	219,00
215	216	218	216,33
220	216	215	217,00
215	210	213	212,67
220	221	216	219,00
210	212	215	212,33
210	211	210	210,33
média			215,88
desvio padrão			3,67

Espalhamentos da argamassa com grits.

GRT			
espalhamento em mm			média
226	223	225	224,67
223	221	220	221,33
214	216	218	216,00
221	224	218	221,00
227	223	224	224,67
221	218	223	220,67
215	211	217	214,33
215	207	209	210,33
média			219,13
desvio padrão			5,10

Espalhamentos da argamassa cm cinza de casca de arroz.

RHA			
espalhamento em mm			média
225	220	217	220,67
224	219	225	222,67
223	220	228	223,67
219	223	220	220,67
221	230	222	224,33
217	216	215	216,00
228	225	226	226,33
218	215	223	218,67
média			221,63
desvio padrão			3,32

Valores dos ensaios de resistências mecânicas e índice de actividade.

		Massa [g]	Flexão [kg]	Compressão [kg]		Flexão [Mpa]	Compressão [Mpa]	
7 dias	CTL	584,44	319	5900	5200	7,327618	36,15196	31,86275
		576,88	295	5500	5550	6,776324	33,70098	34,00735
	GRT	584,44	285	5200	5300	6,546618	31,86275	32,47549
		582,36	250	5300	5450	5,742647	32,47549	33,39461
	RHA	575,56	225	5050	4800	5,168382	30,94363	29,41176
		578,68	220	4400	4500	5,053529	26,96078	27,57353
28 dias	CTL	577,7	350	8200	7500	8,039706	50,2451	45,95588
		579,8	365	8450	7500	8,384265	51,77696	45,95588
		588,7	385	8300	8450	8,843676	50,85784	51,77696
	GRT	596	360	6400	6600	8,269412	39,21569	40,44118
		590,1	340	6400	6500	7,81	39,21569	39,82843
		589,6	320	6200	6300	7,350588	37,9902	38,60294
	RHA	579,1	305	6100	6000	7,006029	37,37745	36,76471
		588,6	285	5900	5900	6,546618	36,15196	36,15196
		592,5	300	5800	6000	6,891176	35,53922	36,76471
90 dias	CTL	593,3	390	9800	10000	8,958529	60,04902	61,27451
		598,8	375	9450	10500	8,613971	57,90441	64,33824
		590	395	9600	9900	9,073382	58,82353	60,66176
	GRT	578,7	315	6750	6750	7,235735	41,36029	41,36029
		586,3	300	6500	6300	6,891176	39,82843	38,60294
		590,8	285	6350	6700	6,546618	38,90931	41,05392
	RHA	596,5	320	7600	7700	7,350588	46,56863	47,18137
		589,5	310	7450	7600	7,120882	45,64951	46,56863
		589,9	300	7000	7100	6,891176	42,89216	43,5049
IA	CTL	589,2	385	7000	6650	8,843676	42,89216	40,74755
		590,1	345	6500	6950	7,924853	39,82843	42,58578
		579	380	6200	6100	8,728824	37,9902	37,37745
	GRT	572,1	340	5000	5500	7,81	30,63725	33,70098
		582,3	315	5650	5600	7,235735	34,6201	34,31373
		580,6	300	5350	5250	6,891176	32,78186	32,16912
	RHA	578	260	5800	5700	5,972353	35,53922	34,92647
		583,7	255	5400	5650	5,8575	33,08824	34,6201
		585,5	290	6000	5800	6,661471	36,76471	35,53922

Resultados dos ensaios de resistências mecânicas.

		CTL	GRT	RHA
7d	R _{flexão}	7,1	6,1	5,1
	R _{compr}	33,9	32,6	28,7
28d	R _{flexão}	8,4 ± 0,4	7,8 ± 0,5	6,8 ± 0,2
	R _{compr}	49,4 ± 2,8	39,2 ± 0,9	35,1 ± 1,2
90d	R _{flexão}	8,9 ± 0,2	6,9 ± 0,3	7,1 ± 0,2
	R _{compr}	60,5 ± 2,2	40,2 ± 1,2	45,4 ± 1,8

Leituras da profundidade de penetração de cloretos.

Canal	1	2	3	4	5	6	4	5	6	
Proвете	CTL	CTL	CTL	GRT	GRT	GRT	RHA	RHA	RHA	
T inicial (°C)	20	21	21	22	21	21	21	20	20	
T final (°C)	25	25	26	27	26	26	27	26	26	
T médio (°C)	22,5	23	23,5	24,5	23,5	23,5	24	23	23	
Xd (mm)	1 xd6	21,5	24,4	28,1	27,4	28,7	27,6	29,0	25,9	29,5
	2 xd4	20,1	25,7	29,9	27,3	29,1	27,4	28,7	27,7	28,5
	3 xd2	24,6	25,4	27,7	27,2	30,9	27,0	29,9	27,3	27,7
	4 xd1	23,1	23,2	25,0	27,6	25,9	27,2	28,9	31,3	26,4
	5 xd3	23,3	23,3	24,9	27,8	28,8	27,2	27,6	29,6	31,7
	6 xd5	23,5	23,4	25,2	25,5	22,4	27,7	26,3	29,7	25,7
	7 xd7	25,2	28,9	20,1	25,4	17,5	28,0	24,0	29,6	28,2
D (m ² /s) x 10 ⁻¹²	Xd médio	23,0	24,9	25,8	26,9	26,2	27,4	27,8	28,7	28,2
	Voltagem	30	30	30	30	30	30	30	30	30
	t (horas)	24	24	24	24	24	24	24	24	24
	D (m ² /s)	10,7	11,7	12,2	12,7	12,3	13,0	13,1	13,6	13,3
	Média	11,5			12,7			13,4		
	Desvio P	0,7			0,3			0,2		

Leituras da massa (em gramas) dos provetes no ensaio de absorção de água por capilaridade

Tempo	CTL1	CTL2	CTL3	GRT1	GRT2	GRT3	RHA1	RHA2	RHA3
0	973,19	1100,53	1159,92	968,99	954,18	1012,23	988,27	952,76	1115,02
5	975,43	1102,98	1162,48	974,34	960,58	1018,79	990,65	955,08	1116,91
10	976,05	1103,51	1162,94	975,58	962,65	1020,57	991,24	955,60	1117,31
20	976,51	1104,32	1163,79	978,11	966,08	1023,42	991,99	956,42	1117,86
30	977,04	1104,83	1164,38	980,08	968,79	1025,85	992,67	957,16	1118,56
60	977,90	1105,97	1165,71	984,96	974,99	1031,74	993,95	958,69	1120,01
90	978,80	1106,91	1166,98	989,18	979,99	1035,97	994,94	959,59	1121,09
120	979,49	1108,05	1167,92	993,00	984,02	1039,62	995,71	960,48	1121,92
180	980,87	1109,37	1169,80	999,08	990,21	1045,35	997,22	962,10	1123,62
240	981,89	1110,61	1171,22	1003,99	994,95	1049,83	998,30	963,20	1124,97
270	982,50	1111,23	1171,95	1006,09	997,06	1051,86	998,90	963,78	1125,50
24h	990,91	1117,45	1181,07	1028,95	1016,00	1075,21	1006,07	971,49	1132,49
72h	996,47	1121,19	1185,96	1030,40	1016,46	1075,75	1009,80	975,73	1135,89



MASTERSIZER



Result Analysis Report

Sample Name:
Background com Ethanol - Nuno Moreira

Sample Source & type:

Sample bulk lot ref:

SOP Name:

Measured by:
snunes

Result Source:
Measurement

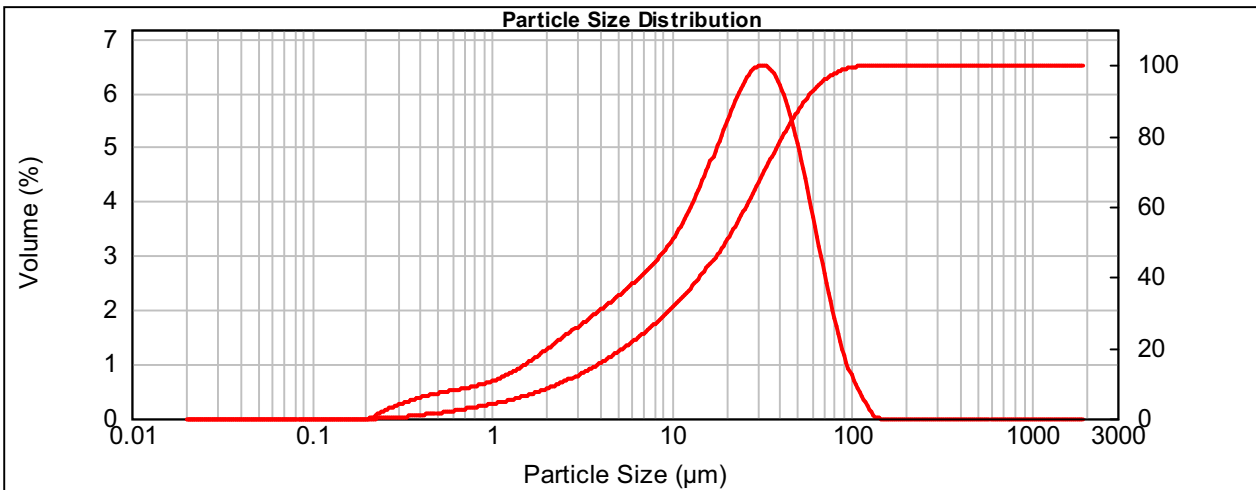
Measured:
terça-feira, 4 de Dezembro de 2007 10:39:46

Analysed:
terça-feira, 4 de Dezembro de 2007 10:39:48

Particle Name: Cement 1.0	Accessory Name: Hydro 2000S (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle RI: 1.680	Absorption: 1	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 16.12 %
Dispersant Name: Ethanol	Dispersant RI: 1.360	Weighted Residual: 0.576 %	Result Emulation: Off

Concentration: 0.0117 %Vol	Span : 2.678	Uniformity: 0.845	Result units: Volume
Specific Surface Area: 1.11 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 5.409 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 25.182 um	

d(0.1): 2.429 um d(0.5): 19.912 um d(0.9): 55.760 um



— Background com Ethanol - Nuno Moreira, terça-feira, 4 de Dezembro de 2007 10:39:46

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.70	11.482	3.39	120.226	0.08	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.79	13.183	3.77	138.038	0.00	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.90	15.136	4.20	158.489	0.00	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	1.02	17.378	4.67	181.970	0.00	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	1.15	19.953	5.13	208.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.03	2.188	1.28	22.909	5.53	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.14	2.512	1.42	26.303	5.79	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.21	2.884	1.55	30.200	5.88	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.28	3.311	1.69	34.674	5.73	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.33	3.802	1.82	39.811	5.33	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.38	4.365	1.96	45.709	4.71	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.42	5.012	2.10	52.481	3.92	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.46	5.754	2.26	60.256	3.05	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.49	6.607	2.42	69.183	2.18	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.53	7.586	2.60	79.433	1.41	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.57	8.710	2.82	91.201	0.79	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.63	10.000	3.08	104.713	0.38	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096		11.482		120.226		1258.925	0.00		

Operator notes:



MASTERSIZER



Result Analysis Report

Sample Name:
Background com Ethanol - Nuno Moreira

Sample Source & type:

Sample bulk lot ref:

SOP Name:

Measured by:
snunes

Result Source:
Measurement

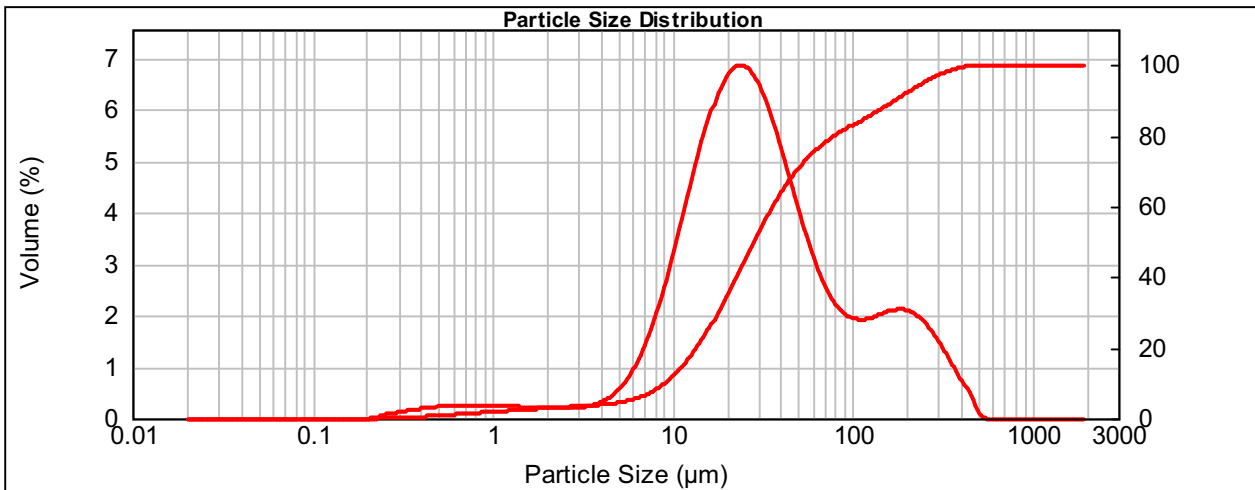
Measured:
terça-feira, 4 de Dezembro de 2007 11:20:47

Analysed:
terça-feira, 4 de Dezembro de 2007 11:20:48

Particle Name: Cement 1.0	Accessory Name: Hydro 2000S (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle RI: 1.680	Absorption: 1	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 15.34 %
Dispersant Name: Ethanol	Dispersant RI: 1.360	Weighted Residual: 0.137 %	Result Emulation: Off

Concentration: 0.0233 %Vol	Span : 5.758	Uniformity: 1.58	Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.539 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 11.126 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 60.169 um	

d(0.1): 9.165 um d(0.5): 28.235 um d(0.9): 171.731 um



— Background com Ethanol - Nuno Moreira, terça-feira, 4 de Dezembro de 2007 11:20:47

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.22	11.482	3.93	120.226	1.77	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.21	13.183	4.68	138.038	1.85	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.20	15.136	5.33	158.489	1.90	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.19	17.378	5.83	181.970	1.90	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.18	19.953	6.13	208.930	1.82	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.17	22.909	6.19	239.883	1.65	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.02	2.512	0.17	26.303	6.01	275.423	1.40	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.07	2.884	0.18	30.200	6.01	316.228	1.40	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.10	3.311	0.19	34.674	5.63	363.078	1.09	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.14	3.802	0.23	39.811	5.09	416.869	0.76	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.17	4.365	0.30	45.709	4.45	478.630	0.48	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.19	5.012	0.42	52.481	3.79	549.541	0.09	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.21	5.754	0.62	60.256	3.17	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.22	6.607	0.91	69.183	2.62	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.23	7.586	1.30	79.433	2.20	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.23	8.710	1.82	91.201	1.92	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.23	10.000	2.45	104.713	1.77	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.23	11.482	3.17	120.226	1.73	1258.925	0.00		

Operator notes:



MASTERSIZER



Result Analysis Report

Sample Name:
Background com Ethanol - Nuno Moreira

SOP Name:

Measured:
terça-feira, 4 de Dezembro de 2007 11:31:20

Sample Source & type:

Measured by:
snunes

Analysed:
terça-feira, 4 de Dezembro de 2007 11:31:21

Sample bulk lot ref:

Result Source:
Measurement

Particle Name:
Cement 1.0

Accessory Name:
Hydro 2000S (A)

Analysis model:
General purpose

Sensitivity:
Normal

Particle RI:
1.680

Absorption:
1

Size range:
0.020 to 2000.000 um

Obscuration:
18.36 %

Dispersant Name:
Ethanol

Dispersant RI:
1.360

Weighted Residual:
0.133 %

Result Emulation:
Off

Concentration:
0.1669 %Vol

Span :
2.453

Uniformity:
0.768

Result units:
Volume

Specific Surface Area:
0.0996 m²/g

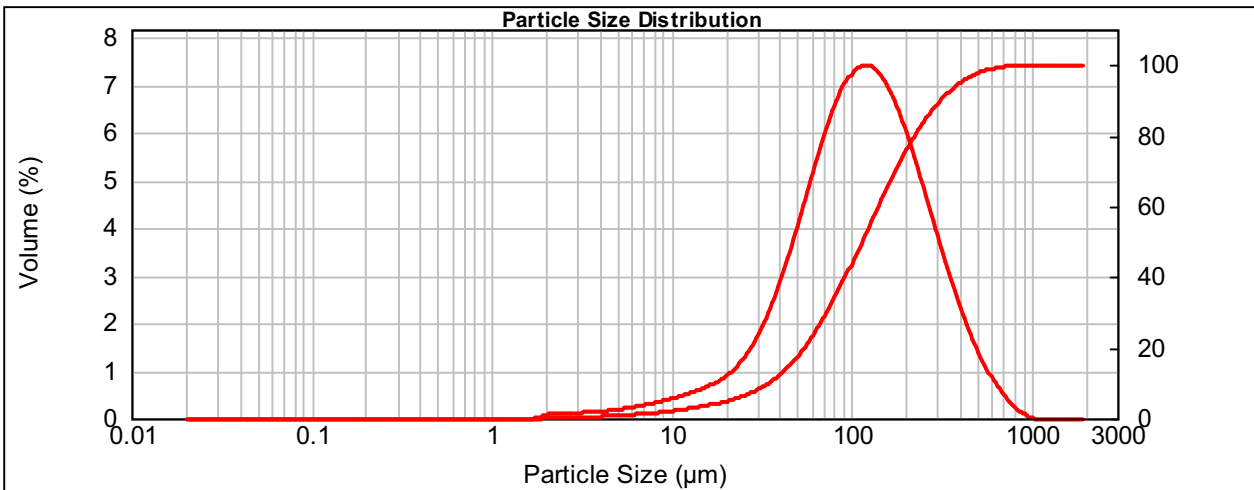
Surface Weighted Mean D[3,2]:
60.239 um

Vol. Weighted Mean D[4,3]:
150.346 um

d(0.1): 34.702 um

d(0.5): 113.942 um

d(0.9): 314.228 um



— Background com Ethanol - Nuno Moreira, terça-feira, 4 de Dezembro de 2007 11:31:20

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.00	11.482	0.46	120.226	6.67	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.00	13.183	0.53	138.038	6.46	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.00	15.136	0.61	158.489	6.08	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.00	17.378	0.73	181.970	5.56	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.00	19.953	0.88	208.930	4.94	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.07	22.909	1.10	239.883	4.27	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.08	26.303	1.40	275.423	3.58	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.10	30.200	1.79	316.228	2.91	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.11	34.674	2.28	363.078	2.29	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.12	39.811	2.86	416.869	1.73	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.14	45.709	3.52	478.630	1.24	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	0.16	52.481	4.21	549.541	0.83	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	0.18	60.256	4.91	630.957	0.51	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.00	6.607	0.21	69.183	5.56	724.436	0.25	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.00	7.586	0.25	79.433	6.10	831.764	0.10	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.00	8.710	0.30	91.201	6.49	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.00	10.000	0.35	104.713	6.68	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.00	11.482	0.40	120.226	6.68	1258.925	0.00		

Operator notes:



RESULTADOS DO AUTOCONTROLO
VALORES MÉDIOS

FÁBRICA: MACEIRA

BOLETIM Nº 12
DATA: 14.02.2007

REFERÊNCIA: Cimento * CEM I 42,5 R
Resultados Referentes a Dezembro

ENSAIOS MECÂNICOS [NP EN 196-1]

IDADE	RESISTÊNCIAS (MPa)			
	FLEXÃO		COMPRESSÃO	
	MENSAL	ANUAL	MENSAL	ANUAL
2 dias	5,7	6,0	28,6	30,5
7 dias	7,6	7,7	39,9	41,8
28 dias	8,9	8,8	51,6	52,7

ANÁLISE QUÍMICA

			MENSAL	ANUAL
PERDA AO FOGO	%	P.F.	3,18	2,85
RESÍDUO INSOLÚVEL	%	R.I.	1,08	1,12
ÓXIDO DE SILÍCIO	%	SiO ₂	20,40	20,41
ÓXIDO DE ALUMÍNIO	%	Al ₂ O ₃	4,08	4,74
ÓXIDO DE FERRO	%	Fe ₂ O ₃	3,12	3,08
ÓXIDO DE CÁLCIO	%	CaO	61,74	62,28
ÓXIDO DE MAGNÉSIO	%	MgO	2,12	1,90
SULFATOS	%	SO ₃	3,15	3,11
ÓXIDO DE POTÁSSIO	%	K ₂ O		
ÓXIDO DE SÓDIO	%	Na ₂ O		
CLORETOS	%	Cl ⁻	0,0090	0,0146
CAL LIVRE	%		1,01	1,01
N/D (não Doseados)	%			

ENSAIOS FÍSICOS

		MENSAL	ANUAL
Peso Específico (g/cm ³)		3,15	3,15
Resíduo de Peneiração (%)	90 µm	0,23	0,14
	63 µm		0,43
	45 µm	1,53	1,24
	32 µm		3,44
Superfície Específica de Blaine (cm ² /g) [NP EN 196-6]		4722	4481
Água na Pasta Normal (%) [NP EN 196-3]		30,0	30,5
Tempo de Presa (min) [NP EN 196-3]	Início	163	152
	Fim	224	209
Expansibilidade (mm) [NP EN 196-3]		1,38	1,24
Índice de Brancura (0 a 100)			30,60

OBSERVAÇÕES:

ANUAL - Valor médio dos últimos 12 meses.

NOTA: todos os parâmetros são determinados por métodos internos com excepção dos que indicam a [norma aplicada].

VISTO

APROVADO