U.PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

ESTUDO DA DURABILIDADE DE BETÃO ESTRUTURAL COM RESÍDUOS INDUSTRIAIS

GABRIEL BARROS DOS SANTOS

Relatório de Projecto submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM MATERIAIS E PROCESSOS DE CONSTRUÇÃO

Orientadora: Professora Doutora Maria Joana Álvares Ribeiro de Sousa Coutinho

JULHO 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.

Aos meus avós

Nenhuma mente que se abre para uma nova idéia voltará a ter o tamanho original.

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

O autor deseja expressar a sua gratidão a todas as pessoas e entidades que contribuíram directa ou indirectamente para a realização deste trabalho.

Um primeiro agradecimento a Universidade do Porto, em especial a Sra. Luísa Capitão e a Sra. Elisabeth Ribeiro, as quais foram indispensáveis durante o todo programa de intercâmbio ao abrigo do programa MOBILE.

O autor manifesta igualmente o seu agradecimento à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) em especial a Dra. Carla Rocha e sua equipe, responsáveis pelo intercâmbio nesta faculdade.

Deseja expressar um agradecimento especial à Professora Doutora Joana Sousa Coutinho pela oportunidade fornecida em desenvolver este projecto assim como o completo apoio durante toda sua execução e conclusão do trabalho.

Agradecimentos também a Professora Maria da Luz Garcia pela ajuda nas realizações de ensaios, principalmente no início do trabalho, e pela troca de experiências realizadas com os materiais escolhidos.

Um agradecimento a toda equipe do Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção (LEMC): a Patrícia, a Paula, ao Manuel e ao Fernando e a Eng.ª Paula responsável pelo Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural (LABEST).

Bem como a secção de Materiais e Processos de Construção em nome da D. Maria Teresa por todo o apoio fornecido durante o desenvolvimento do trabalho.

Um agradecimento especial aos meus amigos da FEUP pela amizade, pelos momentos de convívio e por toda a ajuda fornecida das mais diversas formas na realização deste projecto. Em especial ao Eng. Alvarim Almeida, Eng. Gustavo Oliveira, Eng.ª Lorena Cambuí, Eng. Nuno Ferreira e ao Eng. Ricardo Afonso.

Finalmente, mas não em último, todo agradecimento a minha família em especial aos meus tios Arino e Sara e ao meu primo Eduardo, os quais me acolheram com todo amor e carinho durante todo o período de intercâmbio nesta instituição.

RESUMO

Com o avanço das actividades industriais, a emissão de gases com o efeito de estufa provenientes de processos de fabrico, tais como o dióxido de carbono, cresceu vertiginosamente. A indústria cimenteira tem importância relevante neste facto por ser responsável por 5% das emissões antropogénicas de dióxido de carbono.

Uma contribuição importante para a sustentabilidade na indústria do betão e cimento consiste na utilização de adições pozolânicas provenientes de resíduos industriais para substituir parcialmente o clínquer Portland. O uso destas adições tem vindo a aumentar nos últimos anos, a nível mundial. Algumas com seu uso já regulamentado em muitos países. Desta forma, apresentam vantagens do ponto de vista de poupar energia e do ponto de vista económico, reduzindo a pressão sobre o meio ambiente.

O trabalho presente tem por objetivo avaliar o comportamento de resíduos da indústria papeleira, concretamente grits e dregs, como substituto parcial do cimento em argamassas com vista à aplicabilidade em betão.

Assim, este trabalho engloba ensaios realizados sobre as amostras de resíduos depois de moídos, tais como granulometria laser e microscopia electrónica. E ensaios em argamassas com substituição de 10% de cimento Portland por grits e por dregs. Com os provetes de argamassa foi possível realizar ensaios de resistência mecânica, e de avaliação da durabilidade através de ensaios como o índice de actividade, absorção de água por capilaridade, penetração acelerada por cloretos, resistividade eléctrica e carbonatação acelerada.

A análise dos resultados indicaram que os dregs provavelmente não terão aplicabilidade mas que os grits poderão ser utilizados como substituto parcial do cimento provavelmente em percentagens reduzidas, contribuindo assim para a sustentabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: resíduo, argamassa, durabilidade, grits, dregs.

ABSTRACT

With the advance of industry greenhouse gas emissions due production processes, especially carbon dioxide, have increased drastically. The cement industry is related to this fact as it is responsible for 5% of the global anthropogenic carbon dioxide emissions.

An important contribution to sustainability of concrete and cement industries consists of using pozollanic additions from industrial waste materials to partially replace Portland clinker. Worldwide, in recent years, the use of these additions has increased and some of these materials have been standardized in many countries. These additions present advantages in terms of energy savings and also in economic terms as well as reduction of pressure on the environment.

The present work aims at assessing behaviour of waste materials of the paper paste industry, namely dregs and grits, as partial cement replacement materials in mortar to ascertain applicability in concrete.

The work includes tests such as laser particle size distribution and electronic microscopy, on samples of the grits and dregs, previously ground. The work also comprises tests on mortars with 10% Portland cement replacement by dregs and by grits. The test specimens obtained were tested for strength and durability related properties such as activity Index, absorption by capillarity, chloride ion penetration, electric resistivity and accelerated carbonation.

Results obtained indicated that probably dregs cannot replace cement partially but g may be used in reduced percentages for partial cement replacement, therefore contributing to sustainability.

KEYWORDS: waste, mortar, durability, grits, dregs.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS i
RESUMO iii
ABSTRACT v

1. INTRODUÇÃO 1
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS 1
1.1.1. PRODUÇÃO EM LARGA ESCALA DO CIMENTO E CONSEQÜENTE PRODUÇÃO DE CO_2 1
1.1.2. PRODUÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS – INDÚSTRIA DE PAPEL 3
1.1.3. INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS NO BETÃO 4
1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO 5

2. ESTADO DA ARTE 7
2.1. INTRODUÇÃO 7
2.2. FABRICAÇÃO DE PAPEL 9
2.2.1. OBTENÇÃO DA PASTA DE PAPEL 10
2.2.2. PROCESSO DE DIGESTÃO DETALHADO 11
2.2.3. PROCESSO DE RECUPERAÇÃO DE QUÍMICOS 12
2.2.4. RESÍDUOS DO PROCESSO DE RECUPERAÇÃO DE QUÍMICOS 13
2.2.4.1. Dregs 13
2.2.4.2. Grits 14
2.3. ELEMENTOS NOCIVOS AO BETÃO 15
2.3.1. CLORETOS 15
2.3.2. SULFATOS 17
2.3.3. SÓDIO E POTÁSSIO 19
2.3.4. MAGNÉSIO 20
2.3.5. CRÓMIO 21

3. ENSAIOS 23
3.1. INTRODUÇÃO 23
3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS 23

3.2.1. INTRODUÇÃO 23
3.2.2. CIMENTO E ADJUVANTE 24
3.2.3. GRITS 26
3.2.4. DREGS 29
3.2.5. ELEMENTOS NOCIVOS AO BETÃO 31
3.3. ENSAIOS 32
3.3.1. INTRODUÇÃO E COMPOSIÇÃO DOS PROVETES 32
3.3.2. AVALIAÇÃO DA TRABALHABILIDADE 33
3.3.3. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE VARRIMENTO 34
3.3.4. RESISTÊNCIAS MECÂNICAS 38
3.3.5. DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE PRESA 41
3.3.6. EXPANSIBILIDADE 42
3.3.7. CARBONATAÇÃO ACELERADA 43
3.3.8. ÍNDICE DE ACTIVIDADE 45
3.3.9. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE 46
3.3.10. PENETRAÇÃO ACELERADA POR CLORETOS 49
3.3.11. RESISTIVIDADE ELÉCTRICA 50

4. CONCLUSÕES 53
4.1. INTRODUÇÃO 53
4.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS 54
4.2.1. CURVA GRANULOMÉTRICA 54
4.2.2. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA 57
4.2.3. RESISTÊNCIA MECÂNICA 60
4.2.4. CONSISTÊNCIA NORMAL E TEMPO DE PRESA 61
4.2.5. EXPANSIBILIDADE 61
4.2.6. CARBONATAÇÃO ACELERADA 62
4.2.7. ÍNDICE DE ACTIVIDADE 63
4.2.8. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE 63
4.2.9. RESISTÊNCIA ELÉCTRICA 64
4.2.10. PENETRAÇÃO ACELERADA POR CLORETOS 65
4.3. CONCLUSÕES FINAIS 66
4.4. TRABALHOS FUTUROS 68

BIBLIOGRAFIA 69

ANEXOS 75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Produção global de CO_2 [15]. 2

Figura 2. Aterro de resíduos sólidos da Portucel/Soporcel Unidade Cacia. 4

Figura 3. Produção mundial de celulose de eucalipto (em mil toneladas) (a) Números (b) Percentagens por país. (Fonte: Bracelpa / Pulp and Paper Products Council) 8

Figura 4. Resíduos sólidos produzidos na Unidade Mucuri da indústria Suzano – Papel e Celulose (Bahia - Brasil) 2005. 9

Figura 5. Processo químico geral de fabrico do papel [19]. 10

Figura 6. Digestor contínuo utilizado no cozimento de aparas [21]. 11

Figura 7. Ciclo simplificado da recuperação de químicos no processo *kraft* [22]. 12

Figura 8. (a) Filtro rotativo com pré-camada de lamas de cal para extracção dos dregs. (b) Extracção dos dregs (dregs e lamas de cal). (Fábrica Portucel Soporcel Unidade Cacia) 14

Figura 9. (a) Tubo de queda e contentor dos grits. (b) Grits recém saídos do tubo de queda. (Fábrica Portucel Soporcel Unidade Cacia) 15

Figura 10. (a) Volume relativo dos produtos de corrosão. (b) Esquema de fendilhação, destacamentos e delaminação do betão induzidos por corrosão [30]. 16

Figura 11. Peça em betão antes e depois de um ataque por sulfatos. 18

Figura 12. Deterioração no betão por reacção álcali-sílica [11]. 20

Figura 13. Granulómetro laser do LABEST. 24

Figura 14. Curva granulométrica do cimento utilizado (CEM I – 42,5R). 24

Figura 15. Imagens obtidas do cimento em pó no MEV. (a) Ampliação de 200 vezes. (b) Ampliação de 1500 vezes. 25

Figura 16. Análise química elementar do cimento em pó realizada pelo MEV. 25

Figura 17. Grits: (a) Grits obtidos do processo de tratamento do licor. (Fábrica SOPORCEL PORTUCEL Cacia); (b) Grits, secos e moídos, utilizados nos provetes. 26

Figura 18. Moinho de bolas cerâmicas (a) equipamento; (b) Interior do moinho de bolas após moagem dos grits. 27

Figura 19. Curva granulométrica dos grits após moagem de 24 horas no moinho de bolas. 27

Figura 20. Imagens obtidas dos grits em pó no MEV. (a) Ampliação de 200 vezes. (b) Ampliação de 1500 vezes. 28

Figura 21. Análise química elementar realizada pelo MEV dos grits. (a) Grãos maiores (b) Grãos menores. 28

Figura 22. Dregs (a) Recém-chegados da PORTUCEL SOPORCEL; (b) Após moagem. 29

Figura 23. Análise granulométrica dos dregs após moagem no moinho de bolas por 24 horas. 30

Figura 24. Imagens obtidas dos dregs em pó no MEV. (a) Ampliação de 200 vezes. (b) Ampliação de 1500 vezes. 30

Figura 25. Análise química elementar dos dregs realizada pelo MEV. 31

Figura 26. (a) Suporte metálico com amostras das argamassas a serem analisadas no MEV (aproximadamente 2cm de diâmetro). (b) Microscópio electrónico de varrimento (MEV) – CEMUP… 34

Figura 27. Imagens obtidas da argamassa de controlo no MEV. (a) Ampliação de 35 vezes. (b) Ampliação de 3500 vezes 35

Figura 28. Análise química elementar da argamassa de controlo realizada pelo MEV. 35

Figura 29. Análise química obtida por MEV das agulhas detectadas na Figura 27b. 36

Figura 30. Imagens obtidas da argamassa de grits no MEV. (a) Ampliação de 35 vezes. (b) Ampliação de 3500 vezes. 36

Figura 31. Análise química elementar da argamassa de grits realizada pelo MEV. 36

Figura 32. Imagens obtidas da argamassa de dregs no MEV. (a) Ampliação de 35 vezes. (b) Ampliação de 3500 vezes. 37

Figura 33. Análise química elementar da argamassa de dregs realizada pelo MEV. 37

Figura 34. Análise química elementar nas placas da figura 14b realizada pelo MEV. 38

Figura 35. Equipamento de ensaio de resistência mecânica do LAB1. (a) Ensaio a flexão NP EN 196-1; (b) Ensaio a compressão NP EN 196-1. 38

Figura 36. Equipamento de ensaio de resistência mecânica do LAB2. (a) Ensaio a flexão NP EN 196-1; (b) Ensaio a compressão NP EN 196-1. 39

Figura 37. Curvas do ensaio de resistência a flexão aos 60 dias referente ao primeiro dos três provetes ensaiados. (LAB1) 40

Figura 38. Curvas do ensaio de resistência a compressão aos 60 dias referente ao primeiro dos três provetes ensaiados. (LAB1) 40

Figura 39. Ensaio de expansibilidade. 43

Figura 40. Câmara de carbonatação acelerada (LABEST – FEUP). 44

Figura 41. Provetes de carbonatação pulverizados com fenolftaleína. 45

Figura 42. Ensaio de absorção por capilaridade. 47

Figura 43. Curvas de absorção capilar. 48

Figura 44. Ensaio de penetração acelerada por cloretos. (a) Câmara de vácuo; (b) Equipamento para o ensaio de migração em regime não estacionário. 49

Figura 45. Tratamento dos GRT_2 (a) Máquina de Los Angeles utilizada na moagem dos GRT_2. (b) Sistema de peneiros utilizados na separação dos GRT_2 (material passado no peneiro 250μm). 53

Figura 46. Curva granulométrica dos diferentes materiais: CEM I – cimento, DRG – dregs e GRT – grits, os três materiais utilizados no presente trabalho e mais CEM I_2 e GRT_2.. 55

Figura 47. Análise comparativa entre os grãos do CEM I, GRT e DRG ampliados 200 vezes. (a) CEM I (b) GRT (c) DRG 57

Figura 48. Análise comparativa entre as argamassas compostas por CEM I, GRT e DRG ampliados 3500 vezes. (a) CEM I (b) GRT (c) DRG 58

Figura 49. Análise comparativa entre as análises químicas globais das amostras de argamassas compostas por CEM I, GRT e DRG ampliados 35 vezes. (a) CEM I (b) GRT (c) DRG 59

Figura 50. Desenvolvimento típico dos produtos de hidratação em pasta de cimento Portland [10]... 60

Figura 51. Análise dos tempos de presa. (a) Valores de tempo de presa obtidos. (b) Valores mínimos de tempo de início de presa definidos pela norma NP EN 197-1. 61

Figura 52. Avaliação da expansibilidade. (a) Valores de expansibilidade obtidos em ensaios para as amostras referidas. (b) Limites para expansibilidade (extraído e adaptado da norma NP EN 197-1 – 7.1.2. Quadro 2). 62

Figura 53. Índice de actividades exigidos para diversas adições [Adaptado 10]. 63

Figura 54. Desempenho de algumas propriedades das argamassas com grits e dregs relativamente à argamassa de controlo e também o desempenho dos grits (GRT_2) no estudo anterior [3]. 67

Figura 55. Análise final dos índices de actividade$_{(10\%)}$ para as diferentes amostras. 67

ÍNDICE DE QUADROS (OU TABELAS)

Quadro 1. Produção de resíduos sólidos da Unidade Mucuri (Suzano Papel e Celulose) [4]. 9

Quadro 2. Classes de teor de cloretos no betão em função da classe de exposição ambiental. (Extraído da NP EN 206-1 – Anexo Nacional DNA 5.2.7 Quadro 2). 17

Quadro 3. Classes de exposição definidas para estruturas de acordo com o ambiente em que se encontram. (Extraído da NP EN 206-1 - Secção 4.2.1 Quadro 1). 17

Quadro 4. Teor de sulfatos limite (extraído e adaptado da NP EN 197-1 – Quadro 8). 19

Quadro 5. Análise de potenciais elementos nocivos introduzidos através dos grits e dregs [3]. 31

Quadro 6. Quantidade dos materiais utilizados na produção dos provetes de argamassa [3]. 32

Quadro 7. Traço em peso (em função da massa do ligante). 32

Quadro 8. Resultado da avaliação da trabalhabilidade (em milímetros). 34

Quadro 9. Resistências Mecânicas aos 7 dias, 28 dias, 60 dias e 90 dias (em MPa). 41

Quadro 10. Resultado do ensaio de determinação dos tempos de presa. 42

Quadro 11. Leituras e resultados do ensaio de expansibilidade. 43

Quadro 12. Resultados do ensaio de carbonatação acelerada. 45

Quadro 13. Resistências mecânicas aos 28 dias com aceleração das reações – Ensaio do índice de actividade. 46

Quadro 14. Rectas e coeficientes de absorção. 48

Quadro 15. Resultado do ensaio de penetração acelerada por cloretos – Coeficientes de difusão. ... 50

Quadro 16. Resistividade das argamassas. 51

Quadro 17. Comparação entre finuras dos materiais. 56

Quadro 18. Superfície específica (granulometria laser) dos materiais analisados. 56

Quadro 19. Comparação das resistências a compressão. 60

Quadro 20. Análise dos resultados do ensaio de carbonatação. 62

Quadro 21. Resultados do ensaio de índice de actividade. 63

Quadro 22. Análise do ensaio de absorção de água por capilaridade. 63

Quadro 23. Análise das resistividades eléctricas. 64

Quadro 24. Análise dos Coeficientes de difusão médios. 65

Quadro 25. Análise final do desempenho de cada material (incluindo GRT_2 de [3]). 66

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

LABEST – Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural

CEMUP – Centro de Materiais da Universidade do Porto

MEV – Microscópio Electrónico de Varrimento

GRT – Grits (moídos por 24 horas num moinho de bolas).

GRT_2 – Grits (moídos até 2000 rotações na máquina de Los Angeles e depois peneirado).

DRG – Dregs

CTL – Controlo

R 90d – Ensaio de resistência mecânica aos 90 dias (não realizado até a data de entrega do trabalho)

R 60d – Ensaio de resistência mecânica aos 60 dias

R 28d – Ensaio de resistência mecânica aos 28 dias

R 7d – Ensaio de resistência mecânica aos 7 dias

1
INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O betão é um material constituído por uma mistura proporcionada de agregado grosso, areia, água, um ligante hidráulico e eventualmente adjuvante. A reação da água com o ligante gera um efeito de endurecimento da massa, conferindo à mistura uma coesão e resistência que lhe permitem o uso como material de construção.

O uso do betão começou a ter um emprego mais amplo após a invenção do cimento Portland por Louis Vicat, devido à sua hidraulicidade e à rapidez com que endurecia.

O impulso decisivo para a expansão do betão foi a invenção que Joseph Monier, o jardineiro do palácio de Versailles, patenteou quando substituiu as caixas de madeira que continham laranjeiras por caixas de cimento armado. Desde então, este material foi constantemente estudado em aplicações ligadas a construção [12]. Atualmente, o betão é o segundo material mais consumido do planeta a seguir à água.

1.1.1. PRODUÇÃO EM LARGA ESCALA DO CIMENTO E CONSEQÜENTE PRODUÇÃO DE CO_2

Com o avanço da actividade industrial, a emissão de gases poluentes para a atmosfera vindo de processos de fabrico de materiais cresceu vertiginosamente. A indústria cimenteira produz, actualmente, cerca de 5% das emissões antropogénicas de CO_2 a nível global (Figura 1) [15]. Em números, com uma produção global anual de 30 gigatoneladas, a indústria do cimento é responsável por 1,5 bilião de toneladas anuais de CO_2. Das quais metade é intrínseca ao processo químico de produção (decomposição do carbonato de cálcio quando queimado a 850°C formando óxido de cálcio e liberando CO_2) [10], 40% é proveniente dos combustíveis utilizados e os restantes 10%, emitidos de forma indirecta, resultam da utilização de energia eléctrica e transportes [15].

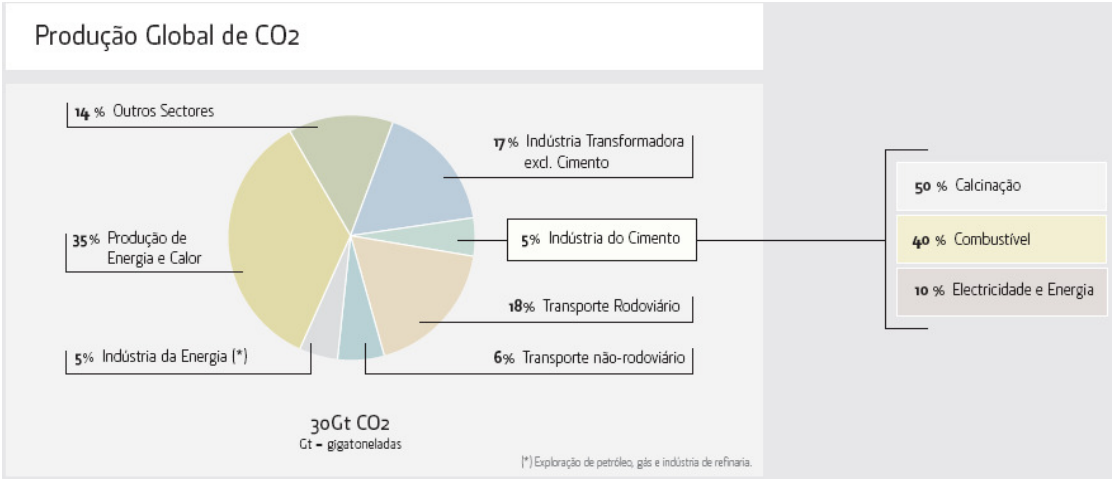


Figura 1. Produção global de CO_2 [15].

Uma das características da atmosfera terrestre é o aprisionamento de calor proveniente do sol através do processo de radiação, mecanismo conhecido por efeito estufa terrestre, e que tem sua origem na própria dinâmica natural do planeta. O fenômeno que hoje tanto desperta preocupação da sociedade é a intensificação do aquecimento da baixa atmosfera, particularmente da troposfera. Mesmo tendo origem natural, o aquecimento observado na contemporaneidade, tratado no âmbito das discussões da mudanças globais, parece estar directamente vinculado às actividades humanas [14].

Os debates mais recentes sobre a questão do aquecimento global são concordantes, de maneira geral, na tese de que a intensificação do efeito estufa planetário estaria directamente relacionada ao padrão de produção e consumo da sociedade moderna. A elevação do volume de gases de aquecimento derivados em sua quase totalidade das actividades humanas (indústria e agricultura, principalmente) estaria provocando uma considerável transformação da composição atmosférica [14]. Um destes gases é o dióxido de carbono.

Como conseqüência, procura-se a redução da emissão de dióxido de carbono dos processos industriais. Em particular, na indústria do cimento, através de medidas como [15]:

- Aumento da eficiência energética do processo de produção de clínquer – função da tecnologia utilizada no processo;
- Substituição de combustíveis com factores de emissão de dióxido de carbono elevados, por outros com factores de emissão mais reduzidos;
- Aumento da percentagem de utilização de matérias-primas alternativas, total ou parcialmente descarbonatadas;
- Redução da quantidade de clínquer no fabrico de cimento.

O clínquer, como citado por último, pode ser substituído por adições de outros materiais, para a produção de variados tipos de cimento. Neste caso ocorre uma redução na relação clínquer/cimento, que por conseqüência provoca a diminuição da quantidade necessária de combustível para a produção de uma tonelada de cimento e a redução da quantidade de matéria-prima virgem por tonelada de cimento produzido.

1.1.2. PRODUÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS – INDÚSTRIA DE PAPEL

Com o avanço da actividade industrial e melhoria dos padrões de vida, a quantidade de resíduos gerados pela sociedade tem aumentado continuamente. O tratamento e eliminação destes resíduos é um grave problema social [13]. Embora grandes quantidades de resíduos industriais, tais como escória de alto-forno, cinzas volantes, sílica de fumo e cinza de casca de arroz há muitos anos tem sido utilizados como componentes da mistura na indústria cimentícia, existem muitos outros resíduos industriais ainda não utilizados. Resíduos estes não só com a possibilidade de substituição da matéria-prima como também do combustível.

Devido a escassez de terrenos para aterros bem como seus custos, a complexidade e os elevados custos de tratamento e eliminação dos resíduos, é necessária muita investigação para encontrar usos para estes diferentes materiais. A indústria de cimento tem feito grandes esforços para continuamente desenvolver e acumular a tecnologia para a conservação de recursos e energia. Com base nas realizações positivas, esta indústria, diversificando a utilização dos resíduos, é capaz de desempenhar um papel de pólo industrial para as preocupações ambientais [13].

A indústria de pasta e papel é um sector de importância estratégica para Portugal sendo o quarto ramo exportador líquido na economia nacional, ou seja, as exportações do sector são mais elevadas do que as importações. Contribuindo assim positivamente para a Balança de Pagamentos [18].

No ciclo produtivo do papel, a busca pela valorização dos resíduos sólidos decorrentes do processo de fabrico da pasta[1] é constante já que são gerados subprodutos em grandes quantidades provindos de diversas fases do ciclo de produção. Os resíduos gerados são lamas inorgânicas (dregs e lamas de cal) a partir do processo de recuperação química; cascas e resíduos da manipulação da madeira; lamas vindas do processo de tratamento de efluentes (materiais inorgânicos, fibras e lamas biológicas); poeiras de caldeiras e fornos; resíduos (principalmente areia) da manipulação da madeira e cinzas outros materiais. Muitas das substâncias orgânicas, que poderiam ser considerados resíduos do processo, são queimadas para a recuperação de energia. Isto normalmente inclui a casca e resíduos da madeira e ainda pode incluir a água do tratamento das lamas [21].

Uma considerável percentagem dos resíduos da produção da pasta de papel tem como destino final a deposição em aterro (Figura 2) devido à falta de disponibilidade de uso economicamente atractivas. Os aterros são indesejáveis não só porque provocam enormes encargos financeiros para os produtores do subproduto [29] como podem conter substâncias contaminantes e por em perigo o solo, os aqüíferos e a qualidade do ar circundante.

[1] Pasta (ou celulose): Produto resultante do processo de cozimento e branqueamento de pedaços de madeira. Matéria-prima para produção do papel [16].



Figura 2. Aterro de resíduos sólidos da Portucel/Soporcel Unidade Cacia.

1.1.3. INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS NO BETÃO

O processo de produção do cimento permite a incorporação de certos tipos de resíduos e subprodutos inorgânicos nas etapas de:

- Preparação de matérias-primas para a obtenção do cru (ou farinha);
- Moagem do cimento.

Para que um material possa ser utilizado na preparação da matéria-prima deve ser constituído essencialmente pelos óxidos metálicos que compõem o clínquer (CaO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3), não deve incorporar substâncias que prejudiquem o processo, não deve afectar negativamente nem o desempenho ambiental da instalação fabril, nem as características do cimento [22].

Para que um material possa ser utilizado como componente na moagem do cimento deve ter características que melhorem as propriedades do cimento, tais como a trabalhabilidade, retenção de água, resistência a sulfatos e resistência ao gelo/degelo [22].

Contudo, o factor econômico acaba por determinar se o potencial benéfico do resíduo poderá ser utilizado como ingrediente do betão. Estes factores econômicos podem ser diferentes de um país para outro, em particular entre países desenvolvidos e países em desenvolvimento. Podem variar também entre regiões de um determinado país, e geralmente são influenciados pelo custo de eliminação de resíduos, pelo custo de transporte destes resíduos para o local de fabricação do produto final e pela actual regulamentação ambiental [28].

O presente trabalho busca a valorização de dois resíduos vindos do processo de produção da pasta de papel como substitutos parciais do cimento: os grits e os dregs. Ambos são considerados resíduos do processo de caustificação [27] sendo que estudos da sua utilização como substituinte parcial do cimento estão ainda numa fase inicial.

1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi estruturado em quatro capítulos, do seguinte modo:

O capítulo inicial (Capítulo 1 – Introdução) apresenta considerações sobre a história do betão e a atual preocupação com a emissão de dióxido de carbono na produção de seu, até hoje, componente principal – o cimento. Paralelamente, tece-se considerações a respeito dos resíduos industriais, com enfoque na indústria de pasta utilizada no fabrico do papel. São também apresentadas justificações para o uso de resíduos industriais como substituições parciais do cimento.

O capítulo seguinte (Capítulo 2 – "Estado da Arte") apresenta o conhecimento de onde se partiu para a realização do programa experimental utilizando os resíduos da indústria de papel. Descreve-se o processo de fabrico da pasta de celulose e o processo onde se originam os resíduos utilizados. São expostos também, os elementos nocivos a incorporação no betão.

O capítulo posterior (Capítulo 3 – Ensaios) descreve com pormenores o programa experimental levado a cabo nos laboratórios do Departamento de Engenharia Civil da FEUP. Dos ensaios realizados incluem ensaios de resistência mecânica (aos 7 dias, 28 dias, 60 dias e com cura acelerada), ensaio de penetração acelerada por cloretos, absorção de água por capilaridade, carbonatação acelerada e resistividade eléctrica incluindo também determinação do tempo de presa, expansibilidade e avaliação da trabalhabilidade das argamassas utilizadas.

O trabalho é finalizado (Capítulo 4 – Conclusões) com a apresentação dos resultados obtidos dos ensaios, sua interpretação e sugestões para futuras pesquisas na área focada no trabalho.

2
ESTADO DA ARTE

2.1. INTRODUÇÃO

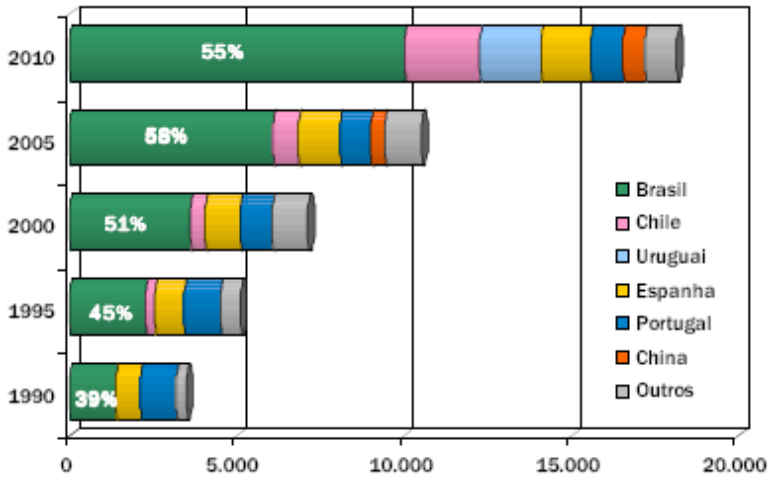
A indústria de pasta e papel é um sector de importância estratégica para diversos países. Esta indústria é caracterizada pelo alto grau de investimento. A escala de produção das fábricas de pastas celulósicas é, em geral, muito elevada. As empresas costumam integrar todas as etapas do processo produtivo, actuando desde a exploração florestal até a comercialização de celulose ou de papel. A localização das fábricas está ligada à concentração dos activos florestais das empresas [17].

No final da década de 90 eram comercializados quase US$ 90 biliões em produtos de papel e celulose no mundo. Em 2000, 69% da celulose produzida no mundo tinha como origem os países da Europa e América do Norte. Um pouco mais de 56% da celulose comercializada no mundo são pastas celulósicas de fibra longas, derivadas de coníferas. A celulose branqueada fibra curta, derivada de eucalipto, representa cerca de 18%. A comercialização da celulose de fibra curta é a que tem crescido mais rapidamente [17].

O sector da pasta e do papel, em Portugal, contribui fortemente para o crescimento da economia portuguesa, uma vez que é o quarto ramo exportador líquido na economia nacional. Desde 1997 a produção de pasta aumentou 15%, sendo que a matéria-prima do sector advém do eucalipto e do pinho [18]. A Figura 3 apresenta a produção mundial de celulose de eucalipto onde Portugal tem considerável participação.

1.000 t	1990	1995	2000	2005	2010
Brasil	1.380	2.280	3.615	6.090	10.010
Chile	0	270	450	760	2.265
Uruguai	0	0	0	0	1.825
Espanha	735	895	1.040	1.235	1.490
Portugal	1.075	1.075	975	925	975
China	0	0	0	415	635
Outros	305	600	1.050	1.100	950
Total	**3.495**	**5.120**	**7.130**	**10.525**	**18.150**

(a)



(b)

Figura 3. Produção mundial de celulose de eucalipto (em mil toneladas) (a) Números (b) Percentagens por país. (Fonte: Bracelpa / Pulp and Paper Products Council)

A indústria de celulose, à semelhança de outros processos industriais, gera materiais indesejáveis, materiais estes que não são possíveis de incorporar no produto final.

A maior parte das indústrias possui aterros controlados para a deposição destes resíduos (Figura 2), bem como mecanismos para a sua separação por tipos, o que permite o tratamento, reciclagem, reutilização ou valorização energética de parte dos resíduos produzidos [3].

A procura da valorização dos resíduos da indústria de celulose (principalmente os grits, os dregs e as lamas de cal) tem conduzido pesquisas para a utilização como:

- Matéria-prima de produtos mineralizadores do solo e, também, com a função de neutralizar solos ácidos, graças ao pH dos materiais envolvidos – grits pH = 12 e dregs pH = 10,7 [1];
- Material que visa controle de tonalidade do betão [1];
- Material de pavimentação substituindo a argila [4];
- Insumo agrícola no plantio de eucalipto [4].

O gráfico apresentado na Figura 4 mostra a percentagem correspondente de resíduos sólidos produzidos na Unidade Mucuri do Grupo Suzano Papel e Celulose (Bahia - Brasil) baseado em dados em metros cúbicos por ano.

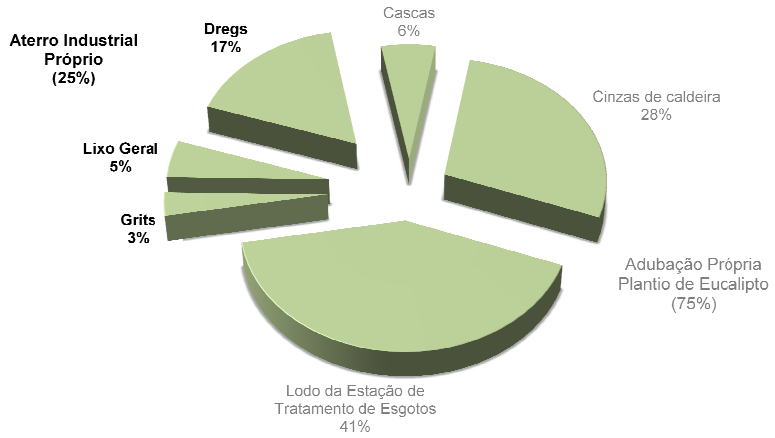


Figura 4. Resíduos sólidos produzidos na Unidade Mucuri da indústria Suzano – Papel e Celulose (Bahia - Brasil) 2005.

As cinzas da caldeira, o lodo da estação de tratamento de esgoto e as cascas são utilizados na adubagem da plantação de eucaliptos enquanto que o restante, correspondente aos dregs, grits e ao lixo geral, são aterrados. O material aterrado corresponde, nesta unidade fabril, a aproximadamente 30 mil metros cúbicos por ano como mostra o Quadro 1.

Quadro 1. Produção de resíduos sólidos da Unidade Mucuri (Suzano Papel e Celulose) [4].

Resíduos	***Unidade Mucuri***	
	m³/ano	Destino
Lixo geral	5 790	Aterro industrial próprio (29 408 m³/ano)
Dregs	20 020	
Grits	3 598	
Cinzas de caldeira	33 024	Adubação Própria Plantio de Eucalipto (88 820 m³/ano)
Cascas	6 696	
Lodo da ETE[2]	49 100	

2.2. FABRICAÇÃO DE PAPEL

O princípio do fabrico do papel baseia-se na tendência das fibras celulósicas se unirem e assim permanecerem após secas. O papel consiste numa folha, seca e acabada, formada por uma suspensão de fibras vegetais, as quais foram desintegradas, refinadas e depuradas tendo tido ou não a adição de outros ingredientes, para dar ao produto final, características de utilização [19].

Para fazer papel, as fibras da madeira devem ser separadas umas das outras por um dos diversos processos de obtenção da polpa. A separação pode ser alcançada mecanicamente através de moagens

[2] ETE: Estação de Tratamento de Esgoto.

ou quimicamente através da dissolução da lenhina[3]. Nos processos mecânico-químico e semi-químico, é empregada a combinação dos dois processos [20].

2.2.1 Obtenção da Pasta de Papel

A obtenção de polpa (ou pasta de papel) por processos mecânicos, é menos onerosa na execução mas conduz a um produto de melhor qualidade em termos de resistência e brilho. O processo químico, o qual é descrito a seguir, remove mais lenhina e apresenta um maior rendimento na extração de fibras de madeira, as quais podem ser convertidas em diversos produtos desde lenços de papel até papel para revista [20].

O presente trabalho centrar-se-á na polpa obtida através do processo químico, o que além de ser responsável por dois terços da polpa proveniente de fibras da madeira [19], é na fase de recuperação química realizada neste processo que surgem os resíduos utilizados no estudo.

O processo químico mais amplamente utilizado no fabrico de papel é o processo *kraft*. Foi inventado em 1889 e nos anos 30 do século XX, este processo foi reforçado com a recuperação química. Por causa da produção de um papel com maior resistência dos que os produzidos anteriormente, utilizou-se o nome de *kraft*, em alemão "*forte*".

Este processo, num esquema simplificado, é apresentado na Figura 5.

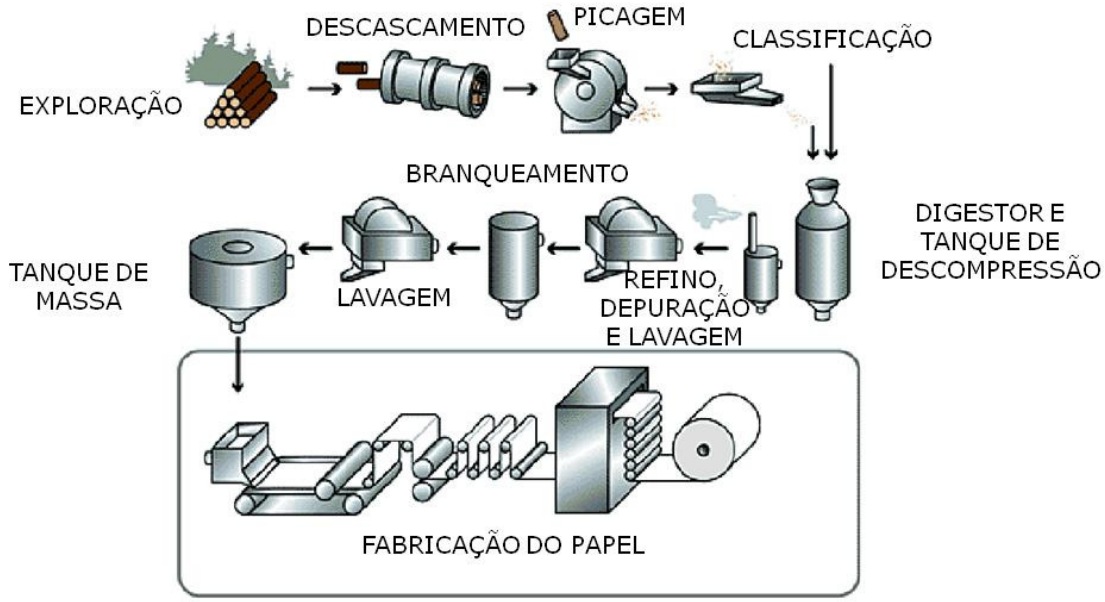


Figura 5. Processo químico geral de fabrico do papel [19].

As fábricas recebem camiões com toras, por vezes de eucalipto, cortadas com aproximadamente 2 metros de comprimento. Estas toras são descascadas (pois as cascas das árvores não têm qualquer aproveitamento para a produção do papel) e picadas, transformando-as em aparas.

[3] Lenhina: Juntamente com a celulose, são os principais constituintes do tecido lenhoso. Este material encontra-se entre as células da madeira, unindo-as fortemente [35].

Estas aparas possuem dimensões controladas que permitem a penetração dos produtos químicos durante o cozimento no digestor. No digestor, é removida a maior parte de lenhina produzindo uma polpa castanha (celulose escura).

Após isto, é realizado o branqueamento para a destruição dos pigmentos da madeira, a lavagem, secagem e a armazenagem em tanques de abastecimento da massa resultante para alimentação das máquinas de produção de papel.

Na produção do papel, a massa vinda do processo anterior é, então, seca e prensada para a máxima remoção do seu alto conteúdo de água. Esta função é exercida por diversos cilindros enormes geralmente aquecidos com vapor. No final, o papel é enrolado em enormes rolos que seguem para a secção de acabamento.

No acabamento, o papel é cortado no tamanho apropriado e empacotado para transporte da fábrica até o cliente [Adaptado: 19,3].

2.2.2 Processo de Digestão Detalhado

Com maior atenção, volta-se a referir o processo de digestão (cozimento das aparas), pois é daqui que surgirá o licor negro, que posteriormente será tratado no processo de recuperação de químicos, onde aparecerão os resíduos utilizados.

O processo de digestão é realizado em digestores contínuos ou descontínuos. Um digestor contínuo (Figura 6), actualmente mais utilizado, é constituído por um tubo cilíndrico de grande altura (aproximadamente 70 metros) onde as aparas e a solução de cozimento (licor branco) são alimentadas no topo, a uma taxa constante. Durante a descida, as aparas são impregnadas, cozidas e finalmente lavadas em contra-corrente até serem descarregadas pelo fundo. No final do cozimento as aparas cozidas são descarregadas do digestor sob pressão.

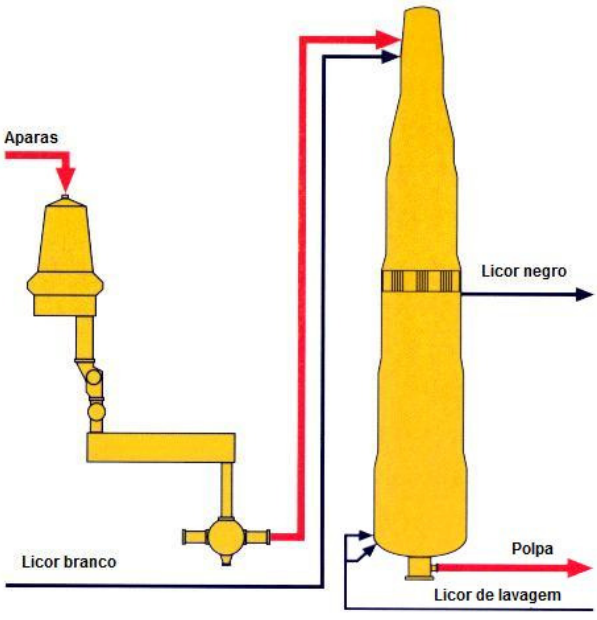


Figura 6. Digestor contínuo utilizado no cozimento de aparas [21].

O licor branco é a solução química que provoca o cozimento das aparas, essencialmente constituído por hidróxido de sódio e sulfureto de sódio, numa relação mássica de aproximadamente 5/2, respectivamente. O licor que serviu para o cozimento e que adquire uma cor negra, devido aos constituintes da madeira degradados e dissolvidos (designado por licor negro), é formado por água, compostos químicos inorgânicos usados no cozimento que interessa recuperar, e ainda por compostos orgânicos retirados da madeira que, por serem combustíveis, podem ser utilizados na produção de vapor e energia [21].

Resíduos sólidos são obtidos de diversas partes do processo descrito [23]. Foca-se em seguida o processo de recuperação de químicos por tratamento químico do licor negro que gera os resíduos sólidos utilizados neste estudo.

2.2.3 Processo de Recuperação de Químicos

Uma característica importante do processo *kraft* atual é o aproveitamento energético e material, efectuado no circuito de recuperação de químicos e energia. Este sistema de recuperação tem três funções [21]:

- Valorização dos produtos químicos inorgânicos da polpa;
- Destruição do material orgânico dissolvido e da recuperação do conteúdo energético através da obtenção de vapor e energia eléctrica;
- Recuperação de subprodutos orgânicos com valor.

O valor em combustível correspondente ao licor negro recuperável é, em geral, suficiente para que as fábricas de polpa sejam mais do que auto-suficientes em termos de energia eléctrica e aquecimento [21]. O processo de recuperação, esquematicamente apresentado na Figura 7, é descrito em seguida.

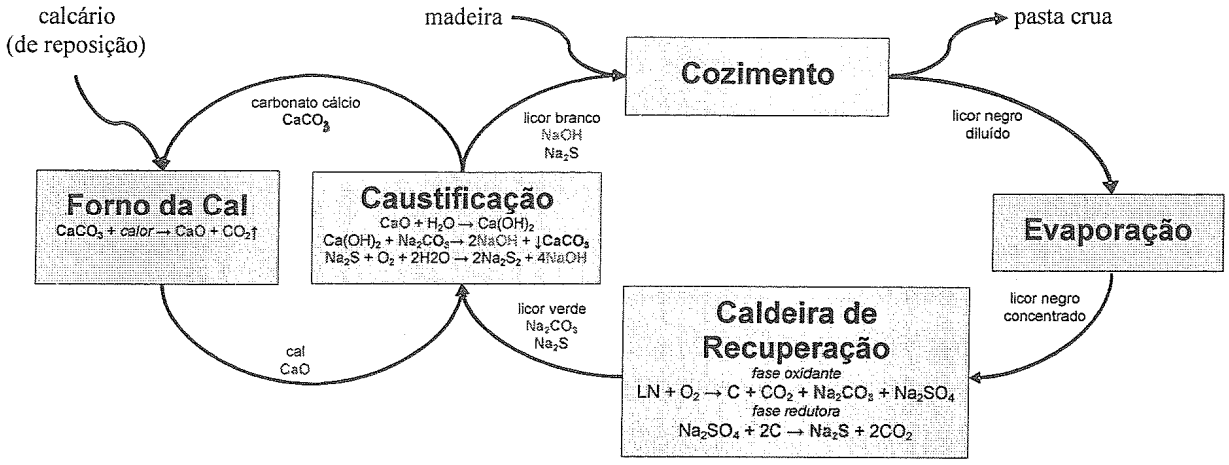


Figura 7. Ciclo simplificado da recuperação de químicos no processo *kraft* [22].

Após o cozimento, o licor negro encontra-se diluído, apresentando um teor de sólidos dissolvidos cerca de 14% a 18%, o qual deve ser aumentado antes da sua queima. Para isto, o licor passa por um processo de evaporação que provoca alguns efeitos: no fim deste processo, o licor acaba por apresentar um teor de sólidos secos em torno de 65% a 75% mas isto aumenta a sua viscosidade podendo tornar-se demasiado elevada para a sua bombagem. Dois princípios são utilizados para ultrapassar este

problema: Reduza-se a viscosidade ou altera-se a reologia do licor através de um processo de despolimerização.

O licor negro concentrado é queimado na caldeira de recuperação para recuperar o sódio e enxofre – elementos estes necessários para regenerar a polpa com produtos químicos e ainda recuperar a energia dos gases de combustão.

Após a combustão do licor negro, uma fracção inorgânica resultante deste processo acumula se no fundo da caldeira. Esta mistura é constituída de produtos químicos em fusão é conhecida por *smelt*. O *smelt* é dissolvido em água ou licor branco fraco (licor branco diluído) dando origem ao licor verde, que consiste principalmente em sulfureto de sódio e carbonato de sódio. Impurezas inorgânicas neste ciclo são separadas, tais como os dregs e grits, sendo eliminados como resíduos sólidos.

A etapa seguinte é chamada de caustificação. Tem este nome porque é adicionado óxido de cálcio para converter o carbonato de sódio em hidróxido de sódio (soda cáustica). O licor verde é convertido em licor branco, com isto completando o ciclo de recuperação. Resultante deste processo, a lama de cal[4] é removida, lavada e calcinada num forno de cal rotativo para regenerar a cal. Esta cal é utilizada novamente para a caustificação [Adaptado 20, 21, 22].

2.2.4 Resíduos do Processo de Recuperação de Químicos

O processo de obtenção da pasta utilizando a madeira como matéria-prima, gera uma grande variedade de resíduos sólidos. Os mais importantes e significantes a nível quantitativo e de impacto ambiental são: resíduos de peneiração, resíduos fibrosos do processo de obtenção da polpa, lama de cal, grits, dregs, resíduos do tratamento da água e outros [23].

2.2.4.1. Dregs

Os dregs, designados por lamas de licor verde, são resíduos gerados na recuperação química do licor negro, mais precisamente na sua clarificação [24]. É o material sólido removido no processo de clarificação do licor verde, antes da caustificação.

São constituídos por impurezas tais como partículas de combustão incompleta [24] e sais sólidos cujos iões são óxidos, carbonatos e sulfuretos de elementos (como ferro, sílica, cálcio, alumínio e magnésio) que entram no processo de fabrico com a matéria-prima (madeira), água e produtos químicos [22].

Os dregs são bastante prejudiciais para a eficiência do processo de recuperação química, por isso é necessária a sua separação do licor por sedimentação num clarificador de licor verde.

Estes resíduos, depois de retirados do tanque de clarificação do licor verde, são adensados e filtrados e, em seguida descarregados para o exterior, sendo finalmente depositados em aterros [6].

Na filtragem deste material, um dos sistemas utilizados é o filtro com pré-camada de lamas de cal.

[4] A lama de cal é o carbonato de cálcio precipitado no processo de caustificação.



(a)



(b)

Figura 8. (a) Filtro rotativo com pré-camada de lamas de cal para extracção dos dregs. (b) Extracção dos dregs (dregs e lamas de cal). (Fábrica Portucel Soporcel Unidade Cacia)

Os dregs têm más propriedades filtrantes, por isto usa-se uma pré-camada de lamas de cal no filtro rotativo. Durante o funcionamento deste filtro, parte desta camada vai também sendo raspada a fim de se garantir uma renovação da superfície filtrante (Figura 8a) O filtro de dregs dispõe de um dispositivo automático de aviso da proximidade da lâmina de raspar. Os dregs, então, são descarregados para um contentor (Figura 8b) [25].

2.2.4.2. Grits

Os grits consistem em materiais não-reactivos deixados para trás depois do processo de caustificação do licor verde durante o processo de recuperação química. São compostos por carbonatos (principalmente), sulfatos, silicatos e outros minerais não-reactivos [23]. Os grits também contém sódio, magnésio e alumínio com um conteúdo de sólidos variando entre 70 e 80% [27].

Como apresentado na Figura 7, no processo de caustificação, ao licor verde é adicionada cal viva (CaO) no apagador de cal dando-se a primeira reacção. Simultaneamente, ocorre a reacção de caustificação do carbonato de sódio, recuperando a soda cáustica necessária ao processo de cozimento *kraft* (segunda reacção).

A cal quando inserida no apagador forma grânulos. A estes grânulos dá-se o nome de grits, um resíduo de cor acinzentada, com cerca de 15% a 25% de humidade dependendo da unidade fabril.

Estes resíduos são retirados do fundo do apagador de cal com um raspador, sendo arrastados através de um classificador de resíduos e passando por baixo de chuveiros de lavagem, para minimizar as perdas de sódio, antes de serem descarregados para o exterior (Figura 9) [Adaptado 3, 25].



(a)



(b)

Figura 9. (a) Tubo de queda e contentor dos grits. (b) Grits recém saídos do tubo de queda. (Fábrica Portucel Soporcel Unidade Cacia)

2.3. ELEMENTOS NOCIVOS AO BETÃO

Como visto, os materiais caustificados (como os grits e dregs) são gerados no processo de recuperação química o qual recupera os produtos inorgânicos utilizados no processo *kraft* para obtenção da pasta de papel. Estes materiais são caracterizados por terem um pH superior a 11 e por possuírem proporções variáveis de cálcio, alumínio, ferro, sódio, potássio, enxofre, magnésio e cloro. O cálcio é o componente predominante.

Qualquer material para ser utilizado, deve ser comercialmente viável. Portanto, para a questão da viabilidade econômica do emprego de resíduos na engenharia civil são propostos os seguintes critérios baseados em estudos do OECD – Organization for Economic Cooperation and Development – e da RILEM – Reunion Internacional dês Laboratories d'Essais et Materiaux [26]:

- A quantidade de resíduo disponível em um local deve ser suficientemente grande para justificar o desenvolvimento de sistemas de manuseio, processamento e transporte;
- As distâncias de transporte envolvidas devem ser competitivas com os materiais convencionais;
- O material não deve ser potencialmente nocivo durante a construção ou posteriormente à sua incorporação na estrutura.

Com vista ao último tópico, busca-se agora identificar os elementos nocivos relativamente ao betão com descrições sobre seu efeito no produto final.

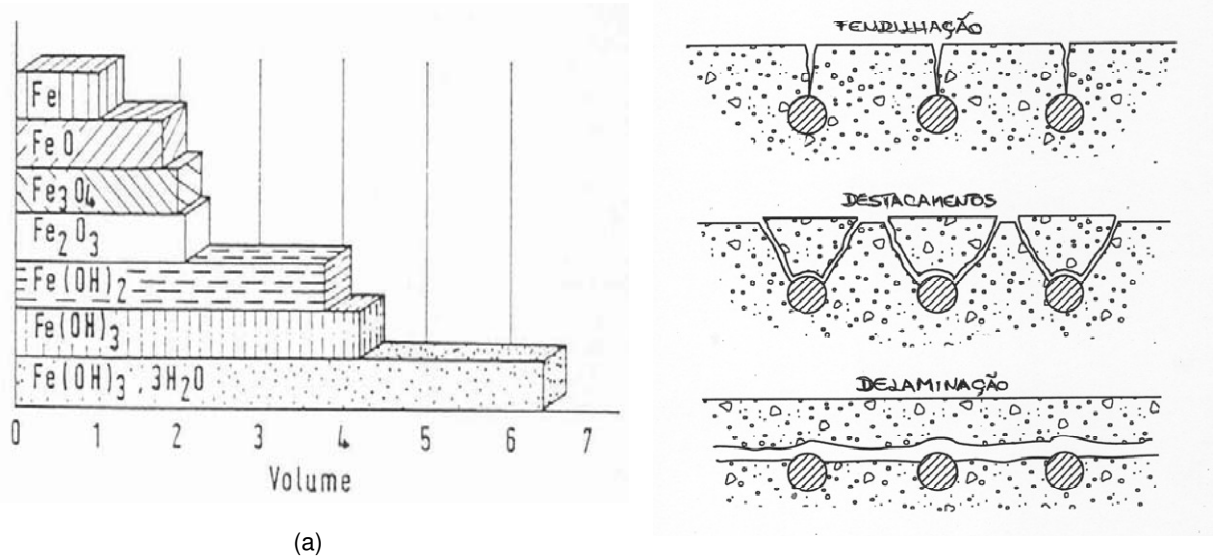
2.3.1 CLORETOS

Os cloretos alteram o tempo de presa do cimento e a velocidade do endurecimento, mas não são perigosos para o betão simples, pois não formam compostos indesejáveis com os componentes do cimento, mesmo em doses muito elevadas. Mas se há armaduras de aço, então já é importante considerar a presença do ião cloro [12].

A corrosão das armaduras do betão consiste na oxidação destrutiva do aço, pelo meio que o rodeia. Para que haja corrosão são necessários quatro elementos principais: um ânodo, um cátodo, um condutor metálico e um electrólito. Além disto, em primeiro lugar, é necessário que a protecção das armaduras (película passiva) seja destruída [30]. Este fenômeno de despassivação das armaduras só ocorre se a concentração de cloretos exceder um limite crítico.

Para o fenómeno de corrosão das armaduras, é necessário também que ocorram diferenças de potencial na superfície das armaduras; que exista disponibilidade de oxigénio nas zonas catódicas e finalmente, é necessário que as zonas anódicas e catódicas estejam interligadas electricamente e electroliticamente de modo a que os electrões e os iões possam fluir entre elas. Se alguma destas condições não ocorrer, o mecanismo da corrosão não se desenvolve [30].

O ião cloro promove a sua oxidação sob a forma de ferrugem provocando não só a diminuição da sua secção, mas também expansão, pois como se sabe a formação da ferrugem faz-se com um notável aumento de volume (Figura 10a), que acaba por romper o revestimento do betão, o que acelera mais ainda o processo de corrosão (Figura 10b) [12].



(a) (b)

Figura 10. (a) Volume relativo dos produtos de corrosão. (b) Esquema de fendilhação, destacamentos e delaminação do betão induzidos por corrosão [30].

Os cloretos aparecem na massa de betão por [30]:

- Estarem contidos na matéria-prima (cimento, agregados, água e eventualmente adjuvantes e adições);
- Terem penetrado do exterior (a estrutura encontra-se em ambiente rico em cloretos, ambiente marítimo ou industrial, ou está submetida à acção de sais de degelo).

Segundo a normalização actual, o teor de cloretos de um betão, expresso em percentagem de iões cloreto por massa de cimento, não deve exceder o valor dado no Quadro 2, extraído da norma NP EN 206-1.

Para o cálculo do teor de cloretos de um betão deve calcular-se a soma das contribuições dos materiais constituintes baseado, para cada um dos materiais constituintes, no teor máximo de cloretos permitido na respectiva norma ou no teor declarado pelo produtor [31].

As classes de teor de cloretos do betão aplicáveis em Portugal são definidas no Quadro 2 em função da classe de exposição ambiental definidas pelo Quadro 3 para a corrosão induzida por cloretos.

Quadro 2. Classes de teor de cloretos no betão em função da classe de exposição ambiental. (Extraído da NP EN 206-1 – Anexo Nacional DNA 5.2.7 Quadro 2).

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)
(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.*		

Quadro 3. Classes de exposição definidas para estruturas de acordo com o ambiente em que se encontram. (Extraído da NP EN 206-1 - Secção 4.2.1 Quadro 1).

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: ***NOTA:*** *No que respeita às condições de humidade ver também a secção 2 deste Quadro.*		
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

2.3.2 SULFATOS

Os sulfatos representam um dos maiores riscos de agressão química para o betão. Um inquérito realizado em 1989 indicou que o ataque do betão por sulfatos é a segunda causa das degradações

reveladas em 800 000 pontes de todo o mundo, sendo unicamente ultrapassada pela corrosão das armaduras provocada por penetração de cloretos [30].

Existem três diferentes tipos de ataques por sulfatos:

- Ataque clássico por sulfatos;
- Ataque interno por sulfatos ou Formação retardada de etringite;
- Ataque por sulfatos com formação de taumasite.

Em geral, o ataque pelos sulfatos é caracterizado pela reacção química entre os iões sulfato e os aluminatos do betão [30] com exceção do último dos ataques listados (com formação de taumasite). Este ataque difere dos demais pois não são os aluminatos que são atacados mas sim os silicatos [33].

Nos dois primeiros ataques, a reacção entre os íões sulfato e os aluminatos do betão (provenientes quer dos aluminatos de cálcio hidratados, quer da alumina reactiva dos agregados) originam a formação de etringite (sulfoaluminato de cálcio hidratado) e algum gesso (sulfato de cálcio bi-hidratado) [30].

A formação da etringite é, sob certas condições, fortemente expansiva, originando uma fendilhação irregular na estrutura, nitidamente mais desenvolvida à superfície do que no interior. Esta fendilhação facilita a penetração de novos agentes agressivos e acelera o processo de deterioração, podendo em alguns casos produzir uma desagregação em toda a massa do betão com perdas de resistência notáveis [30].

A Figura 11 apresenta um provete de betão antes e depois de ter sofrido um ataque por sulfatos. Observa-se o elevado aumento de volume. A explicação do mecanismo de expansão ligado à formação de etringite é ainda objeto de investigação e controvérsia. No entanto, tratam-se de reacções entre um sólido e substâncias em dissolução, originando a formação de novos compostos sólidos, sem dissolução do sólido primitivo [30].

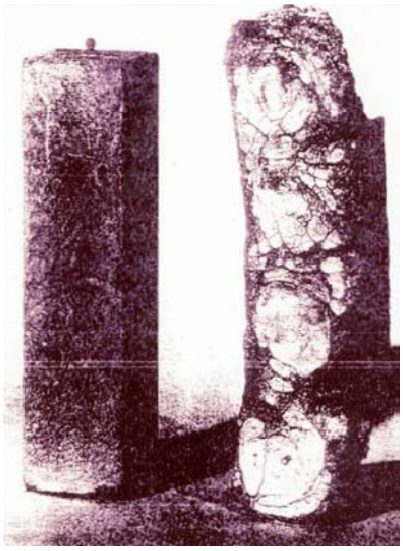


Figura 11. Peça em betão antes e depois de um ataque por sulfatos.

A diferença entre o ataque clássico por sulfatos e o ataque interno é sua fonte. [33].

Com relação ao ataque por sulfatos com formação de taumasite, como citado anteriormente, neste são os silicatos cálcicos hidratados que são atacados. A substituição dos silicatos por taumasite é acompanhado da redução das propriedades ligantes no betão endurecido com perda de resistência e transformação numa massa pastosa sem coesão.

É favorável a formação de taumasite, a disponibilidade de iões sulfatos, iões carbonatos, silicatos cálcicos (hidratados ou não), humidade e água [33].

Este mecanismo parece muito mais grave que o ataque clássico e o ataque interno já que realiza-se à custa dos silicatos hidratados de cálcio que são o principal agente ligante do cimento Portland. A etringite é produzida quando os sulfatos reagem com aluminatos cálcicos hidratados que são constituintes secundários da pasta de cimento endurecida e pouco contribuem para a resistência do betão [33].

Como requisito químico do cimento, o teor de sulfatos no cimento, expresso em percentagem de SO_3, é limitado pelo Quadro 4.

Quadro 4. Teor de sulfatos limite (extraído e adaptado da NP EN 197-1 – Quadro 8).

<table>
<tr><th colspan="2" rowspan="3">Propriedade</th><th colspan="6">Valores limite para resultados individuais</th></tr>
<tr><th colspan="6">Classe de resistência</th></tr>
<tr><th>32,5N</th><th>32,5R</th><th>42,5N</th><th>42,5R</th><th>52,5N</th><th>52,5R</th></tr>
<tr><td rowspan="3">Teor de sulfatos
(em % SO_3)
valor limite superior</td><td>CEM I
CEM II
CEM IV
CEM V</td><td colspan="3">4,0</td><td colspan="3">4,5</td></tr>
<tr><td>CEM III/A
CEM III/B</td><td colspan="6">4,5</td></tr>
<tr><td>CEM III/C</td><td colspan="6">5,0</td></tr>
</table>

A nova versão da NP EN 197-1, em fase de revisão, será mais ainda restritiva ao reduzir os valores limites apresentados no Quadro 4 em 0,5%.

2.3.3 SÓDIO E POTÁSSIO

A maior preocupação com a presença de sódio e potássio no betão decorre das reacções álcali-agregado, mais precisamente, a reacção álcali-sílica.

A recção álcali-sílica dá-se no betão entre os iões alcalinos de sódio e potássio (K^+ e Na^+) e os iões hidróxido (OH^-) presentes na solução intersticial, e a sílica (SiO_2) dos agregados, dando origem a um gel sílico alcalino. Este gel é capaz de se expandir, originando, quando no interior do betão, tensões que podem provocar fissuração [30].

Na Figura 12 são apresentadas fotografias de betões que sofreram deteriorações causadas por reacções álcali-sílica.



Figura 12. Deterioração no betão por reacção álcali-sílica [11].

Os principais parâmetros que influenciam as expansões são [11]:

- A reactividade dos agregados que está relacionada com a presença de sílica;
- Quantidade de agregado reactivo;
- Tipo de cimento;
- Condições ambientais (quantidade externa de substâncias agressivas – por exemplo proveniente de sais descongelantes);
- Quantidade de água disponível e
- Granulometria do agregado reactivo.

Os meios empregados para combater esta reacção são [12]:

- Utilizar cimentos com teor de álcalis, expresso em óxido de sódio, inferior a 0,6% em relação a massa do cimento;
- Não utilizar agregados com sílica reactiva;
- Utilizar pozolanas, escória granulada de alto-forno entre outras adições em quantidade e qualidade suficiente.

A reacção álcalis-sílica pode levar muito tempo a manifestar-se em termos de deterioração do betão. As piores condições de ataque são ambientes sujeitos a ciclos de molhagem/secagem e, portanto, será de considerar uma protecção adicional impermeabilizante [11].

De acordo com a NP EN 196-2, o teor em álcalis (solúveis em ácido) é designado por equivalente em óxido de sódio, o qual é calculado pela equação 1.

$$Equivalente\ em\ óxido\ de\ sódio = Na_2O + 0{,}658 \cdot K_2O \quad (1)$$

Quando num betão conservado em meio húmido o agregado contém sílica reactiva e o cimento possui uma quantidade superior a 0,6% de álcalis, dá-se uma reacção química com grande expansão entre estes componentes, o que leva a formação de silicatos alcalinos [12].

2.3.4 MAGNÉSIO

Este elemento pode ser maléfico a estrutura de betão em duas situações:

Pelo ataque por sais de magnésio - Os sais de magnésio reagem com os compostos de cálcio do betão endurecido libertando hidróxido de magnésio Mg $(OH)_2$. O hidróxido de magnésio baixa o pH do betão e conseqüentemente é mau do ponto de vista da corrosão das armaduras. No entanto, ao

precipitar pode colmatar os poros, impermeabilizando o betão e tornando mais difícil a progressão da reacção [30].

Pela presença de óxido de magnésio - O óxido de magnésio na sua forma cristalina (periclase) é reactivo (em quantidade superior a 2% do cimento, em massa, pois até 2% combina-se com os componentes principais do cimento). Este óxido nesta forma combina-se com a água de modo semelhante ao óxido de cálcio livre. O óxido de magnésio na fase vítrea é inofensivo [10].

A periclase hidrata progressivamente se transformando em hidróxido de magnésio. Transformação esta que ocorre após um longo tempo em contacto com a água. Como resultado, a expansão de volume causada pela hidratação da periclase causa destruição da estrutura endurecida do betão quando o teor de magnésio ultrapassar determinado limite [9].

Por esta razão, a quantidade admissível de magnésio no cimento é especificado na maioria dos países da seguinte forma: 4% para o Reino Unido, 5% para o Japão e Alemanha e 6% para os Estados Unidos em teor de óxido de magnésio [9].

2.3.5 CRÓMIO

A norma NP EN 196-10 apresenta um método de determinação do teor de crómio (VI) com o objectivo de minimizar a ocorrência de dermatite de contacto alérgica relacionada com o cromato, resultante da utilização do cimento ou de preparações com cimento. Este teor é fixado pelo Anexo da Directiva 2003/53/EC em 0,0002% de crómio hexavalente solúvel em água, determinado em percentagem em massa de cimento seco [34].

3
ENSAIOS

3.1. INTRODUÇÃO

Para este estudo, foi desenvolvido um programa que englobou desde a visitação a fábrica de produção de celulose, como também a caracterização dos materiais quer por granulometria laser, quer por microscopia electrónica e a execução de provetes de argamassas para ensaios em laboratório.

Provetes estes com substituição de 10% em massa do cimento pelos resíduos industriais: grits e dregs. Para efeitos de comparação, foram feitos provetes de controlo onde não foi utilizada nenhuma substituição.

O programa experimental englobou uma série de ensaios, entre os quais:

- Avaliação da *trabalhabilidade* (ASTM C 109/90 e ASTM 230);
- Ensaios das *resistências mecânicas* (NP EN 196-1);
- Determinação do *tempo de presa* e *expansibilidade* (NP EN 196-3);
- Ensaio de *carbonatação acelerada* (E 391);
- Determinação do *índice de actividade* (NP 4220);
- Ensaio de *absorção de água por capilaridade* (E 393 e RILEM TC 116 PCD);
- Ensaio de *penetração acelerada por cloretos* (E463);
- Ensaio de *resistividade eléctrica* (RILEM TC 154-EMC).

Nos próximos itens deste capítulo são explicitados os materiais utilizados, grits e dregs, algumas características físicas e químicas e os tratamentos utilizados desde a recepção até a incorporação nos provetes. Também são descritos os ensaios realizados e os resultados obtidos.

3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.2.1. INTRODUÇÃO

Na execução dos provetes foram utilizados os seguintes componentes:

- Cimento Portland (CEM I) – classe 42,5R;
- Areia normalizada CEN (Comité Europeu de Normalização);
- Água potável;
- Retardador de presa DELVO®CRETE T (VZ) – Euromodal Woermann;
- Grits;
- Dregs.

3.2.2. CIMENTO E ADJUVANTE

Para a determinação da finura dos elementos em estudo, foi utilizado um método informatizado para se determinar as curvas granulométricas: trata-se da granulometria laser. É um método de difracção laser baseado na avaliação de pequenos ângulos de dispersão da luz. O princípio de funcionamento é baseado no facto de um feixe de luz se dispersar segundo uma gama de ângulos dependente da dimensão da partícula onde incide. As partículas pequenas dispersam em ângulos maiores enquanto que as partículas maiores dispersam em ângulos menores [10].

A Figura 13 mostra o granulómetro laser do LABEST utilizado para este estudo.



Figura 13. Granulómetro laser do LABEST.

Como resultado da análise do cimento utilizado para os ensaios, é apresentada a Figura 14.

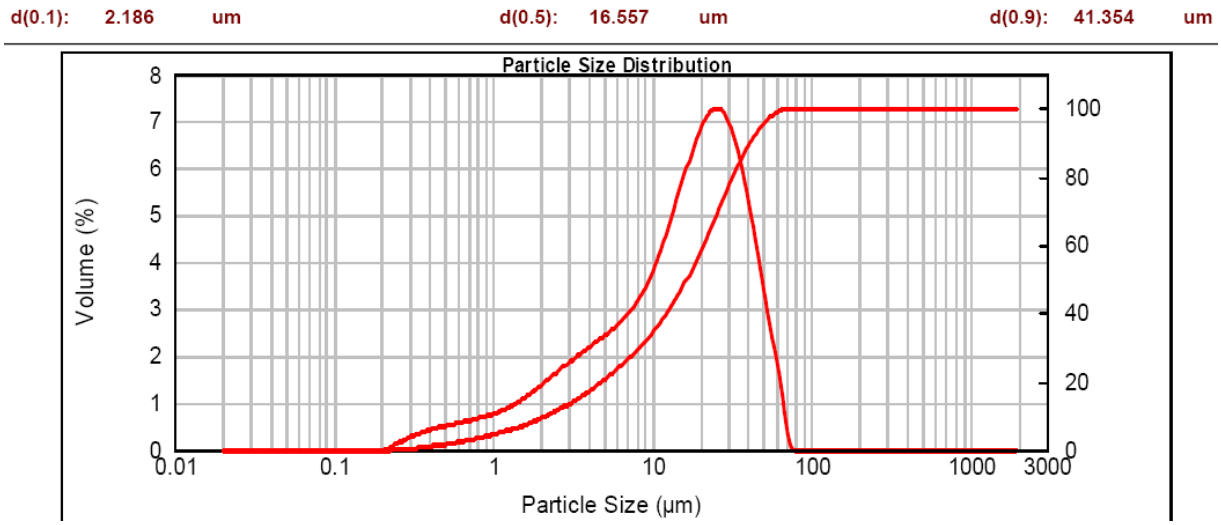
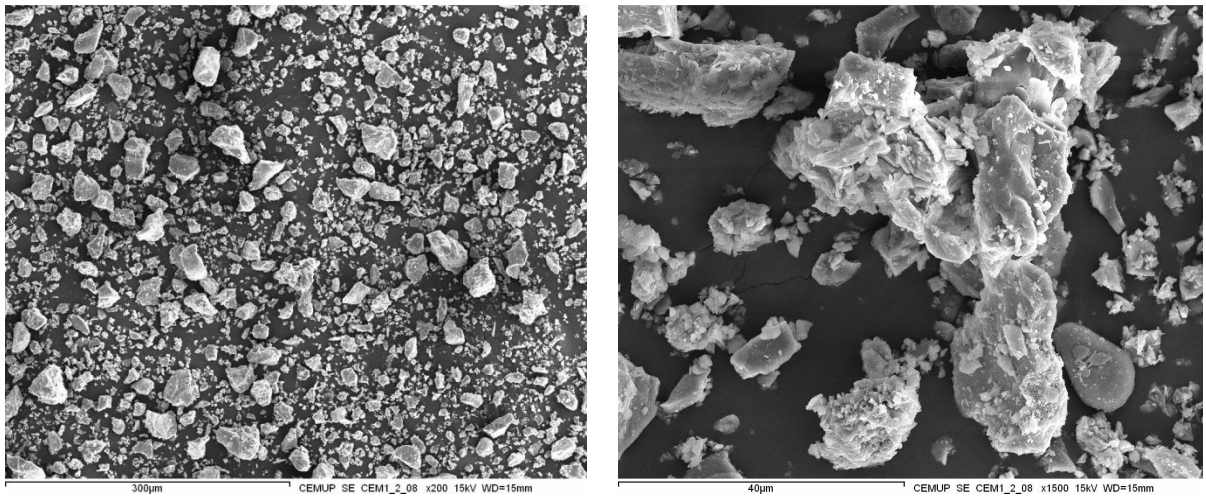


Figura 14. Curva granulométrica do cimento utilizado (CEM I – 42,5R).

O cimento foi armazenado em sala especial onde a atuação da humidade é mínima. O adjuvante foi armazenado numa embalagem especial fosca longe de variações térmicas e da humidade excessivas.

Amostras do cimento (em pó e em argamassa) foram analisadas por microscopia electrónica. Os microscópios electrónicos são instrumentos que permitem a observação com elevada resolução de amostras com características muito diferenciadas, obtendo-se imagens sobretudo a partir de eléctrões rectrodifundidos ou a partir de eléctrões secundários. Os microscópios electrónicos de varrimento (MEV) incluem espectrômetros de raios X para detecção e análise da radiação emitida pela amostra, pertmitindo a análise química elementar qualitativa e/ou quantitativa de um microvolume, considerando todos os elementos do boro ao urânio [38].

A Figura 15 apresenta as imagens obtidas através da análise do cimento em pó realizada no microscópio electrónico de varrimento do CEMUP.



(a) (b)

Figura 15. Imagens obtidas do cimento em pó no MEV. (a) Ampliação de 200 vezes. (b) Ampliação de 1500 vezes.

A Figura 16 mostra uma análise química elementar da região da Figura 15b.

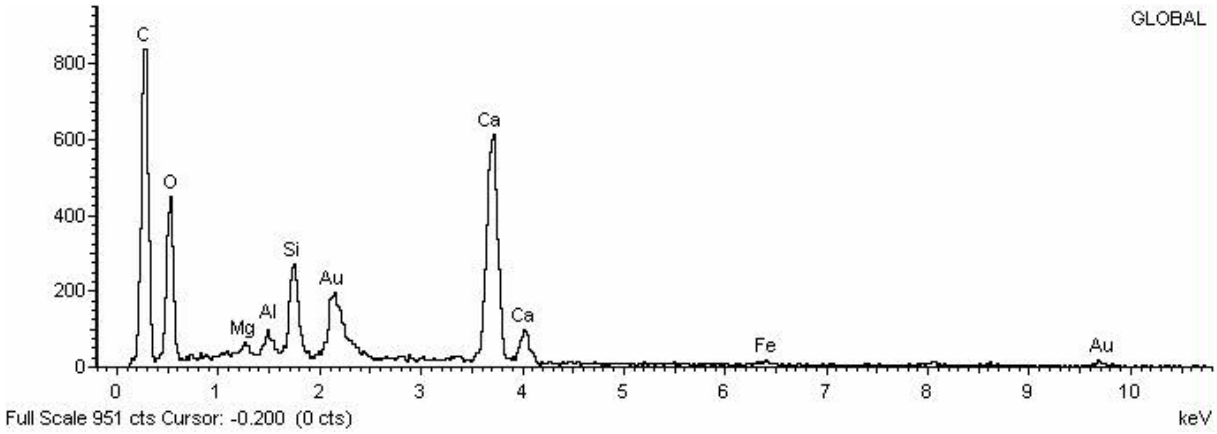


Figura 16. Análise química elementar do cimento em pó realizada pelo MEV.

Note que a presença de um elevado pico de carbono refere-se a fita cola utilizada para fixar a amostra, amostra esta submetida ao vácuo para análise.

O adjuvante utilizado (somente nos provetes onde foram incorporados os dregs como substituição parcial do cimento) – retardador de presa – possui como matéria prima um ácido orgânico, coloração castanho claro e apresenta um pH (a 20ºC) de 1,3 ± 0,8. O teor de cloretos é inferior a 0,1% em massa e o teor em álcalis com 0,6% em massa. A fonte dos dados sobre este adjuvante foi sua ficha técnica (anexo 12).

3.2.3. GRITS

Os grits, como já explicitado, são resultantes do processo de tratamento para reincorporação do licor (utilizado na separação da lenhina das fibras) no processo de obtenção das fibras. Este material foi fornecido pela unidade fabril da PORTUCEL SOPORCEL de Cacia.

O material chegou ao laboratório sem nenhum tratamento prévio, ou seja, chegaram nas mesmas condições de como são obtidos na fábrica. A Figura 17a mostra os grits resultantes do processo de tratamento do licor na fábrica da PORTUCEL SOPORCEL de Cacia (em condições idênticas as da outra unidade fabril de onde foram fornecidos os materiais, segundo a empresa). A Figura 17b mostra o material pronto para ser utilizado na execução dos provetes.



(a)



(b)

Figura 17. Grits: (a) Grits obtidos do processo de tratamento do licor. (Fábrica SOPORCEL PORTUCEL Cacia); (b) Grits, secos e moídos, utilizados nos provetes.

Os grits, assim como os dregs, passaram por dois processos de tratamento. Primeiro, secou-se o material numa estufa a 105 ± 5ºC e, em seguida, foram postos dentro do moinho de bolas cerâmicas Figura 18 onde permaneceram por 24 horas até obter a granulometria apresentada na Figura 19.

É possível que não fosse necessário moer o material por tanto tempo, no entanto devido à urgência da execução dos trabalhos, preferiu-se optar por deixar para uma fase posterior de estudo a questão da optimização da moagem com o moinho disponível.

O moinho de bolas é composto por 2 rolos giratórios os quais giram numa velocidade considerável (1360 a 1390 rpm). No recipiente (cilindro fechado) são introduzidas esferas de porcelana de diâmetros variados que, por atrito, quebram o material introduzido para moagem [5].



(a)



(b)

Figura 18. Moinho de bolas cerâmicas (a) equipamento; (b) Interior do moinho de bolas após moagem dos grits.

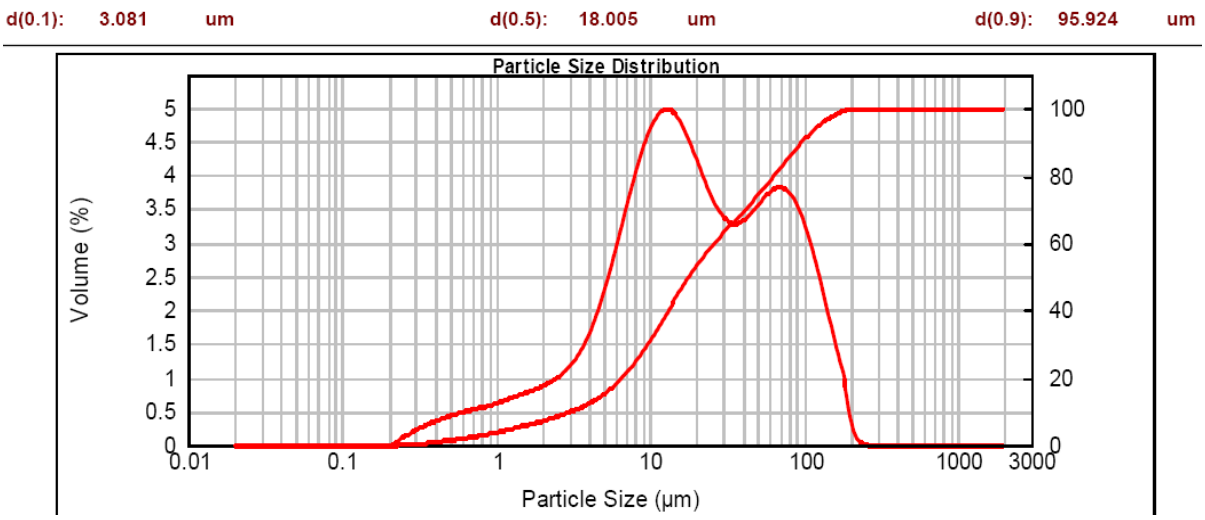
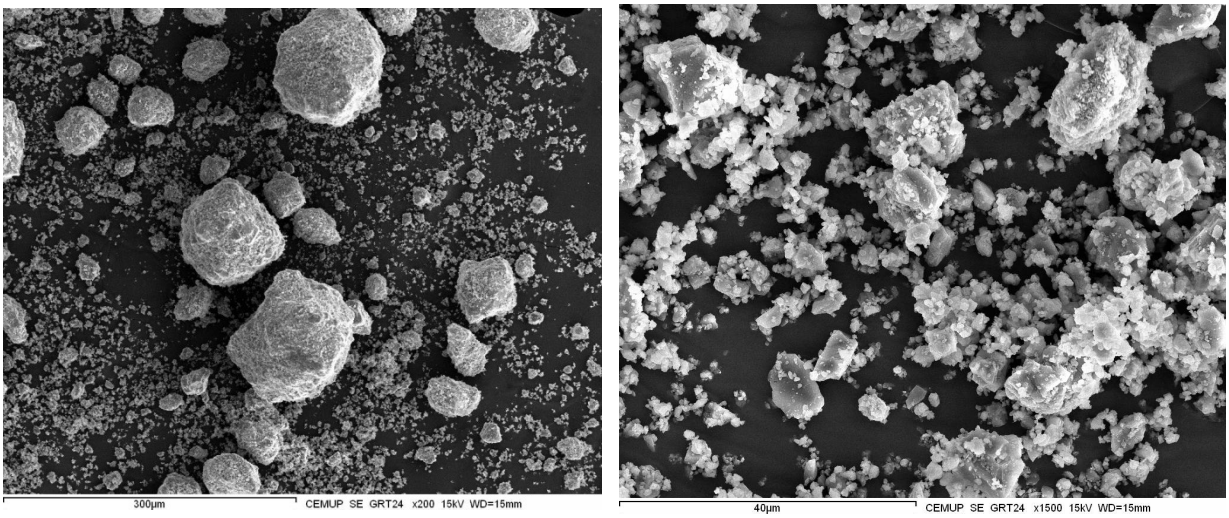


Figura 19. Curva granulométrica dos grits após moagem de 24 horas no moinho de bolas.

Foram requisitadas análises químicas deste material num laboratório credenciado visto que, a análise enviada pela empresa fornecedora dos resíduos não foi realizada de acordo com a NP EN 196-2.

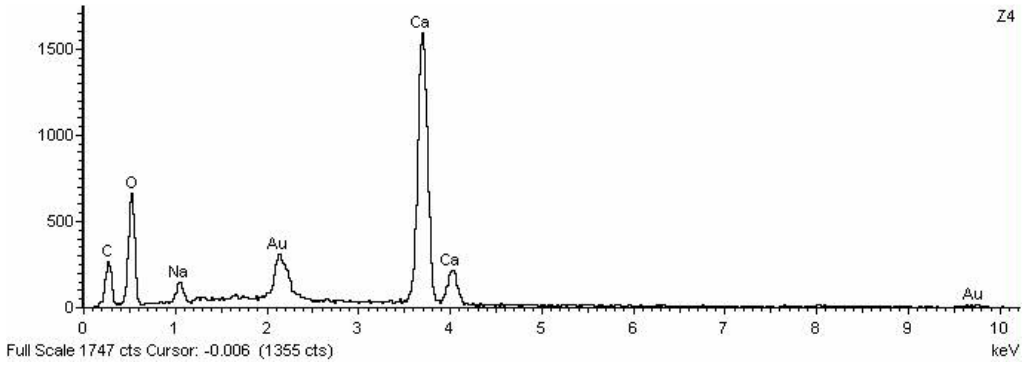
A Figura 20 apresenta as imagens obtidas através da análise dos grits realizada no microscópio electrónico de varrimento do CEMUP.



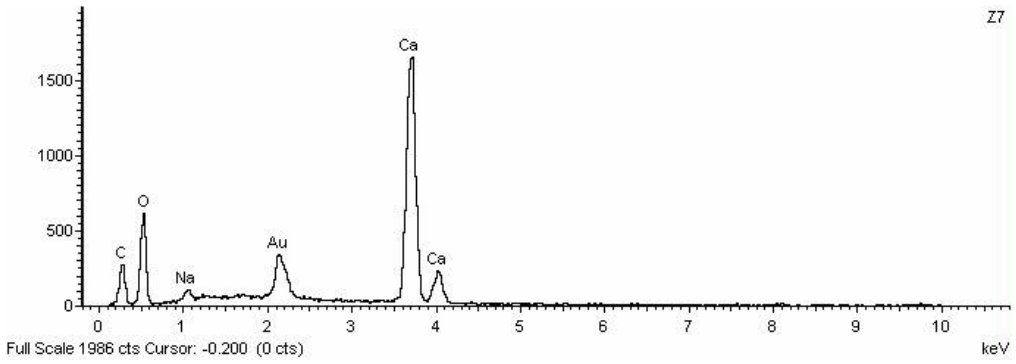
(a) (b)

Figura 20. Imagens obtidas dos grits em pó no MEV. (a) Ampliação de 200 vezes. (b) Ampliação de 1500 vezes.

Nota-se uma grande diferença no tamanho das partículas e, por isto, foram realizadas análises químicas nos diferentes tamanhos de grãos. Como estas análises são pontuais, foram realizadas em diversos pontos. A Figura 21a apresenta uma análise típica dos grãos maiores e a Figura 21b apresenta uma análise típica dos grãos menores.



(a)



(b)

Figura 21. Análise química elementar realizada pelo MEV dos grits. (a) Grãos maiores (b) Grãos menores.

Os resultados apresentados na Figura 21 se mostraram muito semelhantes pelo que se detectou que provavelmente, os grãos menores são resultados da moagem do material. Os grãos maiores, por provavelmente apresentarem uma maior resistência, não se quebraram.

Note que a presença de um pico de carbono (C) refere-se a fita cola utilizada para fixar a amostra, amostra esta submetida ao vácuo para análise. O pico do ouro (Au) refere-se ao banho de ouro que a amostra é submetida antes da análise para se tornar condutora.

3.2.4. DREGS

Os dregs, como já explicitado, também são resultantes do processo de tratamento para reincorporação do licor. Mais precisamente, é o resíduo que não é solúvel no licor verde (ver em capítulo 2 – 2.2.2) sendo compostos essencialmente por precipitados como carbonato, hidróxido ou sulfuretos de sódio [6].

No laboratório os dregs foram encaminhados primeiramente para a estufa permanecendo 24 horas a 105°C. Em seguida, após arrefecerem, foram introduzidos no moinho de bolas onde ficaram a moer por 24 horas.

A Figura 22a mostra como os dregs chegaram da fábrica da PORTUCEL SOPORCEL e em Figura 22b, mostra os dregs após 24 horas no moinho de bolas cerâmicas pronto para serem utilizados na execução dos provetes.



(a)



(b)

Figura 22. Dregs (a) Recém-chegados da PORTUCEL SOPORCEL; (b) Após moagem.

A granulometria, obtida pelo granulómetro laser, é apresentada na Figura 23.

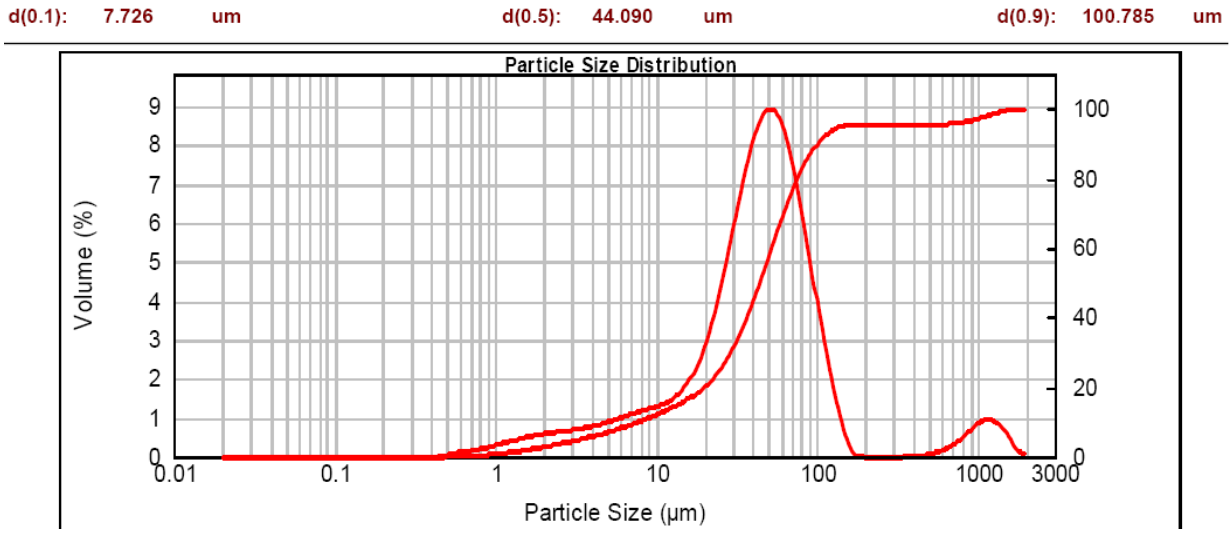
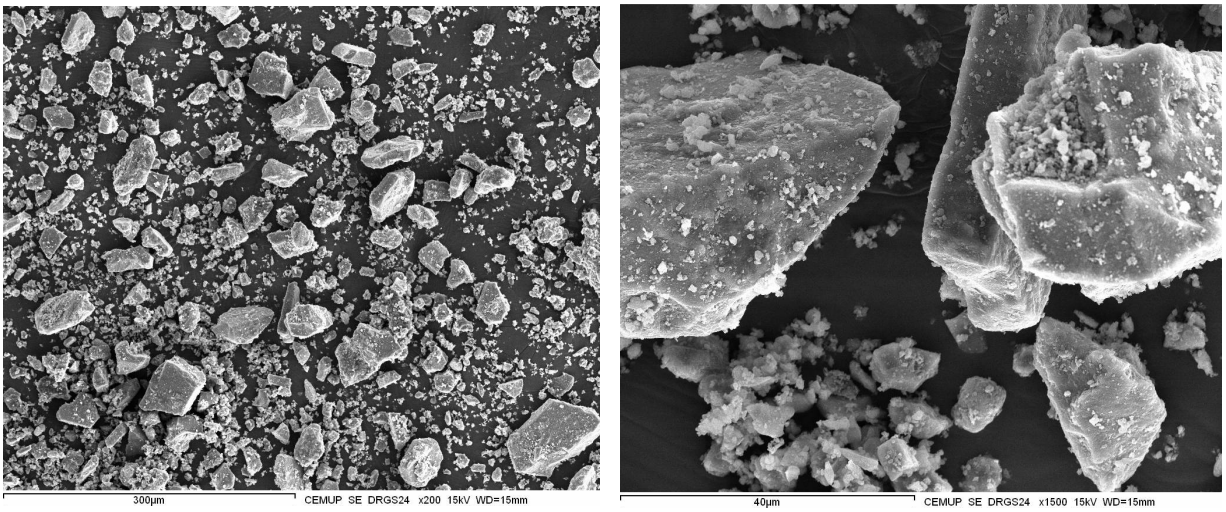


Figura 23. Análise granulométrica dos dregs após moagem no moinho de bolas por 24 horas.

Foram requisitadas análises químicas deste material num laboratório credenciado visto que, a análise enviada pela empresa fornecedora dos resíduos não foi realizada de acordo com a NP EN 196-2.

A Figura 24 apresenta as imagens obtidas através da análise dos dregs realizada no microscópio electrónico de varrimento do CEMUP.



(a) (b)

Figura 24. Imagens obtidas dos dregs em pó no MEV. (a) Ampliação de 200 vezes. (b) Ampliação de 1500 vezes.

A Figura 25 mostra uma análise química elementar global da região da Figura 24b.

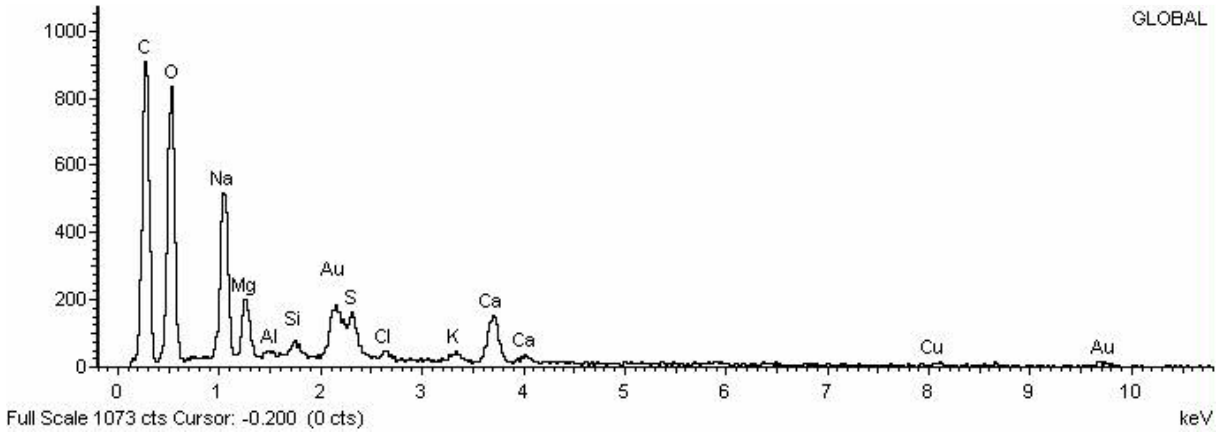


Figura 25. Análise química elementar dos dregs realizada pelo MEV.

Nesta análise global verifica-se a presença de diversos elementos químicos. Em análises pontuais, detecta-se um elevado pico de sódio e cálcio, para além do pico do oxigénio.

3.2.5. ELEMENTOS NOCIVOS AO BETÃO

Como a utilização dos grits e dregs como substituição parcial do cimento ainda não se encontra documentada na prática, surge a necessidade de analisar o material da forma mais abrangente possível para identificar qualquer característica problemática para sua incorporação como substituto do cimento no betão.

Pela necessidade de se ter em consideração elementos prejudiciais ao betão, apresenta-se os valores limites impostos por normas ou recomendado por bibliografias especializadas no Quadro 5. Como referido anteriormente já foram requisitadas análises químicas de acordo com a NP EN 196-2 para verificação dos limites estabelecidos.

Quadro 5. Análise de potenciais elementos nocivos introduzidos através dos grits e dregs [3].

Substância Nociva	*Limite*[5]	*Fonte*
Magnésio	1%	[8]
Sulfatos (SO_3)	≤ 4%	NP EN 197-1
Sódio	0,6%	[10]
Potássio	0,6%	[10]
Flúor	± 0,3%	[7]
Cloretos	0,10%	NP EN 197-1
Crómio	0,0002%	NP EN 196-10

[5] As percentagens limite apresentadas referem-se a percentagem do teor da substância no betão.

3.3. ENSAIOS

3.3.1. INTRODUÇÃO E COMPOSIÇÃO DOS PROVETES

Após preparação das adições (secagem e moagem), sucedeu-se a fabricação dos provetes de argamassa para realização dos ensaios citados anteriormente. Para obter uma fiabilidade dos resultados tão alta quanto possível e com a possibilidade de comparar o desempenho das diferentes adições, manteve-se constante a relação água/ligante (A/L) e a trabalhabilidade. O uso do retardador de presa teve por finalidade acertar a trabalhabilidade, sendo tomado como modelo o espalhamento da primeira argamassa de controlo produzida. Observa-se que só foi necessário o uso do adjuvante citado, nos provetes onde a adição eram os dregs.

O Quadro 6 apresenta as quantidades dos materiais utilizado na produção dos provetes de argamassa e o Quadro 7 apresenta os traços em peso em função da massa do ligante.

Quadro 6. Quantidade dos materiais utilizados na produção dos provetes de argamassa [3].

Componente	*Provetes de controlo*	*Provetes dos grits*[6]	*Provetes dos dregs*[7]
Cimento	450g	405g	405g
Grits	-	45g	-
Dregs	-	-	45g
Areia	1450g	1450g	1450g
Água	225g	225g	225g
Retardador de Presa (RP)	-	-	1,8g
Relação RP/L			0,4%
Relação A/L	0,5	0,5	0,5

Quadro 7. Traço em peso (em função da massa do ligante).

	Ligante			*Areia*	*Água*	*Retardador de Presa (RP)*
	Cimento	Grits	Dregs			
Provetes de controlo	1	-	-	3	0,5	-
Provete dos grits (10%)	0,9	0,1	-	3	0,5	-
Provete dos dregs (10%)	0,9	-	0,1	3	0,5	0,004

O procedimento de produção dos provetes descritos acima deu-se baseado na norma NP EN 196-1, sendo excepção os provetes com incorporação dos dregs que utilizaram retardador de presa. A estes provetes, acrescentou-se 3 minutos ao período de mistura, a velocidade rápida, totalizando 7 minutos.

[6] Substituição de 10% em massa do cimento pelos grits.
[7] Substituição de 10% em massa do cimento pelos dregs.

As adições (grits ou dregs) foram introduzidas juntamente com o cimento, e o retardador de presa foi adicionado juntamente com a água de amassadura.

Os ensaios onde foram necessárias mais de uma amassadura para a confecção dos provetes, produziu-se primeiro uma amassadura a qual foi posta de lado enquanto se produzia a outra. No final do período de mistura da segunda, a primeira foi introduzida no misturador. A partir daí contou-se 1 minuto para uma homogeneização e procedeu-se com a realização do ensaio de trabalhabilidade com a mistura (o qual foi realizado para todas as amassaduras).

Em seguida, a argamassa foi compactada nos moldes respectivos de cada ensaio, permanecendo assim por 24 horas. Após este período, os provetes foram desmoldados e colocados submersos em água no interior da câmara de cura a 20ºC ± 1ºC até a data dos ensaios.

3.3.2. AVALIAÇÃO DA TRABALHABILIDADE

A trabalhabilidade consiste na maior ou menor facilidade de execução do betão (transporte, colocação, adensamento e acabamento) e a menor ou maior facilidade de segregação durante essas operações [10]. Sendo assim, sua avaliação é de fundamental importância quando se tem por objectivo a incorporação dos materiais utilizados em betões estruturais.

Na avaliação da trabalhabilidade, seguiu-se o procedimento descrito pelas normas americanas ASTM C 109/90 e ASTM 230. A argamassa, depois de finalizada sua preparação, é colocada num molde tronco-cônico em duas camadas. Cada camada é compactada (com 20 pancadas) sendo o molde depois rasado e alisado. Em seguida, retira-se o molde e submete-se o provete a 25 quedas da mesa em 15 segundos. Finalizado este procedimento, toma-se nota dos diâmetros de espalhamento da argamassa (em milímetros) e considera-se a sua média como resultado deste ensaio.



Figura 7 – Avaliação da trabalhabilidade de uma amassadura.

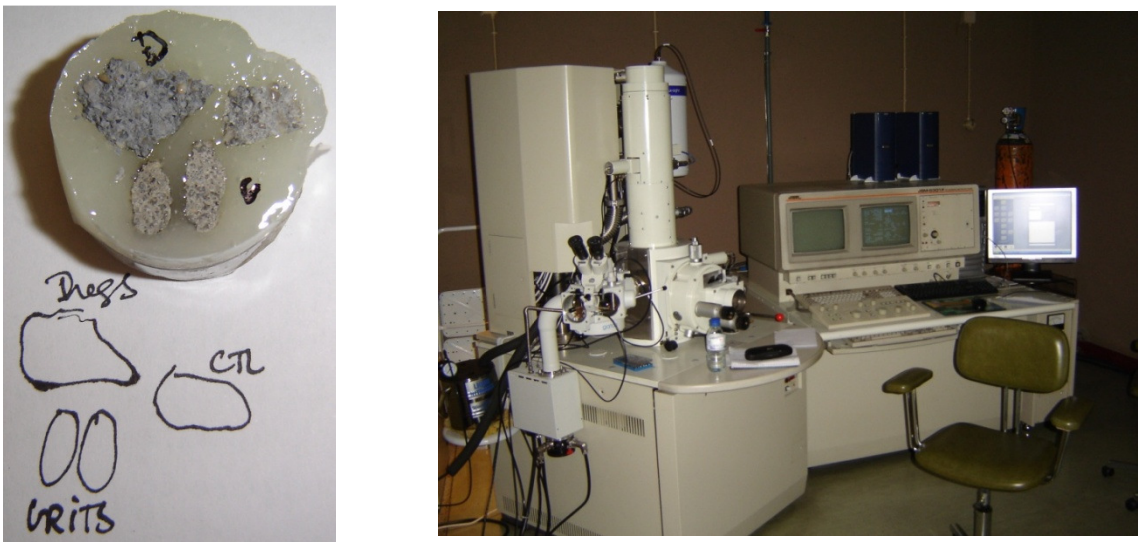
Os resultados são apresentados no Quadro 8. Observa-se que para os grits e dregs, nos ensaios de resistência mecânica aos 7 dias, aos 28 dias e de índice de actividade, foram realizados ensaios em dois laboratórios – Aqui entitulados LAB1 e LAB2. A trabalhabilidade dos provetes ensaiados no LAB1 estão em negrito e a dos ensaiados no LAB2 estão em itálico. Os demais ensaios foram realizados no laboratório de durabilidade da FEUP.

Quadro 8. Resultado da avaliação da trabalhabilidade (em milímetros).

Amassadura	*Ensaio realizado*	*Controle*	*Grits*	*Dregs*
1 / 2 / 3	R 90d[8]	**214**	**229**	**216**
4 / 5 / 6	R 60d	**219**	**216**	**216**
7 / 8 / 9 / 10 / 11	R 28d	**228** / *223*	**219** / *219*	*216*
12 / 13 / 14 / 15 / 16	R 7d	**225** / *221*	**223** / *231*	*225*
17 e 18 / 19 e 20 / 21 e 22	Penetração por cloretos e Carbonatação	227	213	194
23 e 24 / 25 e 26 / 27 e 28	Absorção por capilaridade	223	221	214
29 / 30 / 31 / 32 / 33	Índice de Actividade	**225** / *229*	**224** / *221*	*217*
Diâmetro médio (em mm)		223	222	214
Desvio Padrão (em mm)		± 4,5	± 5,4	± 9,6

3.3.3. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE VARRIMENTO

Dos provetes de argamassa utilizados nos ensaios a resistência mecânica aos 7 dias, foram retiradas amostras. Amostras estas que foram coladas com araldite num suporte metálico da Figura 26a.

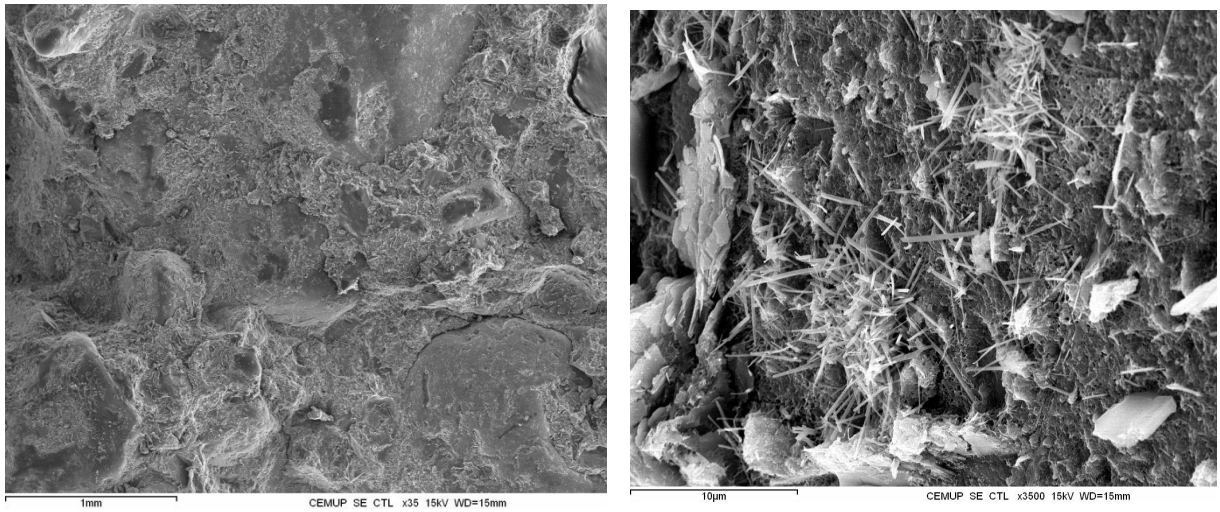


(a) (b)

Figura 26. (a) Suporte metálico com amostras das argamassas a serem analisadas no MEV (aproximadamente 2cm de diâmetro). (b) Microscópio electrónico de varrimento (MEV) – CEMUP.

[8] O ensaio de Resistência mecânica aos 90 dias não foi realizado até a data de entrega deste trabalho.

As imagens obtidas nas análises da amostra de argamassa de controlo são apresentadas na Figura 27.



(a) (b)

Figura 27. Imagens obtidas da argamassa de controlo no MEV. (a) Ampliação de 35 vezes. (b) Ampliação de 3500 vezes

A Figura 28 mostra a análise química elementar geral realizada na região apresentada na Figura 27a.

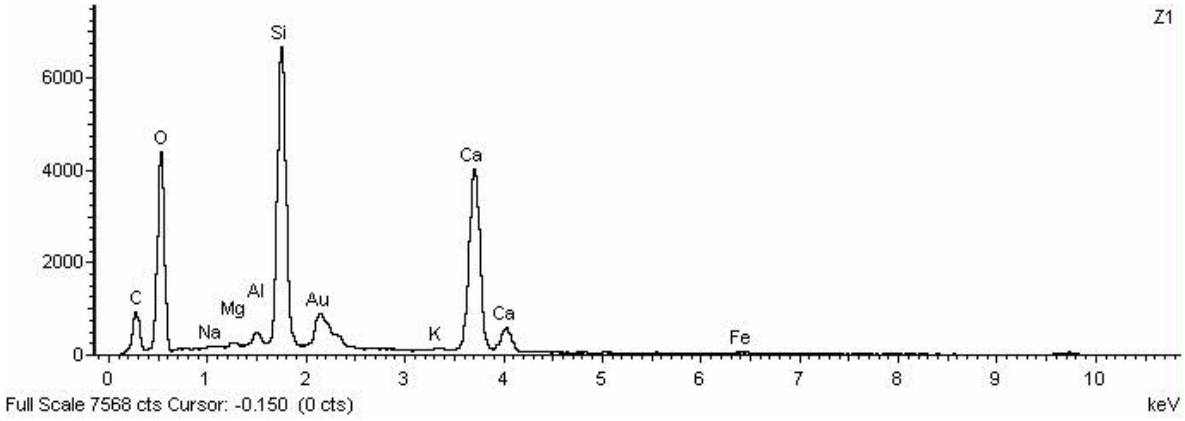


Figura 28. Análise química elementar da argamassa de controlo realizada pelo MEV.

A Figura 29 mostra a análise química elementar das agulhas detectadas na Figura 27b.

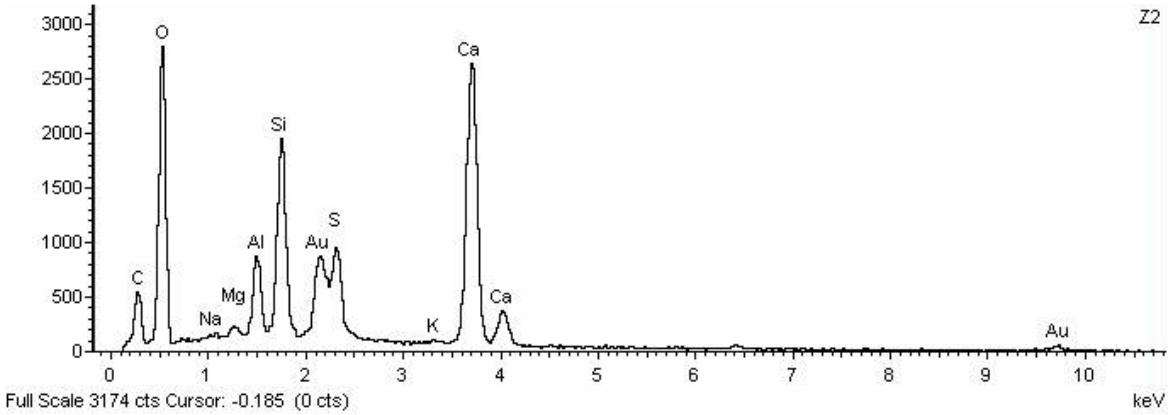
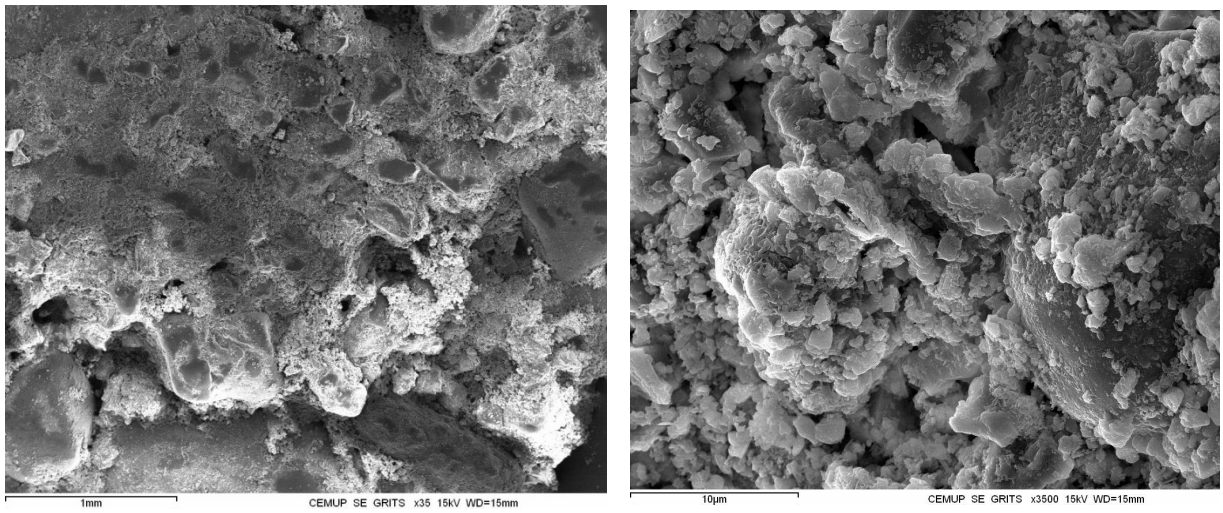


Figura 29. Análise química obtida por MEV das agulhas detectadas na Figura 27b.

Como realizado para a argamassa de controlo, também foram analisadas as argamassas de grits. As imagens obtidas nas análises da amostra de argamassa de grits são apresentadas na Figura 30.



(a) (b)

Figura 30. Imagens obtidas da argamassa de grits no MEV. (a) Ampliação de 35 vezes. (b) Ampliação de 3500 vezes.

A Figura 31 mostra a análise química elementar geral realizada na região apresentada na Figura 30a.

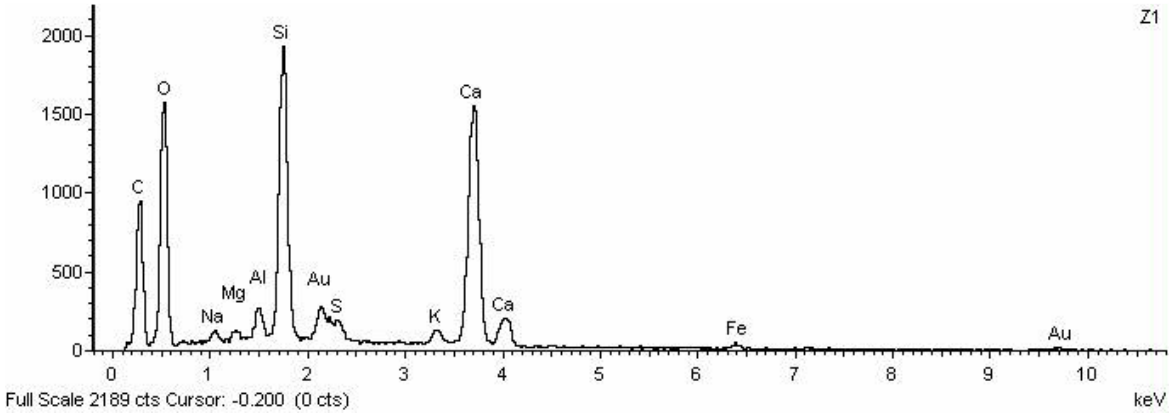
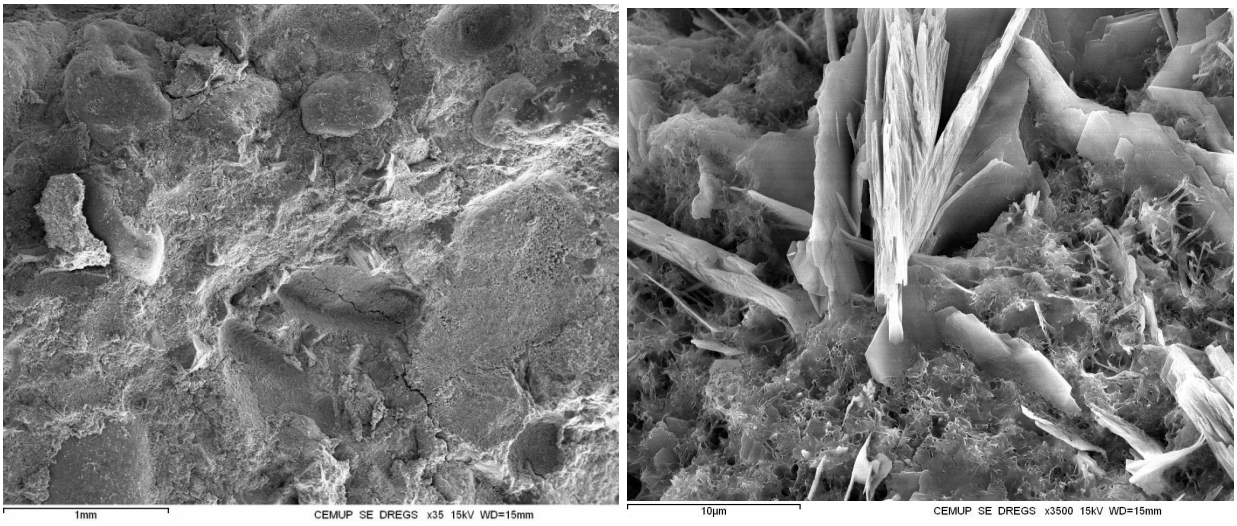


Figura 31. Análise química elementar da argamassa de grits realizada pelo MEV.

Para os provetes dos dregs, repetiu-se o mesmo processo. As imagens obtidas nas análises da amostra de argamassa de dregs são apresentadas na Figura 32.



(a) (b)

Figura 32. Imagens obtidas da argamassa de dregs no MEV. (a) Ampliação de 35 vezes. (b) Ampliação de 3500 vezes.

A Figura 33 mostra a análise química elementar geral realizada na região da Figura 32a.

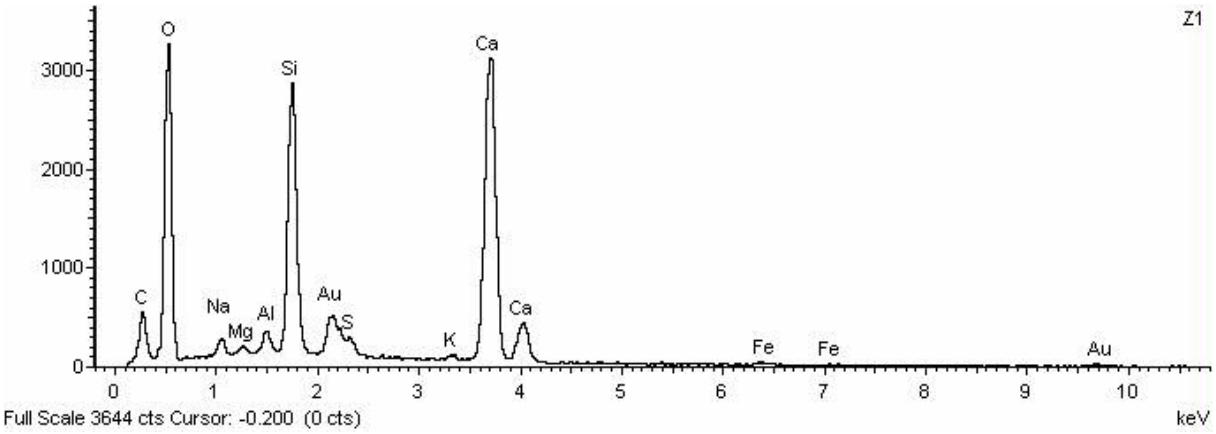


Figura 33. Análise química elementar da argamassa de dregs realizada pelo MEV.

Foi realizado também uma análise química pontual das placas apresentadas na Figura 32 b. Esta análise encontra-se na Figura 34.

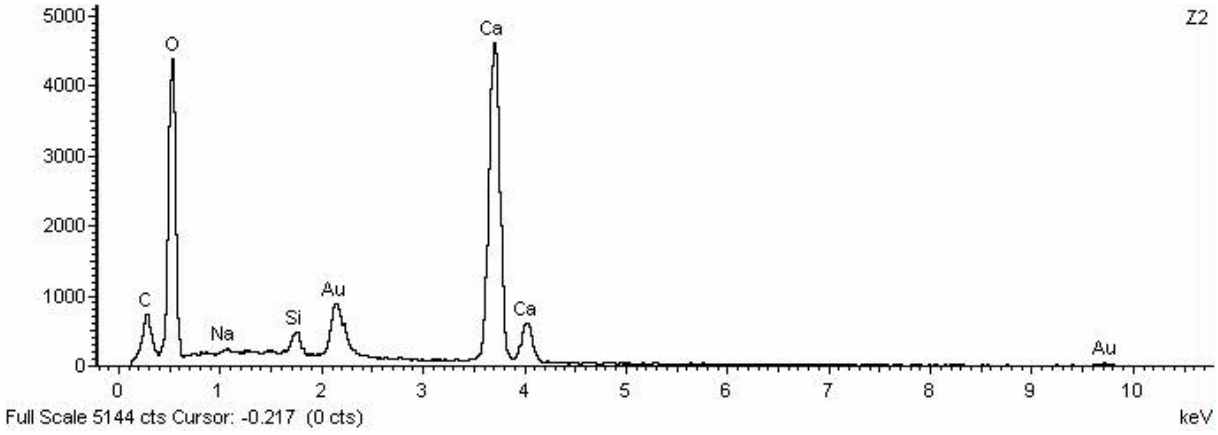


Figura 34. Análise química elementar nas placas da figura 14b realizada pelo MEV.

3.3.4. RESISTÊNCIAS MECÂNICAS

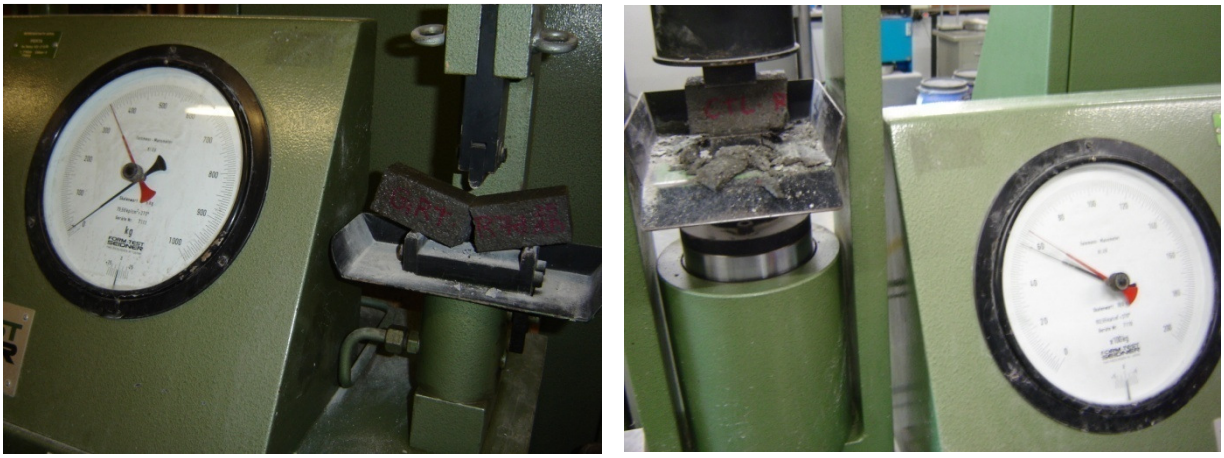
Seguiu-se a norma NP EN 196-1 para a determinação das resistências mecânicas (flexão e compressão) dos materiais ensaiados. Para isto, foram feitos 3 provetes 40x40x160mm para cada idade a ensaiar. Primeiro, ensaia-se a flexão como mostra a Figura 35a e Figura 36a e, em seguida, com cada metade restante do provete, ensaia-se a compressão – Figura 35b e Figura 36b.



(a) (b)

Figura 35. Equipamento de ensaio de resistência mecânica do LAB1. (a) Ensaio a flexão NP EN 196-1; (b) Ensaio a compressão NP EN 196-1.

Configura-se a prensa para aplicar, no ensaio à flexão, 3 kN/min e no ensaio a compressão 144 kN/min. O sistema fornece os dados do ensaio como a carga máxima a rotura, em Newtons.



(a) (b)

Figura 36. Equipamento de ensaio de resistência mecânica do LAB2. (a) Ensaio a flexão NP EN 196-1; (b) Ensaio a compressão NP EN 196-1.

Para obtenção das resistências a flexão e compressão dos provetes em megapascal, utilizou-se a equação 2 para o cálculo da resistência a flexão e a equação 3 para o cálculo da resistência a tracção, de acordo com a NP EN 196-1.

$$R_{flexão} = \frac{1{,}5 \times F \times l}{b^3} \qquad (2)$$

Em que:

F é a carga máxima à rotura, obtida no ensaio, convertida em Newtons;

l é o espaçamento entre os roletes inferiores em milímetros (igual a 100mm) e

b é a dimensão lateral do provete em milímetros (igual a 40mm).

$$R_{compressão} = \frac{F}{A} \qquad (3)$$

Em que:

F é a carga máxima à rotura, obtida no ensaio, convertida em Newtons e

A é a área em contacto do provete com a prensa, em milímetros quadrados.

A Figura 37 e Figura 38 apresentam as curvas força-extensão obtidas no ensaio de resistência mecânica (flexão e compressão) aos 60 dias, realizado no LAB1. É de se recordar que os ensaios foram realizados com controlo de força como exigido pela norma NP EN 196-1.

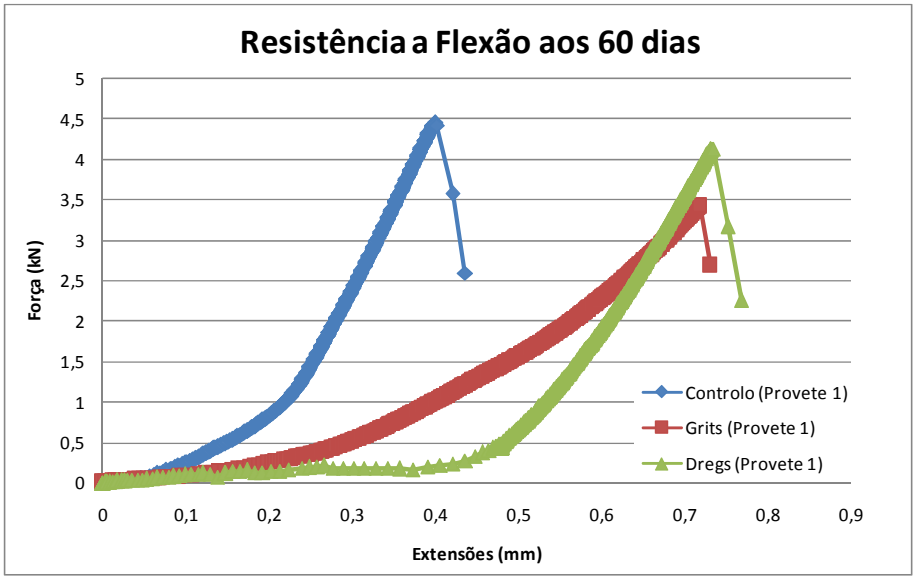


Figura 37. Curvas do ensaio de resistência a flexão aos 60 dias referente ao primeiro dos três provetes ensaiados. (LAB1)

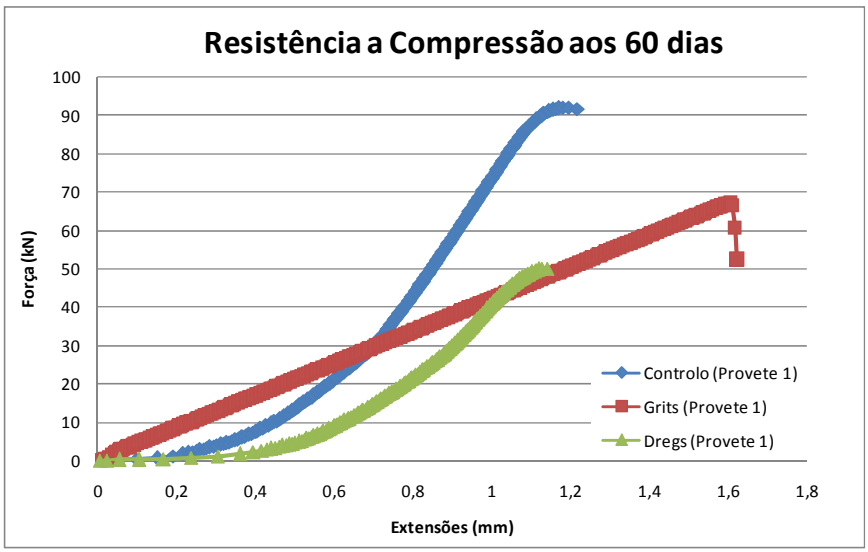


Figura 38. Curvas do ensaio de resistência a compressão aos 60 dias referente ao primeiro dos três provetes ensaiados. (LAB1)

O Quadro 9 apresenta resultados dos ensaios de resistência mecânica. Em **negrito** são resultados dos ensaios realizados no LAB1 e em *itálico*, são resultados dos ensaios realizados no LAB2.[9]

[9] Devido a características dos equipamentos utilizados para a realização dos ensaios de resistência mecânica, o controlo de velocidade de força no LAB2 é realizado manualmente enquanto que no LAB1 o controlo está programado no equipamento.

Quadro 9. Resistências Mecânicas aos 7 dias, 28 dias, 60 dias e 90 dias (em MPa).

	7 dias		*28 dias*		*60 dias*		*90 dias*	
	$R_{flexão}$ (MPa)	$R_{compressão}$ (MPa)	$R_{flexão}$ (MPa)	$R_{compressão}$ (MPa)	$R_{flexão}$ (MPa)	$R_{compressão}$ (MPa)	$R_{flexão}$ (MPa)	$R_{compressão}$ (MPa)
Controle	**7,56 ± 0,70** *7,86 ± 0,37*	**38,56 ± 3,62** *43,63 ± 2,47*	**10,19 ± 0,72** *8,74 ± 0,23*	**42,59 ± 1,81** *48,28 ± 1,80*	**11,06 ± 0,64**	**54,53 ± 2,62**	**11,18 ± 1,53**	**61,22 ± 1,89**
Grits	**8,25 ± 1,29** *7,86 ± 0,77*	**31,83 ± 2,58** *34,54 ± 1,63*	**9,04 ± 0,80** *8,01 ± 0,07*	**37,02 ± 1,13** *40,70 ± 1,38*	**7,99 ± 0,50**	**41,75 ± 0,71**	**12,24 ± 0,29**	**52,57 ± 2,63**
Dregs	*4,98 ± 0,65*	*18,60 ± 0,32*	*7,24 ± 0,50*	*29,17 ± 0,59*	**8,94 ± 1,09**	**30,71 ± 1,90**	**8,52 ± 1,49**	**34,58 ± 1,23**

3.3.5. DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE PRESA

Com o objectivo de avaliar a influência dos materiais utilizados no tempo de início e fim de presa, foi realizado o ensaio descrito pela norma NP EN 196-3. O tempo de início de presa é considerado o período entre a amassadura e a perda de plasticidade e o fim de presa é o tempo necessário para que a pasta adquira a firmeza suficiente para resistir a uma certa pressão [10].

De acordo com a norma, fabricou-se uma pasta de consistência normal. Para a sua fabricação, foram realizadas diversas amassaduras com diversas quantidades de água até que, a pasta quando colocada no molde tronco-cônico, faça a sonda (com 10 mm de diâmetro) do aparelho de Vicat, atinjir 6 ± 1mm da base.

Após a obtenção da pasta com as características descritas, segue-se para a determinação do início de presa em que se vão fazendo leituras em intervalos de tempo sucessivos, com o aparelho de Vicat munido de uma agulha com secção de 1mm² e 55mm de altura. Quando esta agulha estabiliza ao fim de 30 segundos a uma distância de 4 ± 1 mm da base, o tempo desde o instante do início da amassadura até este momento é considerado o tempo de início de presa.

O fim de presa é determinado com uma agulha semelhante provida de um anel com 5mm de diâmetro de modo que a extremidade da agulha se projecta 0,5mm para além da aresta deste acessório. Atinge-se o fim de presa quando a agulha, poisada na superfície do bloco de ensaio, deixa a sua marca, sem que o acessório circular imprima qualquer sinal, isto é, a agulha penetra menos de 0,5mm [10].



Figura 9 – Aparelho de Vicat munido da agulha com anel para determinação do fim de presa.

O Quadro 10 apresenta a quantidade de água necessária para obter a pasta de consistência normal, assim como a relação água/ligante e os tempos de início e fim de presa para cada caso. Note-se que para a pasta com grits utilizou-se 90% de CEM I e o restante de grits. Para a pasta de dregs empregou-se 90% de CEM I e o restante de dregs e ainda a quantidade de retardador proporcional à definida anteriormente (0,4% da massa do ligante).

Quadro 10. Resultado do ensaio de determinação dos tempos de presa.

	Consistência Normal		*Tempo de Presa*	
	Quantidade de água	Relação água/ligante	Início de Presa	Fim de Presa
Pasta de Controlo	143 g	0,32	2h 45min	3h 50min
Pasta dos grits	150 g	0,33	3h 47min	5h 05min
Pasta dos dregs	149 g	0,33	52min	1h 25min

3.3.6. EXPANSIBILIDADE

A pasta de cimento, após a presa, não deve sofrer grandes variações de volume, principalmente expansões. As expansões, se impedidas, podem causar a destruição do material. Este tipo de expansões podem ser causadas por hidratação retardada ou lenta (ou outras reações) de alguns compostos presentes na pasta como óxido de cálcio livre, óxido de magnésio e sulfato de cálcio [10]. O ensaio realizado permite detectar a expansibilidade do óxido de cálcio livre.

Este ensaio, de acordo com a norma NP EN 196-3, consistiu na colocação da pasta de consistência normal em 2 aparelhos de Le Chatelier. Este aparelho consiste num pequeno cilindro fendido com 30mm de diâmetro interno e 30mm de altura. Depois de cheio com a pasta de cimento, o aparelho foi coberto com duas placas de vidro e comprimido por um pequeno peso de 150 gramas de encontro à pasta, sendo o conjunto mantido dentro de água a 20 ± 1ºC durante 24 horas.



Figura 39. Ensaio de expansibilidade.

Ao fim deste intervalo de tempo mede-se o afastamento entre as duas agulhas (anotando este valor como sendo A), e eleva-se a temperatura da água até 100ºC em 1 hora, mantendo-se depois esta temperatura durante 3 horas Figura 39. Após estas 3 horas retiram-se os provetes da água e mede-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 a norma NP EN 197-1 o valor de 10 mm [10].

O Quadro 11 apresenta os resultados deste ensaio.

Quadro 11. Leituras e resultados do ensaio de expansibilidade.

	Afastamento entre agulhas (em milímetros)			*Média da diferença C-A*
	A	B	C	*(em milímetros)*
Provetes de controlo	12,5	12,6	12,5	0,0
	9,0	9,0	9,0	
Provetes de grits	11,0	11,0	11,0	0,0
	8,0	8,0	8,0	
Provetes de dregs	18,0	18,2	19,0	0,8
	5,0	5,0	5,5	

3.3.7. CARBONATAÇÃO ACELERADA

Um dos factores ambientais que interferem na durabilidade de uma estrutura de betão é a presença de dióxido de carbono conduzindo a carbonatação do betão de recobrimento. A reação de carbonatação produz compostos com pH baixos, com isto, as armaduras no interior de um betão armado deixam de estar protegidas pela película passiva (presente quando o meio possui pH alto). Com isto, abre-se a possibilidade de corrosão das armaduras, tendo por conseqüência a redução da secção do aço e destacamentos do betão.

A determinação da resistência a carbonatação foi baseada na norma E 391-1993. São analisados um provete com dimensões 40x40x160mm de cada argamassa (um de controle, um de grits e um de dregs).

A câmara (Figura 40) apresenta uma humidade relativa (HR) de 65%, sendo a temperatura aproximadamente 20°C, com uma concentração de CO_2 de 5%. Estes parâmetros são controlados por sensores localizados no interior do aparelho.



Figura 40. Câmara de carbonatação acelerada (LABEST – FEUP).

As amostras permaneceram em cura húmida por 14 dias e, em seguida, a 50% de humidade relativa e a 20°C por 19 dias[10]. Após este período, os provetes foram introduzidos numa câmara de carbonatação acelerada com uma das faces 40x40mm assentes na base da câmara.

Após permaneceram 29 dias na câmara, cortou-se de cada provete uma fatia de cerca de 1 cm de espessura e depois pulveriza-se as suas secções rectangulares com solução de fenolftaleína. A fenolftaleína apresenta cor rosa forte nas zonas isentas de carbonatação (pH elevado) mantendo-se incolor nas zonas que foram afectadas por esta (pH baixo).

Como resultados, foram consideradas duas características: *frente de carbonatação* – linha limite da zona onde o dióxido de carbono reduziu a alcalinidade do material para valores de pH detectáveis pelo indicador de fenolftaleína (pH entre 8 e 10) – e *profundidade de carbonatação* – distância média, medida em milímetros, desde a superfície do betão ou argamassa até a frente de carbonatação [3].

O Quadro 12 exibe os valores obtidos para este ensaio.

[10] A norma E 391-1993 exige a presença dos provetes a 50% de humidade relativa e 20°C por 14 dias no entanto, manteve-se mais 5 dias, completando os 19 dias nestas condições.

Quadro 12. Resultados do ensaio de carbonatação acelerada.

	Provetes de controlo	*Provetes dos grits*	*Provete dos dregs*
Profundidade de carbonatação (mm)	4,1	4,2	6,0
Frente de carbonatação (mm)	7,0	5,0	8,0

A Figura 41 mostra os provetes, após serem pulverizados com fenolftaleína, para a medição da profundidade de carbonatação e a frente de carbonatação.

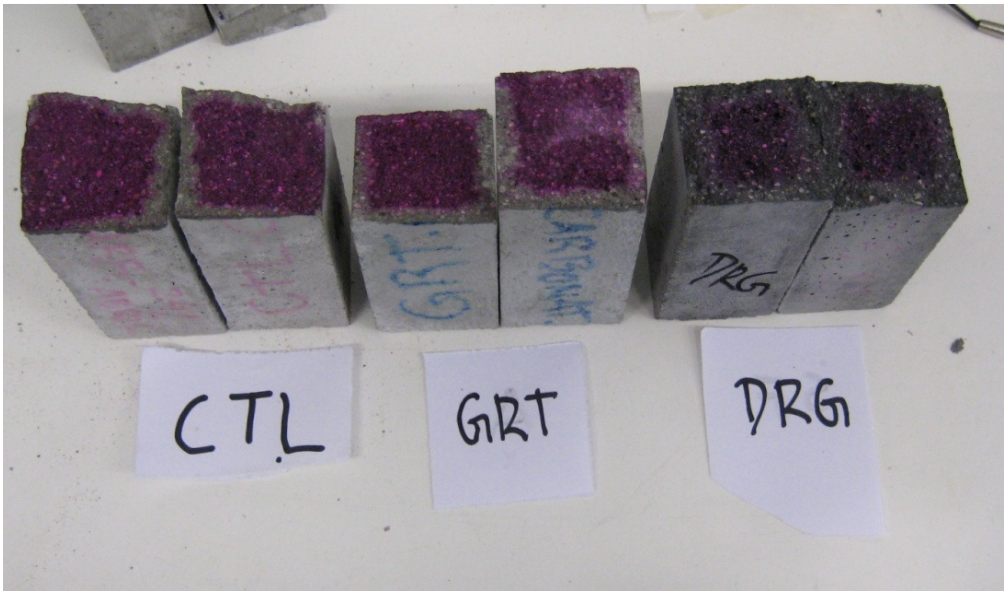


Figura 41. Provetes de carbonatação pulverizados com fenolftaleína.

3.3.8. ÍNDICE DE ACTIVIDADE (10%)

O índice de actividade de uma adição corresponde à razão (em percentagem) entre a resistência à compressão de provetes normalizados de argamassa preparados com determinada percentagem (em massa) da adição em estudo e a restante de cimento de referência e a resistência a compressão de provetes normalizados de argamassa preparados apenas com cimento de referência, ambos ensaiados com a mesma idade e condições [10].

A norma NP EN 4220, que diz respeito a pozolanas, refere que o índice de actividade deve ser determinado com uma percentagem de substituição do cimento Portland de 25%. No entanto nos ensaios presentes **apenas se considerou 10% de substituição por dregs ou grits**. Na argamassa com dregs, foi utilizado o retardador de presa como descrito no Quadro 6. O que difere este ensaio de um ensaio para determinação de resistência mecânica é a conservação dos provetes. Após a desmoldagem, os provetes foram mantidos em água a 38°C ± 2°C até 24 horas antes do ensaio, altura em que foram introduzidos na câmara húmida.

No Quadro 13 são apresentadas as resistências mecânicas dos provetes deste ensaio. Em **negrito** são resultados dos ensaios realizados no LABEST e em *itálico* estão os resultados dos ensaios realizados no LEMC.

Quadro 13. Resistências mecânicas aos 28 dias com aceleração das reações – Ensaio do índice de actividade.

	Provetes de controlo	*Provetes dos grits*	*Provetes dos dregs*
Resistência a Flexão (MPa)	**8,68 ± 0,73** *8,58 ± 0,65*	**8,70 ± 0,42** *8,43 ± 0,63*	*8,36 ± 0,48*
Resistência a Compressão (MPa)	**37,00 ± 4,76** *50,84 ± 2,45*	**31,46 ± 3,14** *42,36 ± 2,07*	*27,21 ± 0,62*

Com os valores dos ensaios realizados em ambos os laboratórios, elaborou-se o cálculo do índice de actividade das argamassas para cada laboratório. Obtiveram-se os valores apresentados abaixo (4).

$$IA_{grits(LAB1-10\%)} = \frac{31,46}{37,00} \times 100 = 85,01\% \qquad IA_{dregs(LAB2-10\%)} = \frac{27,21}{50,84} \times 100 = 53,52\%$$
$$IA_{grits(LAB2-10\%)} = \frac{42,36}{50,84} \times 100 = 83,32\% \quad (4)$$

3.3.9. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Com o intuito de se avaliar a influência dos resíduos utilizados como adições na durabilidade do betão, tem grande importância a consideração da facilidade com que a água penetra pelos seus poros e fendas. A água é o principal meio de transporte de substâncias nocivas ao betão. Com isto, torna-se importante a avaliação da absorção de água por capilaridade.

A absorção de água pelo betão ocorre devido a forças capilares que resultam na diferença de pressão entre a superfície livre da água no exterior do betão e a sua superfície nos poros capilares e é função do diâmetro capilar. Ocorre este fenômeno quando o betão está sujeito a ciclos de molhagem e secagem [11].

Para este ensaio, foram preparados 3 provetes de cada argamassa (3 de controlo, 3 de grits e 3 de dregs), com dimensões de base 100x100mm² e 50mm de altura. Seguiu-se a norma E 393 na parte aplicável de acordo com a recomendação RILEM TC 116 PCD.



Figura 42. Ensaio de absorção por capilaridade.

Os provetes foram secos em estufa a 40°C até se obter massa constante. Após isto, deixou-se a arrefecer até temperatura ambiente. Em seguida, os provetes foram colocados num recipiente e encheu-se com água rapidamente o recipiente até o nível atingir 5 ± 1mm. O enchimento deve ser realizado com cuidado necessário para não molhar os provetes na zona que deve permanecer emersa.

Após este procedimento, é feito o registo da absorção aos 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 180, 240 e 270 minutos baseado na indicação da Taywood Engineering e da Concrete Society [11].

Este ensaio é baseado na medição da velocidade de absorção da água pelo betão não saturado, imerso em água alguns milímetros. Com isto, tem-se verificado que a absorção capilar é proporcional à raiz do tempo [11].

$$A = a_0 + S \cdot \sqrt{t} \qquad (4)$$

Em que:

A é a quantidade de água absorvida por unidade de área da secção em contacto com a água desde o início do ensaio, em mg/mm²;

a_0 é a quantidade de água inicialmente absorvida pelos poros em contacto com a água, em mg/mm²;

S é o coeficiente de absorção do material, em $^{mg}/_{mm^2 \cdot \sqrt{min}}$;

e *t* é o tempo a contar deste o instante inicial do ensaio, em minutos.

Na Figura 43 são apresentadas as curvas de absorção capilar obtidas com os dados deste ensaio.

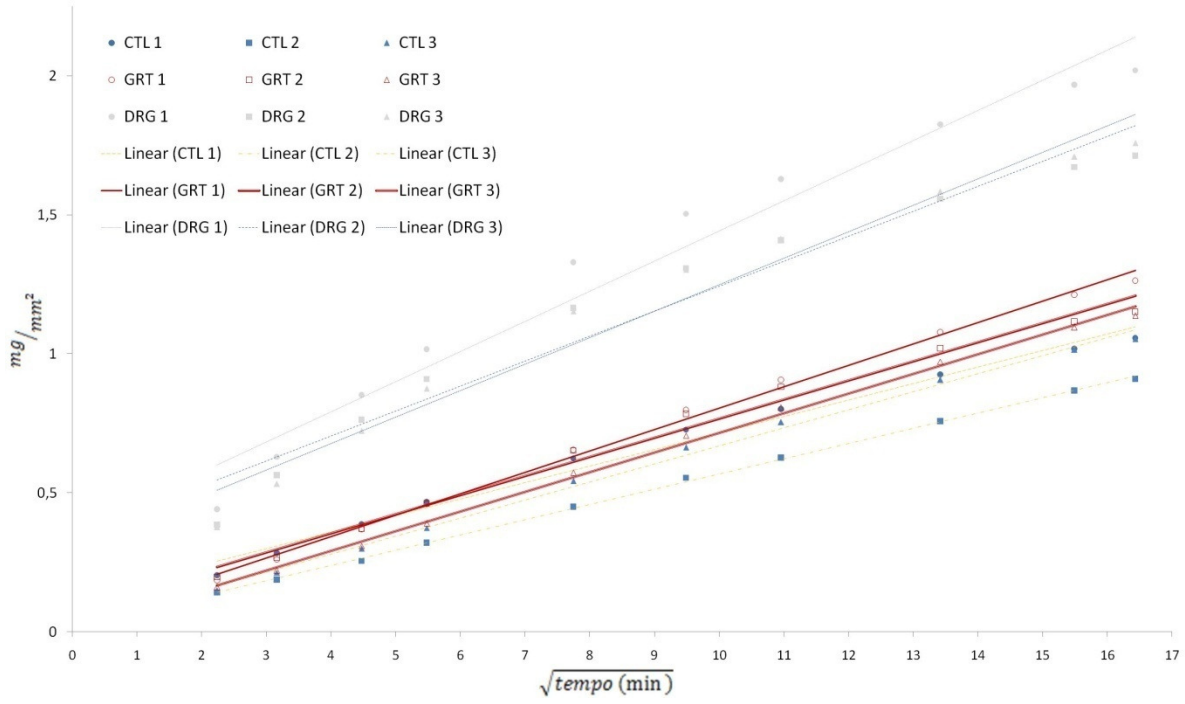


Figura 43. Curvas de absorção capilar.

As equações referentes as rectas obtidas por regressão linear (traçadas no gráfico da Figura 43) assim como os coeficientes de absorção e suas médias são apresentados no Quadro 14.

Quadro 14. Rectas e coeficientes de absorção.

Tipo de argamassa	*Nº do provete*	*Rectas de Absorção*	*Coeficientes de Absorção* $[mg/(mm^2 \times \sqrt{min})]$	*Média do Coeficiente de Absorção* $[mg/(mm^2 \times \sqrt{min})]$
Provetes de controlo	CTL1	$y = 0{,}059x + 0{,}121$	0,059	0,059 ± 0,005
	CTL 2	$y = 0{,}065x + 0{,}019$	0,065	
	CTL 3	$y = 0{,}054x + 0{,}018$	0,054	
Provetes de grits	GRT 1	$y = 0{,}077x + 0{,}034$	0,077	0,072 ± 0,004
	GRT 2	$y = 0{,}068x + 0{,}079$	0,068	
	GRT 3	$y = 0{,}070x + 0{,}008$	0,070	
Provetes de dregs	DRG 1	$y = 0{,}108x + 0{,}357$	0,108	0,097 ± 0,009
	DRG 2	$y = 0{,}095x + 0{,}296$	0,095	
	DRG 3	$y = 0{,}089x + 0{,}346$	0,089	

3.3.10. PENETRAÇÃO ACELERADA POR CLORETOS

A penetração de cloretos destrói a camada passiva que protege as armaduras do betão, se a concentração de cloretos for superior a um dado limite. Ocorre a corrosão das armaduras se esta camada for destruída e se existir humidade e oxigênio suficientes. Por esta razão, o ensaio de penetração acelerada por cloretos é um ensaio muito importante quando se quer estudar aspectos relacionados com a durabilidade.

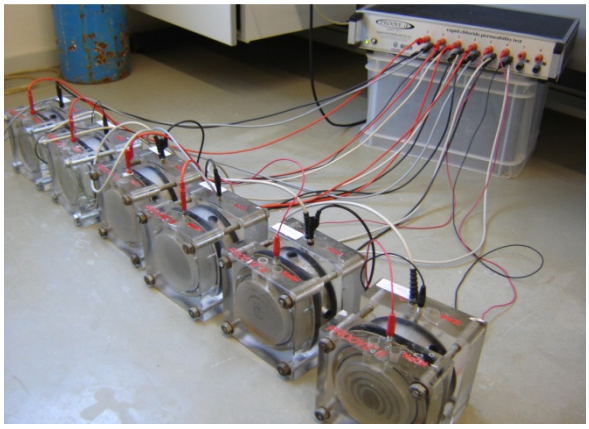
O ensaio de penetração acelerada por cloretos aqui descrito, refere-se ao ensaio de migração em regime não estacionário para a determinação do coeficiente de difusão dos cloretos, baseado na norma E-463. Para este, utilizaram-se provetes moldados de 100 mm de diâmetro e 50 mm de altura sendo três provetes de controle, três provetes com substituição parcial de grits e 3 provetes com substituição parcial de dregs.

Conforme descrito na norma citada, após lavagem dos provetes e retirada do excesso de água da superfície, coloca-se na câmara de vácuo (Figura 44 a) para que se proceda ao tratamento por vácuo por 3 horas. Com a bomba de vácuo ainda em funcionamento, enche-se o recipiente com solução saturada de hidróxido de cálcio de modo que todos os provetes fiquem imersos. Manteve-se o vácuo por mais uma hora antes de permitir a entrada do ar no recipiente. Mantiveram-se os provetes na solução até a realização do ensaio.

Submeteu-se cada provete, entre as faces circulares (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 44 b).



(a)



(b)

Figura 44. Ensaio de penetração acelerada por cloretos. (a) Câmara de vácuo; (b) Equipamento para o ensaio de migração em regime não estacionário.

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 diluída de nitrato de prata. Após ser visível a profundidade de penetração facultada pelo precipitado branco de cloreto de prata, procedeu-se a sua medição 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 [3].

O coeficiente de difusão em regime não estacionário é calculado com base na equação 5.

$$D = \frac{0{,}0239 \times (273 + T) \times L}{(U - 2) \times t}\left(x_d - 0{,}0238 \times \sqrt{\frac{(273 + T) \times L \times x_d}{U - 2}}\right) \qquad (5)$$

Em que:

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

U é o valor da voltagem aplicada, em volts;

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

L é a espessura do provete, em milímetros;

X_d é o valor médio da profundidade de penetração, em milímetros e

t é a duração do ensaio, em horas.

Os resultados obtidos estão dispostos no Quadro 15.

Quadro 15. Resultado do ensaio de penetração acelerada por cloretos – Coeficientes de difusão.

Tipo de argamassa	*Nº do provete*	*Coeficiente de Difusão* ($\times 10^{-12} m^2/s$)	*Média do Coeficiente de Difusão* ($\times 10^{-12} m^2/s$)
Provetes de controlo	Controlo 1	15,25	16,01 ± 0,69
	Controlo 2	16,61	
	Controlo 3	16,17	
Provetes de grits	Grits 1	16,78	16,57 ± 0,43
	Grits 2	16,86	
	Grits 3	16,08	
Provetes de dregs	Dregs 1	10,84	12,78 ± 1,68
	Dregs 2	13,86	
	Dregs 3	13,63	

3.3.11. RESISTIVIDADE ELÉCTRICA

A importância da resistividade como parâmetro da durabilidade do betão tem se tornado cada vez mais evidente e tem sido progressivamente inserida pelos meios científicos europeus. Segundo a recomendação RILEM TC 154-EMC, de um processo eletroquímico natural da corrosão, uma relação é esperada entre a resistividade do betão e a velocidade de corrosão de um elemento de reforço após sua despassivação (ver segundo parágrafo – item 2.3.1). Utilizando uma simplificação baseado em estudos realizados, a velocidade de corrosão num aço despassivado deve ser inversamente proporcional a resistividade do concreto [36].

Por isto, é corrente considerar a equação 6 [11].

$$V_{corrosão} = \frac{C}{\rho} \qquad (6)$$

Em que:

V_{corr} é a velocidade de corrosão após despassivação do aço.

C é uma constante onde ainda se tem variações a respeito do seu valor de autor para autor e

ρ é a resistividade do betão.

O cálculo da resistividade eléctrica foi possibilitada pela realização dos ensaios de penetração de cloretos em condições de saturação total dos provetes já que, os poros do betão quando 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.

O Quadro 16 apresenta os resultados da resistividade calculados de acordo com a equação 7.

$$\rho = R \times \frac{A}{L} = \frac{V \times A}{L \times I} \qquad (7)$$

Em que:

ρ é a resistividade eléctrica, em Ω.m;

R é a resistência eléctrica em Ω (Ohms);

I é a corrente em amperes;

V é a diferença de potencial em volts;

L é o comprimento do provete em metros e

A é a área transversal do provete atravessado pela corrente em m².

Quadro 16. Resistividade das argamassas.

Tipo de argamassa	*Nº do provete*	*Resistividade* $(\Omega \cdot m)$	*Média da Resistividade* $(\Omega \cdot m)$
Provetes de controlo	Controlo 1	37,97	38,27 ± 1,17
	Controlo 2	37,28	
	Controlo 3	39,57	
Provetes de grits	Grits 1	39,50	39,57 ± 0,47
	Grits 2	39,14	
	Grits 3	40,07	
Provetes de dregs	Dregs 1	47,12	46,15 ± 1,21
	Dregs 2	44,79	
	Dregs 3	46,52	

4
CONCLUSÕES

4.1. INTRODUÇÃO

O capítulo presente tem por objectivo a análise dos resultados obtidos através dos ensaios descritos no capítulo anterior por meio de comparações. Comparações estas não só entre provetes, mas sim de resultados de outro autor com as devidas considerações [3]. Apresentam-se em seguida sugestões de trabalhos futuros relacionado com substituição de resíduos industriais em betão estrutural.

Os dados analisados a seguir incluem resultados do trabalho anterior [3] realizado com grits. A única alteração deste material utilizado anteriormente para o material utilizado neste trabalho foi a sua moagem. Ambos vieram da mesma unidade fabril da Portucel Soporcel.

A moagem dos grits utilizados nos ensaios do presente trabalho foi descrita em 3.2.3 tendo sido utilizado um moinho de bolas durante um período de 24 horas. Estes grits continuam a ser designados por GRT. Na análise seguinte, GTR_2 (Grits índice 2) refere-se a grits utilizados num estudo anterior [3] que foram moídos na máquina de Los Angeles (Figura 45a), secos em estufa e peneirados sendo eliminado dos ensaios experimentais o material retido no peneiro 250 μm (Figura 45b).



(a) (b)

Figura 45. Tratamento dos GRT_2 (a) Máquina de Los Angeles utilizada na moagem dos GRT_2. (b) Sistema de peneiros utilizados na separação dos GRT_2 (material passado no peneiro 250μm).

A moagem para obtenção dos GRT_2 foi suspensa quando, após 2000 voltas, a granulometria dos grits não parecia ter alterado significativamente.

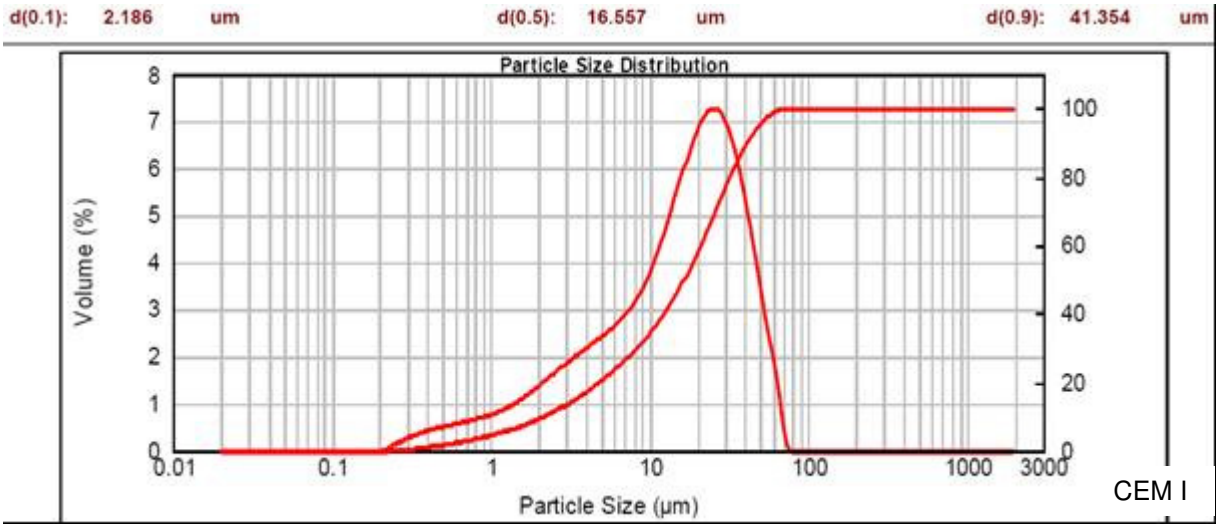
Para os provetes com substituição de 10% do cimento por dregs, utilizará o símbolo DRG. Para os provetes sem substituição parcial do cimento, será utilizado CEM I.

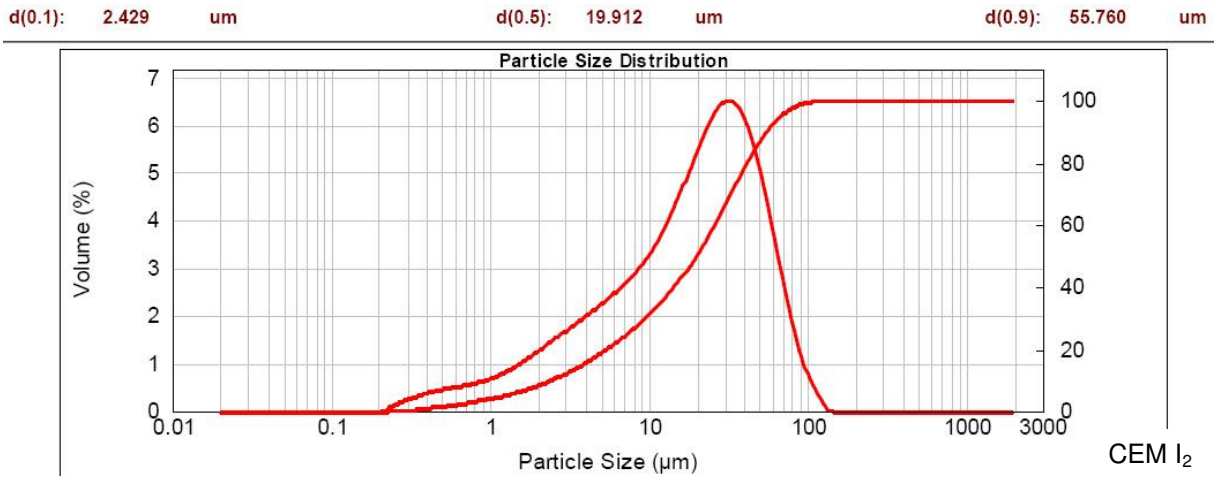
4.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados que se analisam seguidamente referem-se aos ensaios descritos no capítulo anterior e, quando oportuno, comparam-se com os resultados relativos aos GRT_2.

4.2.1. CURVA GRANULOMÉTRICA

As curvas granulométricas obtidas no granulómetro laser dos diferentes materiais são apresentadas, agora conjuntamente, na Figura 46. Também apresenta a curva do cimento utilizado no trabalho anterior (CEM I_2) já referido [3], pois embora do mesmo tipo e origem a granulometria mostrou-se mais grosseira.





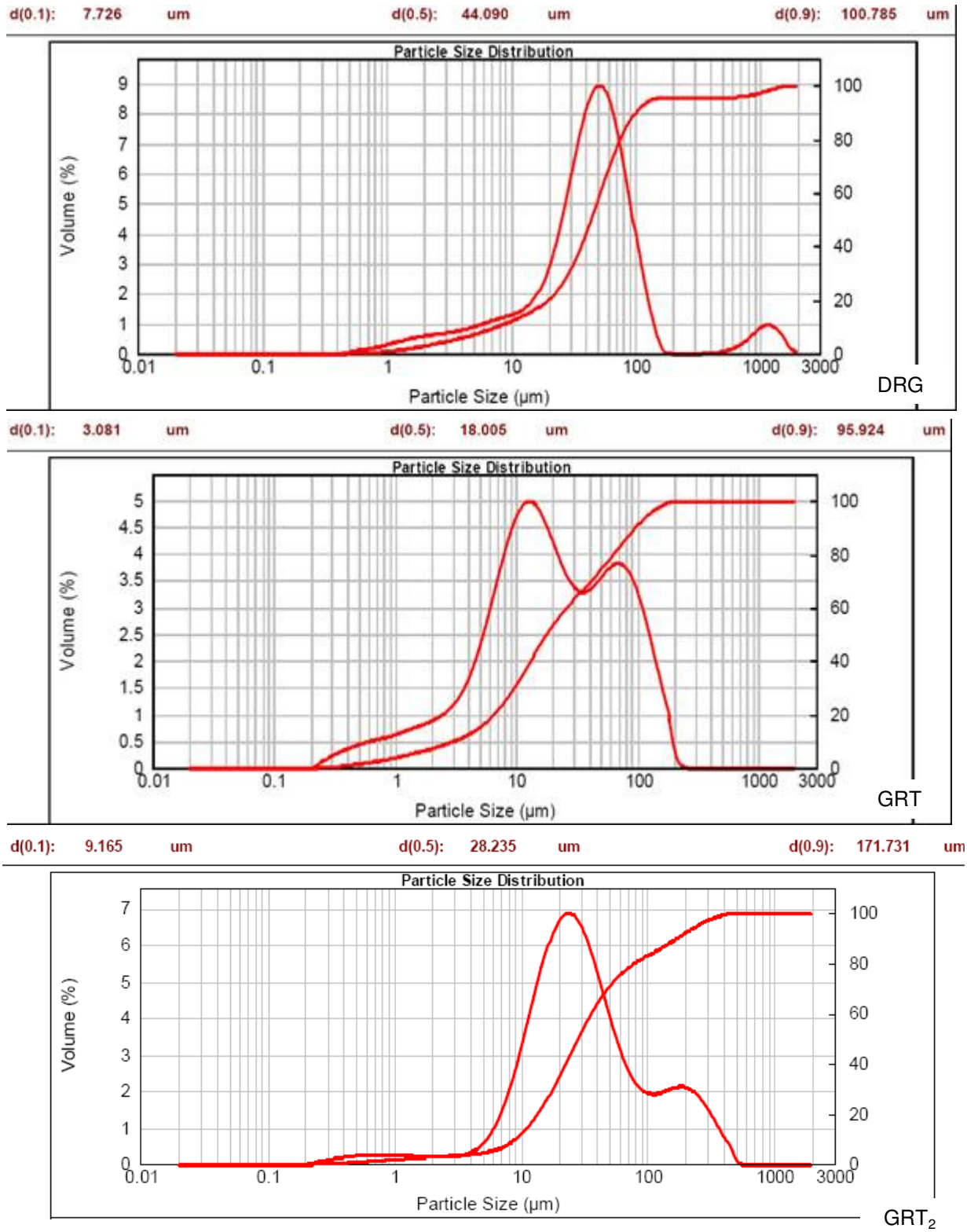


Figura 46. Curva granulométrica dos diferentes materiais: CEM I – cimento, DRG – dregs e GRT – grits, os três materiais utilizados no presente trabalho e mais CEM I_2 e GRT_2..

Uma característica das curvas granulométricas dos grits é o facto de ser bimodal, tanto a curva correspondente ao material moído por 24 horas em moinho de bolas cerâmicas (Figura 18) como

moído com a máquina de Los Angeles e a seguir peneirado (Figura 45). Esta característica leva a crer que existam na sua composição, materiais mais resistentes do que outros.

O Quadro 17 apresenta comparações entre finuras dos materiais. Os valores de d(0,1), d(0,5) e d(0,9) indicam que 10%, 50% e 90% das partículas medidas apresentam uma finura igual ou inferior ao valor do diâmetro apresentado.

Quadro 17. Comparação entre finuras dos materiais.

	d (0,1)	*d (0,5)*	*d (0,9)*
CEM I 42,5R	2,186 μm	16,557 μm	41,354 μm
GRT	3,081 μm	18,005 μm	95,924 μm
GRT_2	9,165 μm	28,235 μm	171,731 μm
DRG	7,726 μm	44,090 μm	100,785 μm

Nota-se uma diferença entre todos os resíduos utilizados. O cimento corresponde ao material com maior finura de acordo com este método analisado.

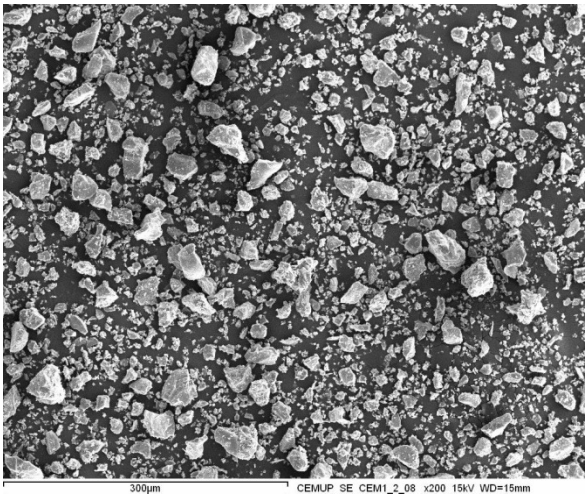
A diferença de granulometria dos materiais apresentados reflete-se na redução da superfície específica do CEM I para os DRG, como se pode observar no Quadro 18.

Quadro 18. Superfície específica (granulometria laser) dos materiais analisados.

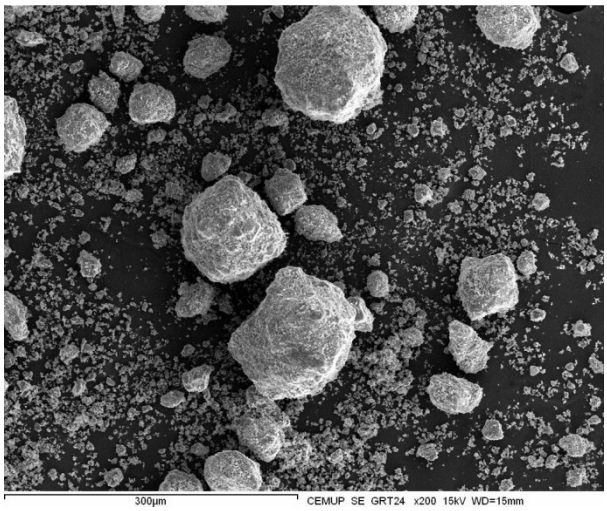
Material	*Superfície específica (m^2/kg)*
CEM I	1 220
GRT	1 020
GRT_2	539
DRG	403

4.2.2. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA

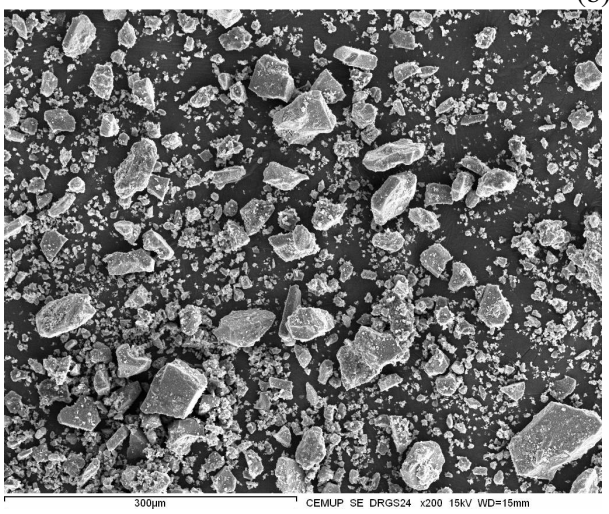
A Figura 47 apresenta as imagens obtidas no microscópio electrónico de varrimento nas análises dos pós dos materiais utilizados.



(a) CEM I



(b) GRT



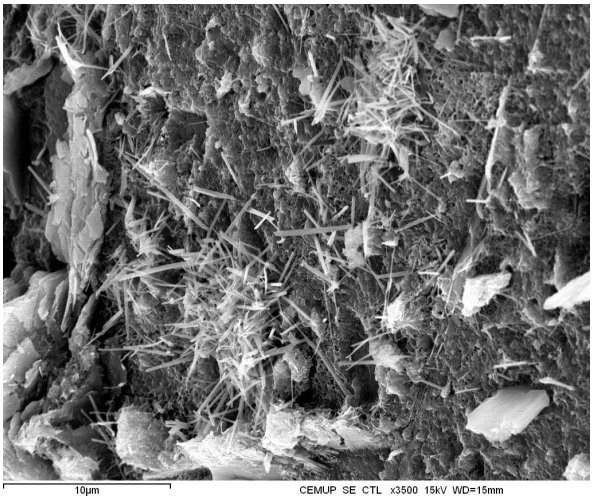
(c) DRG

Figura 47. Análise comparativa entre os grãos do CEM I, GRT e DRG ampliados 200 vezes. (a) CEM I (b) GRT (c) DRG

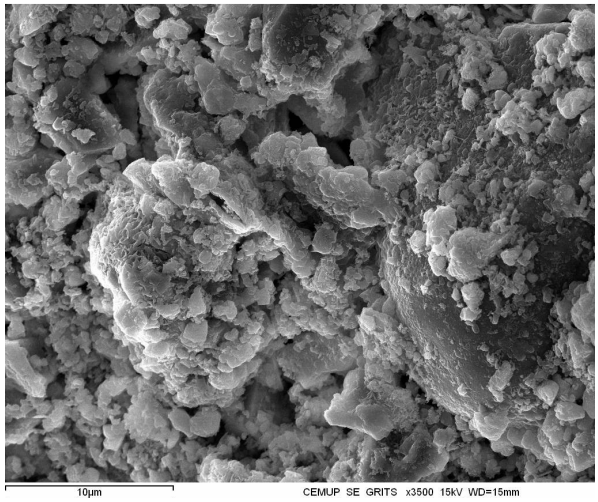
Com relação aos grits (GRT), observa-se claramente que apresentam partículas, de uma forma geral, ou relativamente grandes, ou relativamente pequenas com poucas intermédias. Este facto é confirmado com a curva granulométrica bimodal obtida para este material na análise no granulómetro laser.

O cimento utilizado (CEM I) como visto, é o que possui os menores grãos. Facto confirmado também pela análise da curva granulométria na Figura 46 e no Quadro 18.

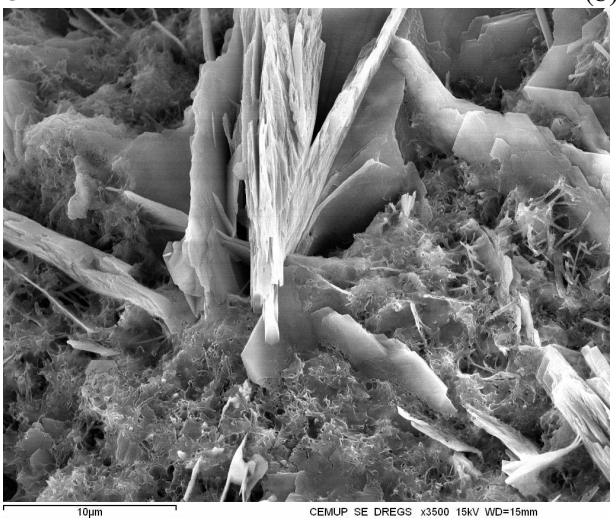
A Figura 48 apresenta as imagens obtidas pelo microscópio electrónico dos provetes onde foram realizados ensaios mecânicos de resistência aos 7 dias.



(a) CEM I



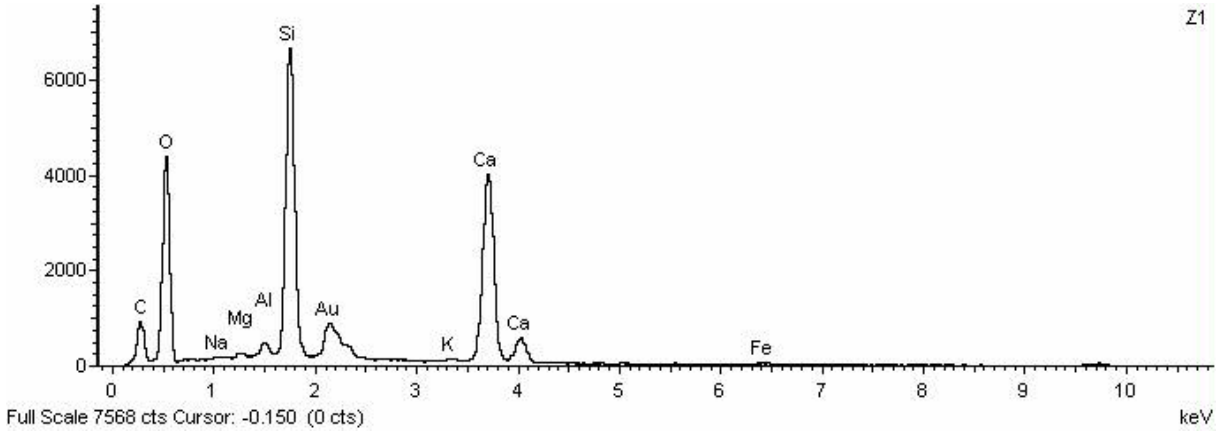
(b) GRT



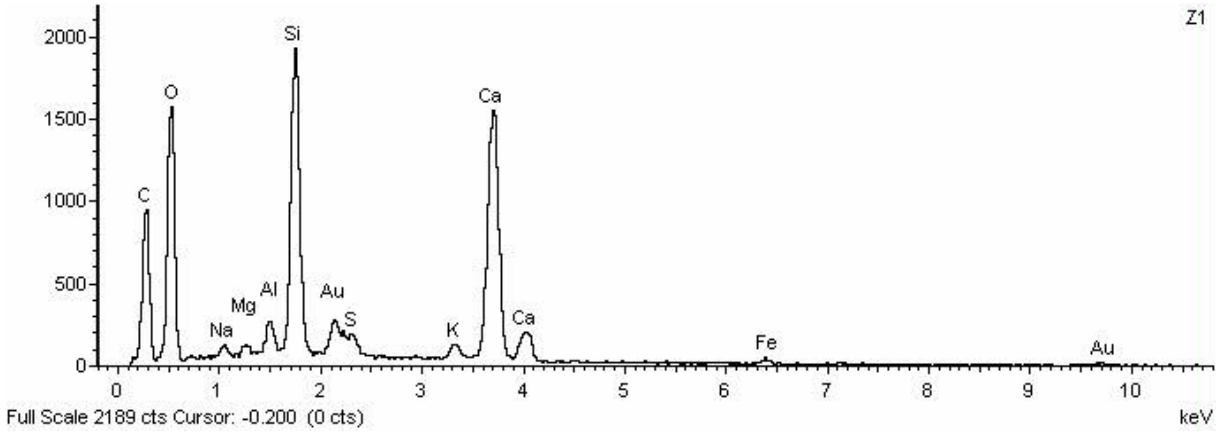
(c) DRG

Figura 48. Análise comparativa entre as argamassas compostas por CEM I, GRT e DRG ampliados 3500 vezes. (a) CEM I (b) GRT (c) DRG

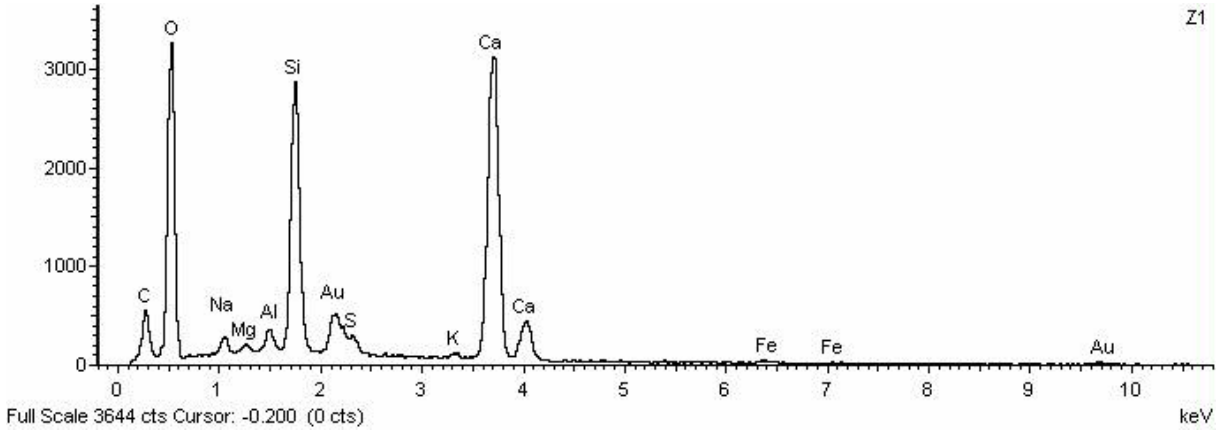
A Figura 49 apresenta as análises químicas realizadas no microscópio electrónico para efeitos de comparação.



(a) CTL



(b) GRT



(c) DRG

Figura 49. Análise comparativa entre as análises químicas globais das amostras de argamassas compostas por CEM I, GRT e DRG ampliados 35 vezes. (a) CEM I (b) GRT (c) DRG

Na amostra de controlo (CEM I) observa-se claramente a formação de agulhas. Agulhas estas relacionadas em princípio com etringite pela presença de enxofre e alumínio na análise química realizada (Figura 29). A etringite é um produto natural da hidratação do cimento que, em princípio

atinge o seu máximo ao fim de cerca de 2 dias e depois combina-se com outros compostos formando monosulfoaluminato, como se pode observar na Figura 50.

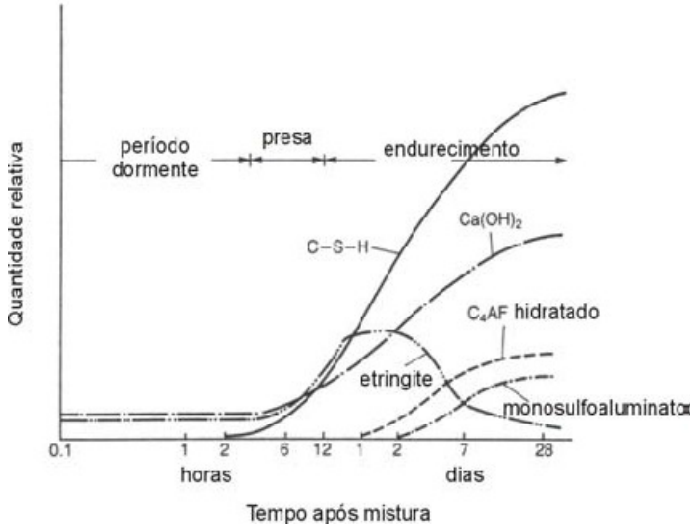


Figura 50. Desenvolvimento típico dos produtos de hidratação em pasta de cimento Portland [10].

Na amostra dos dregs (DRG) observa-se uma formação de placas, nas quais, pela análise química foi detectada uma presença considerável de cálcio.

4.2.3. RESISTÊNCIA MECÂNICA

O Quadro 19 apresenta os resultados para avaliação da resistência mecânica dos provetes.

Quadro 19. Comparação das resistências a compressão.

Idade	*CTL (MPa)*		*GRT (MPa)*		*DRG (MPa)*		*Desempenho GRT*		*Desempenho GRT_2*	*Desempenho DRG*	
	LAB2	LAB1	LAB2	LAB1	LAB2	LAB1	LAB2	LAB1	LAB2	LAB2	LAB1
7 dias	43,63	38,56	34,54	31,83	18,60		-20,8%	-17,5%	-4%	-57,4%	
28 dias	48,28	42,59	40,70	37,02	29,17		-15,7%	-13,1%	-21%	-39,6%	
60 dias		54,53		41,75		30,71		-23,4%			-43,7%
90 dias		61,22		52,57		34,58		-14,1%	-34%		-43,5%

1. Os desempenhos foram calculados deste modo:

$$\frac{V_{substituição} - V_{controle}}{V_{controle}} x100\%$$

Onde:

$V_{substituição}$ é a resistência da argamassa com substituição por grits ou dregs;

$V_{controle}$ é a resistência da argamassa de controlo.

2. Para GRT_2 também se comparou com os valores de cálculo obtidos na argamassa com grits mais grossos em relação a argamassa realizada naquele estudo sem substituição, onde o cimento era mais grosseiro, como se pode observar na Figura 46.

Pela análise do Quadro 19, verifica-se que a substituição por dregs e grits nas condições em que foram obtidos e tratados, resulta numa perda de resistência (que chegou a 23,4% nos grits e 57,4% nos dregs) em relação a do provete sem substituição.

4.2.4. CONSISTÊNCIA NORMAL E TEMPO DE PRESA

A necessidade de água para a consistência normal foi ligeiramente superior para os grits e dregs relativamente ao controlo.

Com relação ao tempo de presa da pasta com substituição parcial do cimento por grits, e confirmando com dados referentes a outros estudos (utilizando GRT_2) [3], a incorporação deste material provocou um aumento do tempo de início e fim de presa.

Ao contrário acontece com substituição parcial do cimento por dregs, a qual fez reduzir consideravelmente o tempo de início e fim de presa, mesmo com o uso de retardador de presa a 0,4% relativo a massa do ligante (ou seja 1,8 gramas para 405 gramas de cimento e 45 gramas de dregs).

A Figura 51a apresenta os valores de tempo de presa obtidos e Figura 51b apresenta os tempos de início de presa definidos pela norma NP EN 197-1.

Provetes	*Tempo de Presa*	
	Início de Presa	Fim de Presa
CEM I 42,5R	2h 45min	3h 50min
GRT	3h 47min	5h 05min
GRT_2	3h 30min	4h 30min
DRG	52min	1h 25min

(a)

Classe de resistência	Tempo de início de presa min
32,5 N	≥ 75
32,5 R	
42,5 N	≥ 60
42,5 R	
52,5 N	≥ 45
52,5 R	

(b)

Figura 51. Análise dos tempos de presa. (a) Valores de tempo de presa obtidos. (b) Valores mínimos de tempo de início de presa definidos pela norma NP EN 197-1.

4.2.5. EXPANSIBILIDADE

Os materiais analisados não apresentaram sinais de expansibilidade, por conseqüência, encontram-se dentro do limite preconizado pela norma NP EN 197-1 apresentado na Figura 52.

Provetes	*Média da diferença entre C-A* *(ver Capítulo 3 – Quadro 10)*
CEM I	0,0 mm
GRT	0,0 mm
GRT_2	0,5 mm
DRG	0,8 mm

(a)

Classe de resistência	Expansibilidade mm
32,5 N	≤ 10
32,5 R	
42,5 N	
42,5 R	
52,5 N	
52,5 R	

(b)

Figura 52. Avaliação da expansibilidade. (a) Valores de expansibilidade obtidos em ensaios para as amostras referidas. (b) Limites para expansibilidade (extraído e adaptado da norma NP EN 197-1 – 7.1.2. Quadro 2).

4.2.6. CARBONATAÇÃO ACELERADA

No Quadro 20, que se refere ao ensaio de carbonatação, transcrevem-se resultados obtidos e apresentam-se os desempenhos, incluindo o obtido no trabalho anterior [3].

Quadro 20. Análise dos resultados do ensaio de carbonatação.

Ensaio	*CTL*	*GRT*	*DRG*	*Desempenho GRT*	*Desempenho GRT_2*	*Desempenho DRG*
Carbonatação	4,1mm	4,2mm	6,0mm	-2%	-13%	-46%

1. Os desempenhos foram calculados deste modo:

$$-\frac{V_{subsituição} - V_{controlo}}{V_{controle}} x100\%$$

Onde:

$V_{substituição}$ é a profundidade de carbonatação média da argamassa com substituição por grits ou dregs;

$V_{controle}$ é a profundidade de carbonatação média da argamassa de controlo.

2. Os valores obtidos para o estudo anterior [3], foram de 4,0mm para o controlo e 4,5mm para os grits (GRT_2).

Parece que os resultados, embora escassos, que um material mais fino (GRT) reduz a carbonatação. Os dregs apresentaram uma baixa resistência à carbonatação que pode ter ligação com o seu baixo pH em comparação com o betão (variando de 10,7 [1] a 11,7 [37] em média).

4.2.7. ÍNDICE DE ACTIVIDADE

O Quadro 21 mostra os resultados relacionados aos índices de actividade dos ensaios realizados.

Quadro 21. Resultados do ensaio de índice de actividade.

Ensaio	*GRT*		*GRT₂*		*DRG*	
	LAB2	LAB1	LAB2	LAB1	LAB2	LAB1
Índice de Actividade	83,3%	85,0%	82,1%	-	51,8%	-

É de se notar que os valores para o índice de actividade dos grits estão próximos do limite mínimo considerado para as pozolanas naturais e para as cinzas volantes siliciosas com substituição de 25% (ambas com limite inferior igual a 85% aos 28 dias) como apresentado na Figura 53. Para a execução dos ensaios apresentados na tabela anterior, foram utilizados substituições de 10% do cimento pelo resíduo.

Adição	Composição	Documento normativo	Substituição de CEMI* pela adição	Índice de Actividade IA
Pozolana natural *adição*	Sobretudo SiO_2 (>25%) e Al_2O_3 mas tb. Fe_2O_3 + ...	NP 4220:1993	25%	$IA_{28d} \geq 85\%$ **
Cinza volante siliciosa *adição*	SiO_2 >25% Al_2O_3 CaO(reactivo)≤10%	NP EN 450-1:2006	25%	$IA_{7d} \geq 75\%$ $IA_{28d} \geq 85\%$

* 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 53. Índice de actividades exigidos para diversas adições [Adaptado 10].

4.2.8. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

O Quadro 22 apresenta os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade.

Quadro 22. Análise do ensaio de absorção de água por capilaridade.

Ensaio	*CTL*	*GRT*	*DRG*	*Desempenho GRT*	*Desempenho GRT₂*	*Desempenho DRG*
Absorção de Água por Capilaridade $[mg/(mm^2 \times \sqrt{min})]$	0,059	0,072	0,097	-22%	-320%	-64,4%

1. Os desempenhos foram calculados deste modo:

$$-\frac{V_{subsituição} - V_{controlo}}{V_{controle}} x100\%$$

Onde:

$V_{substituição}$ é o coeficiente de absorção por capilaridade da argamassa com substituição por grits ou dregs;

$V_{controle}$ é o coeficiente de absorção por capilaridade da argamassa de controlo.

Neste ensaio, a argamassa com substituição parcial do cimento por grits, GRT, apresentou um resultado pouco inferior ao de controlo e nos dregs, este resultado foi ainda mais atenuado. Observa-se que os grits GRT_2, material mais grosso, tinha apresentado resultados muito piores, chegando a cerca de 3 vezes inferiores ao de controlo utilizado em estudos anteriores.

4.2.9. RESISTIVIDADE ELÉCTRICA

Os valores de resistividade e suas respectivas análises são apresentados no Quadro 23.

Quadro 23. Análise das resistividades eléctricas.

Ensaio	*CTL*	*GRT*	*DRG*	*Desempenho GRT*	*Desempenho GRT_2*	*Desempenho DRG*
Resistividade Eléctrica $\Omega \times m$ (Ohm metro)	38,27	39,57	46,15	+3%	+3%	+20,6%

1. Os desempenhos foram calculados deste modo:

$$\frac{V_{substituição} - V_{controle}}{V_{controle}} x100\%$$

Onde:

$V_{substituição}$ é a resistividade da argamassa com substituição por grits ou dregs;

$V_{controle}$ é a resistividade da argamassa de controlo.

Os valores obtidos mostram que a resistividade é maior nos dregs, DRG, se mantendo constante nos grits com diferentes granulometrias. Logo, os dregs apresentam maior resistência à passagem de corrente relativamente aos provetes de controlo, CTL, e de grits, GRT e GRT_2.

Segundo a recomendação RILEM TC 154-EMC, é esperada uma relação entre a resistividade do betão e a velocidade de corrosão de um elemento de reforço após sua despassivação a velocidade de corrosão, a qual deve ser inversamente proporcional. Com isto, e supondo futuras utilizações para estes materiais, os dregs estariam em ligeira vantagem perante os grits analisados.

4.2.10. PENETRAÇÃO ACELERADA POR CLORETOS

No Quadro 24 são apresentadas as análises dos resultados deste ensaio.

Quadro 24. Análise dos Coeficientes de difusão médios.

Ensaio	*CTL*	*GRT*	*DRG*	*Desempenho GRT*	*Desempenho GRT_2*	*Desempenho DRG*
Difusão de cloretos $\times 10^{-12}\mathrm{m^2/s}$	16,01	16,57	12,78	-3%	-10%	+20,2%

1. Os desempenhos foram calculados deste modo:

$$-\frac{V_{subsituição} - V_{controlo}}{V_{controle}} x100\%$$

Onde:

$V_{substituição}$ é o coeficiente de difusão da argamassa com substituição por grits ou dregs;

$V_{controle}$ é o coeficiente de difusão da argamassa de controlo.

Nota-se que, analisando este parâmetro de durabilidade, os dregs utilizados contribuiram favoravelmente. À semelhança da análise dos resultados da carbonatação, a maior finura dos grits favoreceu o parâmetro de durabilidade aqui focado, com um coeficiente de difusão muito próximo do da argamassa de controlo.

4.3. CONCLUSÕES FINAIS

Para a análise final dos resultados, é apresentado o Quadro 25 com o desempenho dos provetes e a Figura 54 para a visualização e comparação gráfica.

Quadro 25. Análise final do desempenho de cada material (incluindo GRT_2 de [3]).

		CTL		***GRT***		***GRT_2***	***DRG***	
		LAB2	LAB1	LAB2	LAB1		LAB2	LAB1
Compressão aos 7 dias	Resultado	43,63	38,56	34,54	31,83		18,6	
	Desempenho			**-21%**	**-17%**	**-4%**	**-57%**	
Compressão aos 28 dias	Resultado	48,28	42,59	40,7	37,02		29,17	
	Desempenho			**-16%**	**-13%**	**-21%**	**-40%**	
Compressão aos 60 dias	Resultado		54,53		41,75			30,71
	Desempenho				**-23%**			**-44%**
Compressão aos 90 dias	Resultado		61,22		52,57			34,58
	Desempenho				**-14%**	-34%		**-44%**
Absorção	Resultado	0,061		0,072			0,106	
	Desempenho			**-18%**		**-320%**	**-74%**	
Cloretos	Resultado	16,01		16,57			12,78	
	Desempenho			**-3%**		**-10%**	**+20%**	
Carbonatação	Resultado	4,1		4,2			6,0	
	Desempenho			**-2%**		**-13%**	**-46%**	
Resistividade	Resultado	38,27		39,57			46,15	
	Desempenho			**+3%**		**+3%**	**+21%**	
Índice de Actividade	Valores obtidos	50,84	37	42,36	31,46		27,21	
	Resultado			**83%**	**85%**	**82%**	**53%**	

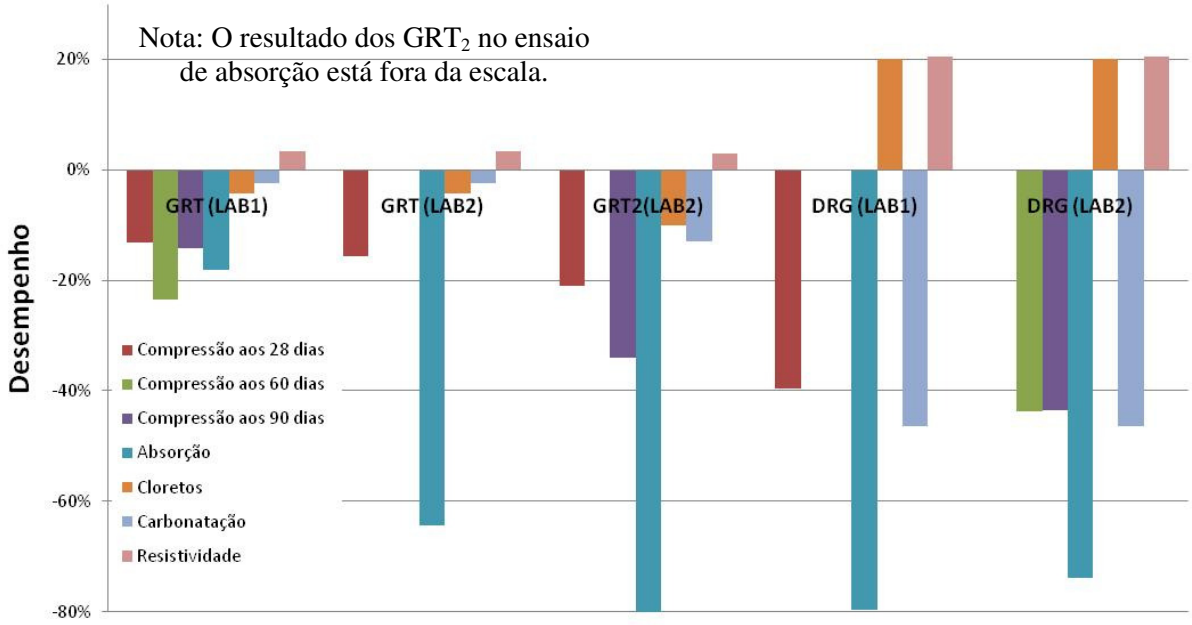


Figura 54. Desempenho de algumas propriedades das argamassas com grits e dregs relativamente à argamassa de controlo e também o desempenho dos grits (GRT_2) no estudo anterior [3].

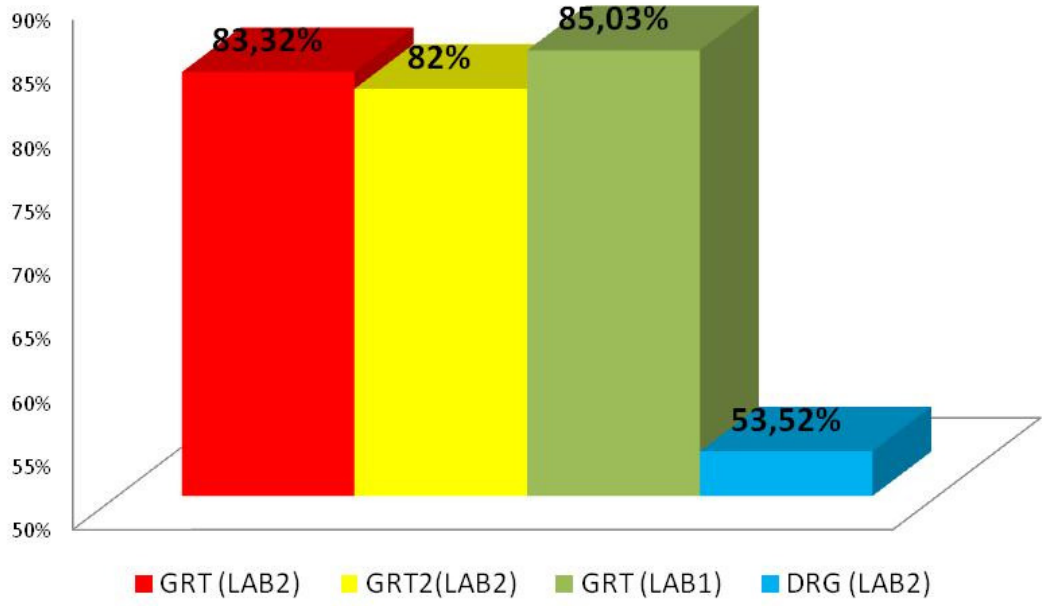


Figura 55. Análise final dos índices de actividade$_{(10\%)}$ para as diferentes amostras.

Os resultados obtidos neste estudo foram inferiores ao esperado, embora em relação aos grits se nota uma certa melhoria de algumas propriedades quando comparadas com resultados anteriores onde foram utilizados grits mais grosseiros [3].

De um modo geral e analisando a Figura 54 e a Figura 55 poder-se-á concluir o seguinte:

- O **comportamento dos dregs** parece ser muito diferente do dos grits. Todas as propriedades pioraram significativamente excepto as relativas ao coeficiente de difusão e resistividade eléctrica. Recordando que ambos estes ensaios se relacionam com a penetração de cloretos, como a argamassa contém alumínio (Figura 33) e mesmo algum cloro (Figura 25), é possível que se tenham formado cloroaluminatos (sais de Fridell[11]) [11] reduzindo a difusibilidade e aumentando a resistividade. Estas conclusões terão de ser confirmadas, por exemplo, analisando ao microscópio electrónico as superfícies dos provetes submetidas ao ensaio cujas superfícies apresentarem uma coloração cinza diferente. Assim, em primeira análise é pouco provável que mesmo em percentagens reduzidas, os dregs possam ser utilizados em betão.
- Relativamente ao **comportamento dos grits**, com excepção da resistência mecânica aos 7 dias, todas as demais propriedades (Figura 54), incluindo o índice de actividade (Figura 55), aproximaram-se dos valores de controlo, comparando com os resultados dos GRT_2, menos moídos, aproximação que se pode atribuir à menor finura.

Perante estes resultados, a confirmar com os resultados das análises químicas, pode-se-á concluir que os dregs provavelmente não terão aplicabilidade em betão mas que os grits, **após contemplar os resultados das análises químicas**, poderão ser utilizados provavelmente em percentagens menores do que 10%.

É importante frisar que os resíduos utilizados neste trabalho atualmente são, na sua maioria, depositados em aterros da própria indústria fornecedora. Estes aterros são sempre indesejáveis, exigem manutenção e são um risco de contaminação além de ocuparem vastas áreas de armazenamento. Isto é, do ponto de vista econômico e ambiental seria do maior interesse poder escoar estes resíduos em betão, como substituto parcial do cimento com as vantagens acrescidas da diminuição de emissões de CO_2 pela redução do uso de clínquer, contribuindo assim para a sustentabilidade.

4.4. TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista o exposto neste trabalho parece evidente que a investigação deve prosseguir não só contemplando os resultados das análises químicas requisitadas em laboratório credenciado para eliminar qualquer hipótese de conseqüências nefastas de utilização destes materiais em betão mas também em termos de preparação dos materiais e percentagens na mistura.

[11] Verifica-se a formação dos sais de Fridell (cloroaluminatos) quando o betão está em contacto com água do mar. Esta água contém sulfatos potencialmente agressivos mas graças a presença de cloreto de sódio que reage com os aluminatos (formando os tais cloroaluminatos), a reacção sulfática (SO_3^{-2}) expansiva com os aluminatos (formação de etringite) é impedida [11].

BIBLIOGRAFIA

[1] Gava, José Luiz. *Reciclagem de Resíduos da Insdústria do Papel e Celulose.* Março/2006. www.iac.sp.gov.br/Curso_Reciclagem/2-Gava.pdf. 13 de Maio de 2008.

[2] Soares, Fabrício. *Projeto GDC (Grits, Dregs e Cal).* Setembro/2007. www.sif.org.br/files/fabricio_soares_cdabt_unfba.pdf. 13 de Maio de 2008.

[3] Silva, António. *Estudo da Durabilidade de Betão Estrutural com Resíduos Agroindustriais.* Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Fevereiro/2008.

[4] Susano Papel e Celulose. *Relatório de Sustentabilidade.* 2006. http://www.suzanoholding.com.br/rs2006/pdf/papel_celulose.pdf. 15 de Maio de 2008.

[5] LF Equipamentos e Serviços. *Moinho de bolas LF equipamentos.* http://www.lfequipamentos.com.br/pdf/moinho_bolas.pdf . 24 de Maio de 2008.

[6] Modolo, Regina. *Valorização dos Resíduos do Sector de Pasta e Papel em Produtos da Construção Civil.* Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro, Universidade de Aveiro. 2006.

[7] Jackson, P. *Portland Cement: Classification and Manufacture.* Chapter 2. Lea's Chemistry of Cement and Concrete. 4th Edition. Edited by Peter C. Hewlett, Arnold, London.

[8] Macphee, D. Lachoswki, E. *Cement Components and their Phase Relations.* Chapter 3. Lea's Chemistry of Cement and Concrete. 4th Edition. Edited by Peter C. Hewlett, Arnold, London.

[9] Uchikawa, H. Hanehara, S. *Waste materials used in concrete manufacturing.* Chapter 8. William Andrew Publishing/Noyes.

[10] Sousa Coutinho, Joana. *Materiais de Construção 2: 1ª parte – Ligantes e caldas (2002).* Departamento de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Actualização 2006.

[11] Sousa Coutinho, Joana. *Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento da Cofragem.* Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 1998. ISBN: 972-752-073-1.

[12] Sousa Coutinho, Agostinho de. *Fabrico e Propriedades do Betão – Volume 1.* Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1997.

[13] Chandra, Satish. *Waste Materials Used in Concrete Manufacturing.* Division of Concrete Structures Chalmers University of Technology Göteborg, Sweden, 1997.

[14] Mendonça, Francisco. *Aquecimento global e saúde: uma perspectiva geográfica – notas introdutórias.* Curso de Mestrado em Saúde e Ambiente. Universidade Tiradentes. Dezembro 2002.

[15] Cimpor. 2° Relatório *de Sustentabilidade – Actividade Económica, Ambiental e Social*. Extraído do site www.cimpor.pt em 17 de junho de 2008.

[16] Aracruz Celulose. *Glossário*. http://www.aracruz.com.br/show_inv.do?act=stcNews&orig=fin&id=643&lang=1#c. 17 de junho de 2008.

[17] Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Brasil. http://www2.desenvolvimento.gov.br/arquivo/sdp/proAcao/forCompetitividade/impZonLivComercio/12papelceluloseresumo.pdf. 28 de junho de 2008.

[18] Celpa – Associação da Indústria Papeleira Portuguesa. *Importância do Sector – Economia.* http://www.celpa.pt/images/pdf/importancia_economia.pdf. 28 de junho de 2008.

[19] Klock, Umberto. *Fabricação do Papel.* Curso de Engenharia Industrial Madeireira. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, Universidade Federal do Paraná (UFPR).

[20] Armstrong, A. Douglas. Bentley, Keith M. Galeano, Sergio F. Olszewski, Robert J. Smith, Gail A. Smith Jr. Jonathan R. *Ecology of Industry: Sectors and Linkages – The Pulp and Paper Industry*. USA: National Academies Press. 1997.

[21] Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). *Reference Document on Best Available Techniques in the Pulp and Paper Industry.* European Commission. December 2001.

[22] Matos, Fátima. *Valorização de dregs – Incorporação em cimento Portland.* Curso de Formação Especializada em Gestão ambiental, Materiais e Valorização de Resíduos. Universidade de Aveiro. 2004.

[23] Burton, Philip Joseph. *Towards Sustainable Management of the Boreal Forest.* Council Canada, W. L. Adamowicz. 2003 ISBN: 0660187620

[24] Mieli, João Carlos de Almeida. *Sistemas de Avaliação Ambiental da Indústria de Celulose e Papel.* Tese de doutoramento, Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal, Universidade de Viçosa, Minas Gerais – Brasil. 2007

[25] Pinto, S. *Valorização de resíduos da indústria da celulose na produção de agregados leves.* Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro, Universidade de Aveiro. 2005.

[26] Lébeis, Vinícius Donizetti L. *Viabilidade do uso do resíduo da fabricação do papel em argamassas.* Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas. 2003.

[27] *Beneficial Use of Industrial By-Products.* Identification and Review of Material Specifications, Performance Standards, and Technical Guidance. NCASI. December 2003.

[28] Samarin A. Edited by Ravindra, K. Dhir. Trevor, G. Jappy. *Exploiting wastes in concrete. Wastes in concrete: Converting liabilities into assets.* University of Wollongong. Australia. Congress with Concrete. September, 1999.

[29] Naik, T.R. Kraus R. N. Edited by Ravindra, K. Dhir. Trevor, G. Jappy. *Exploiting wastes in concrete. Use of industrial by-products in cement-based materials.* University of Wisconsin-Milwaukee. U.S.A. Congress with Concrete. September, 1999.

[30] Teles, Madalena. *Apontamentos de Patologia dos Materiais.* Departamento de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Actualização 2007.

[31] NP EN 206-1 2007. *Betão – Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade.* Instituto Português da Qualidade.

[33] Sousa Coutinho, Joana. *Ataque por sulfatos.* Mestrado de Estruturas em Engenharia Civil, FEUP. 2001.

[34] NP EN 196-10 2007. *Determinação do teor de crómio (VI) solúvel em água no cimento.* Instituto Português da Qualidade.

[35] Sousa Coutinho, Joana. *Apontamentos de Materiais de Construção 1 – Madeira.* Departamento de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 1999.

[36] RILEM TC 154-EMC. *Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion.* December 2000. Materials and Structures/Matériaux et Constructions, Vol. 33, pp 603-611

[37] Carvalho, Ana Gabriela M. Valle, Celina F. *A compostagem como processo catalisador para a reutilização dos resíduos de fábrica de celulose e papel.* 35° Congresso e Exposição Anual de Celulose e Papel. 14 a 17 de outubro de 2002. São Paulo – Brasil.

[38] Begonha, Arlindo. Teles, Madalena. *Patologia dos Materiais – Patologia das Pedras.* Apontamentos de Patologia dos Materiais. Departamento de Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 1998.

ANEXOS

ANEXO 1. AVALIAÇÃO DA TRABALHABILIDADE

Avaliação da Trabalhabilidade							
Amostras de controlo							
N° da amassadura	Ensaio	Direcções — Diâmetros medidos (mm)				Média (mm)	Desvio Padrão (mm)
1	Resistência Mecânica aos 90 dias	217	212	211,5	215,5	214	2,7
4	Resistência Mecânica aos 60 dias	219	220	221	217	219	1,7
7	Resistência Mecânica	229	227	227	228	228	1,0
8	aos 28 dias	221	226	226	220	223	3,2
12	Resistência Mecânica	225	223	224	226	225	1,3
13	aos 7 dias	226	220	220	219	221	3,2
17	Resistência a Penetração dos Cloretos e Carbonatação	228	228	226	227	227	1,0
20							
23	Absorção por Capilaridade	224	224	220	222,5	223	1,9
26							
29	Índice de Actividade	218	228	227	226	225	4,6
30		225	230	235	227	229	4,3
					Diâmetro médio (mm):	223	
					Desvio Padrão das médias (mm):	4,5	

itálico : Ensaio realizado no LAB1.
negrito: Ensaio realizado no LAB2.

Avaliação da Trabalhabilidade							
Amostras de grits							
N° da amassadura	Ensaio	Direcções — Diâmetros medidos (mm)				Média (mm)	Desvio Padrão (mm)
2	Resistência Mecânica aos 90 dias	228	231	230	227	229	1,8
5	Resistência Mecânica aos 60 dias	215	216	218	216	216	1,3
9	Resistência Mecânica	219	217	217	224	219	3,3
10	aos 28 dias	215	215	224	222	219	4,7
14	Resistência Mecânica	221	221	225	224	223	2,1
15	aos 7 dias	234	233	228	229	231	2,9
19	Resistência a Penetração dos Cloretos e Carbonatação	209	213,5	216	214	213	3,0
20							
25	Absorção por Capilaridade	218	218	222	224	221	3,0
26							
31	Índice de Actividade	221	226	228	220	224	3,9
32		219	216	222	226	221	4,3
					Diâmetro médio (mm):	222	
					Desvio Padrão das médias (mm):	5,4	

itálico : Ensaio realizado no LAB1.
negrito: Ensaio realizado no LAB2.

Avaliação da Trabalhabilidade

Amostras de dregs

N° da amassadura	Ensaio	Direcções — Diâmetros medidos (mm)				Média (mm)	Desvio Padrão (mm)
3	Resistência Mecânica aos 90 dias	216	214	216	218	216	1,6
6	Resistência Mecânica aos 60 dias	213	217	220	215	216	3,0
11	Resistência Mecânica aos 28 dias	215	216	218	216,5	216	1,1
16	Resistência Mecânica aos 7 dias	220	228	230	221	225	5,0
21 / 22	Resistência a Penetração dos Cloretos e Carbonatação	195	190	194	196	194	2,6
27 / 28	Absorção por Capilaridade	215	213	214	214	214	0,8
33	Índice de Actividade	215	217	218	218	217	1,4

Diâmetro médio (mm): 214

Desvio Padrão das médias (mm): 9,6

itálico : Ensaio realizado no LAB1.

negrito: Ensaio realizado no LAB2.

OBS.: A dosagem de retardador de presa foi baseada na trabalhabilidade da primeira amassadura de controlo.

ANEXO 2. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA REALIZADOS NO LAB2 (LABORATÓRIO 2).

Resistência Mecânica aos 7 dias

	Peso (g)	Carga Máxima a Flexão (kgf)	Carga Máxima a Compressão (kgf)		Carga Máxima a Flexão (N)	Carga Máxima a Compressão (N)		Resistência a Flexão (MPa)	Resistência a Compressão (MPa)		Valor Médio a Flexão (MP)	Valor Médio a Compressão (MP)	Desempenho Flexão (+) versus Controle	Desempenho Compressão (+) versus Controle	
			1ª Metade	2ª Metade		1ª Metade	2ª Metade		1ª Metade	2ª Metade					
Dregs	591,3	185	3100	3000	1814,85	30411	29430	4,25	19,01	18,39	**4,98**	**18,60**	-36,6%	-57,4%	**Dregs**
	596,9	225	3000	3100	2207,25	29430	30411	5,17	18,39	19,01					
	587,3	240	3000	3000	2354,4	29430	29430	5,52	18,39	18,39	**0,65**	**0,32**			
Grits	614,4	350	5700	5600	3433,5	55917	54936	8,05	34,95	34,34	**7,86**	**34,54**	0,0%	-20,8%	**Grits**
	610,9	370	5900	5200	3629,7	57879	51012	8,51	36,17	31,88					
	603,8	305	5900	5500	2992,05	57879	53955	7,01	36,17	33,72	**0,77**	**1,63**			
Controle	602,9	330	7100	6500	3237,3	69651	63765	7,59	43,53	39,85	**7,86**	**43,63**	-	-	**Controle**
	607,2	335	7500	7100	3286,35	73575	69651	7,70	45,98	43,53					
	589,6	360	6900	7600	3531,6	67689	74556	8,28	42,31	46,60	**0,37**	**2,47**			

Resistência Mecânica aos 28 dias

	Peso (g)	Carga Máxima a Flexão (kgf)	Carga Máxima a Compressão (kgf)		Carga Máxima a Flexão (N)	Carga Máxima a Compressão (N)		Resistência a Flexão (MPa)	Resistência a Compressão (MPa)		Valor Médio a Flexão (MP)	Valor Médio a Compressão (MP)	Melhoria da Flexão (+) versus Controle	Melhoria da Compressão (+) versus Controle	
			1ª Metade	2ª Metade		1ª Metade	2ª Metade		1ª Metade	2ª Metade					
Dregs	586,5	330	4850	4900	3237,3	47578,5	48069	7,59	29,74	30,04	**7,24**	**29,17**	-17,1%	-39,6%	**Dregs**
	577,3	290	4700	4750	2844,9	46107	46597,5	6,67	28,82	29,12					
	578,8	325	4700	4650	3188,25	46107	45616,5	7,47	28,82	28,51	**0,50**	**0,59**			
Grits	584,4	350	6700	7000	3433,5	65727	68670	8,05	41,08	42,92	**8,01**	**40,72**	-8,3%	-15,7%	**Grits**
	597,7	345	6650	6600	3384,45	65236,5	64746	7,93	40,77	40,47					
	593,0	350	6300	6600	3433,5	61803	64746	8,05	38,63	40,47	**0,07**	**1,38**			
Controle	585,0	370	7500	8100	3629,7	73575	79461	8,51	45,98	49,66	**8,74**	**48,28**	-	-	**Controle**
	590,5	380	7500	8100	3727,8	73575	79461	8,74	45,98	49,66					
	593,5	390	8000	8050	3825,9	78480	78970,5	8,97	49,05	49,36	**0,23**	**1,80**			

Índice de Actividade (R28 dias)

	Peso (g)	Carga Máxima a Flexão (kgf)	Carga Máxima a Compressão (kgf)		Carga Máxima a Flexão (N)	Carga Máxima a Compressão (N)		Resistência a Flexão (MPa)	Resistência a Compressão (MPa)		Valor Médio a Flexão (MP)	Valor Médio a Compressão (MP)	Melhoria da Flexão (+) versus Controle	Melhoria da Compressão (+) versus Controle	
			1ª Metade	2ª Metade		1ª Metade	2ª Metade		1ª Metade	2ª Metade					
Grits	601,1	380	7400	7200	3727,8	72594	70632	8,74	45,37	44,15	**8,43**	**42,36**	-1,8%	-16,7%	**Grits**
	600,8	385	6650	6500	3776,85	65236,5	63765	8,85	40,77	39,85					
	589,7	335	6900	6800	3286,35	67689	66708	7,70	42,31	41,69	**0,63**	**2,07**			
Controle	597,8	365	8000	8550	3580,65	78480	83875,5	8,39	49,05	52,42	**8,58**	**50,84**	-	-	**Controle**
	601,9	350	7850	8950	3433,5	77008,5	87799,5	8,05	48,13	54,87					
	588,1	405	8200	8200	3973,05	80442	80442	9,31	50,28	50,28	**0,65**	**2,45**			

IA grits = 83,32%

ANEXO 3. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA REALIZADOS NO LAB1 (LABORATÓRIO 1).

Resistência Mecânica aos 7 dias

	Peso (g)	Carga Máxima a Flexão (N)	Carga Máxima a Compressão (N) 1ª Metade	Carga Máxima a Compressão (N) 2ª Metade	Resistência a Flexão (MPa)	Resistência a Compressão (MPa) 1ª Metade	Resistência a Compressão (MPa) 2ª Metade	Valor Médio a Flexão (MP)	Valor Médio a Compress	Melhoria da Flexão (+) versus	Melhoria da Compressão (+) versus	
Grits	614,4	4129,3678	57107,668	60825,643	9,68	35,69	38,02	**9,04**	**37,02**	-11,3%	-13,1%	**Grits**
	610,9	3470,9369	56988,153	60286,014	8,14	35,62	37,68					
	603,8	3966,2006	59158,646	60981,081	9,30	36,97	38,11	**0,80**	**1,13**			
Controle	602,9	4057,4824	72166,406	64400,607	9,51	45,10	40,25	**10,19**	**42,59**	-	-	**Controle**
	607,2	4669,4359	68551,482	65756,089	10,94	42,84	41,10					
	589,6	4316,7226	70441,094	67537,035	10,12	44,03	42,21	**0,72**	**1,81**			

Resistência Mecânica aos 28 dias

Realizado no dia 28 de junho.

	Peso (g)	Carga Máxima a Flexão (kgf)	Carga Máxima a Flexão (N)	Carga Máxima a Compressão (N) 1ª Metade	Carga Máxima a Compressão (N) 2ª Metade	Resistência a Flexão (MPa)	Resistência a Compressão (MPa) 1ª Metade	Resistência a Compressão (MPa) 2ª Metade	Valor Médio a Flexão	Valor Médio a Compressão	Melhoria da Flexão (+) versus	Melhoria da Compressão (+) versus Controle	
Grits	598,6	295	2893,95	50995,159	49942,31611	6,78	31,87	31,21	**8,25**	**31,83**	9,0%	-17,5%	**Grits**
	587,4		3927,07894	43430,623	54256,17993	9,20	27,14	33,91					
	581,6		3734,87268	54831,563	52131,8078	8,75	34,27	32,58	**1,29**	**2,58**			
Controle	589,4		3153,21051	62219,471	66035,10529	7,39	38,89	41,27	**7,56**	**38,56**	-	-	**Controle**
	586,0		3553,75344	63009,095	67827,78203	8,33	39,38	42,39					
	585,8		2973,61733	51421,876	59678,86001	6,97	32,14	37,30	**0,70**	**3,62**			

Observação: Ensaio a flexão do 1° provete com grits, foi realizado no LAB2.

Resistência Mecânica aos 60 dias

	Peso (g)	Carga Máxima a Flexão (N)	Carga Máxima a Compressão (N) 1ª Metade	Carga Máxima a Compressão (N) 2ª Metade	Resistência a Flexão (MPa)	Resistência a Compressão (MPa) 1ª Metade	Resistência a Compressão (MPa) 2ª Metade	Valor Médio a Flexão (MPa)	Valor Médio a Compressão (MP)	Melhoria da Flexão (+) versus	Melhoria da Compressão (+) versus	
Dregs	603,3	4129,3678	50017,5163	48443,766	9,68	31,26	30,28	**8,94**	**30,71**	-19,2%	-43,7%	**Dregs**
	601,7	3499,964	53648,9233	50213,657	8,20	33,53	31,38					
	605,8	(ver observação)	48069,1552	44397,032		30,04	27,75	**1,04**	**1,90**			
Grits	592,2	3428,07351	66917,7309	66883,224	8,03	41,82	41,80	**7,99**	**41,75**	-27,8%	-23,4%	**Grits**
	581,6	3187,01221	65676,8069	65390,638	7,47	41,05	40,87					
	592,2	3612,05097	67565,4128	68400,447	8,47	42,23	42,75	**0,50**	**0,71**			
Controle	596	4447,9072	91981,5034	85360,712	10,42	57,49	53,35	**11,06**	**54,53**	-	-	**Controle**
	593,7	4997,3382	86683,6578	92720,515	11,71	54,18	57,95					
	587,5	4716,3935	82529,1842	84170,938	11,05	51,58	52,61	**0,64**	**2,62**			

Observação:

O terceiro provete dos dregs "rompeu" por flexão no instante em que a prensa encostou nele.

Índice de Actividade (R 28 dias)

	Peso (g)	Carga Máxima a Flexão (N)	Carga Máxima a Compressão (N) 1ª Metade	Carga Máxima a Compressão (N) 2ª Metade	Resistência a Flexão (MPa)	Resistência a Compressão (MPa) 1ª Metade	Resistência a Compressão (MPa) 2ª Metade	Valor Médio a Flexão (MP)	Valor Médio a Compress	Melhoria da Flexão (+) versus	Melhoria da Compressão (+) versus	
Dregs	580,1	3608,44	41626,623	43601,663	8,46	26,02	27,25	8,36	27,21	-3,7%	-26,5%	Dregs
	591,2	3890,104	44466,037	43907,14	9,12	27,79	27,44					
	585,9	3490,65	44007,674	43573,813	8,18	27,50	27,23	0,48	0,62			
Grits	584,2	3592,37641	52203,4362	57188,715	8,42	32,63	35,74	**8,70**	**31,46**	0,2%	-15,0%	**Grits**
	591,0	3622,41715	47690,0518	53825,587	8,49	29,81	33,64					
	600,0	3920,12028	47835,2711	43246,074	9,19	29,90	27,03	**0,42**	**3,14**			
Controle	581,8	3849,80952	62085,6106	59516,729	9,02	38,80	37,20	**8,68**	**37,00**	-	-	**Controle**
	592,4	3917,21567	48633,4652	51634,325	9,18	30,40	32,27					
	592,8	3343,5462	65992,5699	67374,176	7,84	41,25	42,11	**0,73**	**4,76**			

IA grits = 85,01% **IA dregs = 73,53%**

ANEXO 4. DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA NORMAL

Consistência Normal

Controlo

N.º da tentativa	*Quantidade de água (gramas)*	*Distância do fundo (milímetros)*	*Hora "zero"*
1	148,10	1,0	15:44:50
2	146,00	2,0	15:57:00
3	143,10	6,0	16:09:43

Consistência Normal

Grits

N.º da tentativa	*Quantidade de água (gramas)*	*Distância do fundo (milímetros)*	*Hora "zero"*
1	125,0	36,0	10:01:59
2	146,9	8,0	10:16:43
3	148,4	7,5	10:34:52
4	149,3	8,5	10:53:19
5	150,1	7,0	11:13:35

Consistência Normal

Dregs

N.º da tentativa	*Quantidade de água (gramas)*	*Distância do fundo (milímetros)*	*Hora "zero"*	
1	148,80	37,0	16:38:45	Não foi utilizado adjuvante nesta tentativa!
2	149,00	4,9	17:01:19	

ANEXO 5. DETERMINAÇÃO DO INÍCIO E FIM DE PRESA

Início de Presa

Grits

N.º do registo	Hora do registo	Distância do fundo (milímetros)
1	11:23:30	1,0
2	11:29:10	1,0
3	11:38:10	1,0
4	11:44:33	1,0
5	11:54:10	1,0
6	12:04:21	1,0
7	12:14:00	1,0
8	12:25:00	1,0
9	12:34:50	1,0
10	12:44:50	1,0
11	12:54:55	1,5
12	13:04:42	1,5
13	13:14:42	1,0
14	13:24:32	1,5
15	13:34:30	1,8
16	13:44:30	1,8
17	13:55:42	1,9
18	14:04:30	1,9
19	14:15:07	1,8
20	14:25:30	2,0
21	14:35:30	2,0
22	14:45:30	2,0
23	14:56:32	2,8
24	15:00:38	3,0

Início de Presa

Dregs

N.º do registo	Hora do registo	Distância do fundo (milímetros)
1	17:13:00	1,0
2	17:23:35	1,0
3	17:33:00	1,1
4	17:43:10	1,1
5	17:53:30	3,9

Início de Presa

Controlo

N.º do registo	Hora do registo	Distância do fundo (milímetros)
1	16:15:35	1,0
2	16:25:00	1,0
3	16:35:00	1,0
4	16:45:10	1,0
5	16:55:30	1,0
6	17:05:30	1,0
7	17:15:30	1,0
8	17:25:30	1,0
9	17:35:40	1,0
10	17:45:38	1,5
11	17:55:40	1,5
12	18:05:35	1,5
13	18:15:35	1,4
14	18:25:35	2,0
15	18:35:40	1,8
16	18:45:40	2,0
17	18:55:40	4,0

Fim de Presa		
Controlo		
N ° do registo	*Hora do registo*	*Formato*
1	18:59:20	⊙
2	19:15:40	⊙
3	19:30:30	⊙
4	19:45:50	⊙
5	20:00:30	•

Fim de Presa		
Grits		
N ° do registo	*Hora do registo*	*Formato*
1	15:03:59	⊙
2	15:19:30	⊙
3	15:34:30	⊙
4	15:49:30	⊙
5	16:03:00	⊙
6	16:19:00	•

Fim de Presa		
Dregs		
N ° do registo	*Hora do registo*	*Formato*
1	17:56:20	⊙
2	18:11:30	⊙
3	18:26:30	•

Tempo de Presa		
Material	*Início de Presa*	*Fim de Presa*
Grits	3:47:03	5:05:25
Dregs	0:52:11	1:25:11
Controlo	2:45:57	3:50:47

ANEXO 6. ENSAIO DE EXPANSIBILIDADE

Expansibilidade							
Material	*N.º do provete*	*Afastamento das agulhas na extremidade (em milímetros)*				*Diferença (C)-(A) (em milímetros)*	Média da Diferença
		Após preparação do provete	(A)	(B)	(C)		
Grits	1	10,0	11,0	11,0	11,0	0,0	0,0
	2	8,0	8,0	8,0	8,0	0,0	
Dregs	1	18,0	18,0	18,2	19,0	1,0	0,8
	2	3,0	5,0	5,0	5,5	0,5	
Controlo	1	11,5	12,5	12,6	12,5	0,0	0,0
	2	7,5	9,0	9,0	9,0	0,0	

(A): Antes do ensaio, após 24 horas da preparação do provete.
(B): Depois de estar por 3 horas em água em embulição.
(C): Depois de arrefecer por 30 a 45 minutos.

ANEXO 7. ENSAIO DE PENETRAÇÃO ACELERADA POR CLORETOS

Penetração Acelerada por Cloretos (E-463 / Setembro 2004)

Provetes	Dados obtidos pelo ensaio												Demais dados				
	Profundidades de penetração (em milímetros)									Temperaturas			Voltagem	Espessura do provete	Duração do ensaio	Canais e Data	Provetes
	Profundidades medidas							Média	Desvio Padrão	Temperatura Inicial (°C)	Temperatura Final (°C)	Média (°C)	U (volts)	L (mm)	t (horas)		
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_d									
CTL 1	28,00	31,50	32,00	33,50	33,00	32,00	32,50	31,79	1,80	25	27	26	30	50	24	CHANNEL 1 (11/JUN)	CTL 1
CTL 2	34,50	35,00	36,00	35,00	35,00	33,00	32,00	34,36	1,38	23	31	27	30	50	24	CHANNEL 2 (11/JUN)	CTL 2
CTL 3	32,00	35,00	34,00	34,50	34,00	32,00	32,00	33,36	1,31	25	32	29	30	50	24	CHANNEL 3 (11/JUN)	CTL 3
GRT 1	32,50	35,00	36,00	34,50	35,00	35,00	34,50	34,64	1,07	24	31	28	30	50	24	CHANNEL 1 (6/JUN)	GRT 1
GRT 2	34,00	38,50	35,00	33,00	34,00	35,00	36,00	35,07	1,79	21	29	25	30	50	24	CHANNEL 2 (6/JUN)	GRT 2
GRT 3	34,00	34,00	33,00	35,00	34,00	32,00	32,00	33,43	1,13	22	30	26	30	50	24	CHANNEL 3 (6/JUN)	GRT 3
DRG 1	24,00	24,00	27,50	26,00	21,00	19,50	19,00	23,00	3,25	23	30	27	30	50	24	CHANNEL 4 (6/JUN)	DRG 1
DRG 2	23,00	27,00	29,00	30,00	32,50	32,50	28,00	28,86	3,33	24	32	28	30	50	24	CHANNEL 5 (6/JUN)	DRG 2
DRG 3	28,00	28,00	27,00	32,00	28,50	29,00	27,00	28,50	1,71	23	30	27	30	50	24	CHANNEL 6 (6/JUN)	DRG 3

Obs.: Para a temperatura inicial e final o provete DRG 3 foi consideradas a médias das demais.

Penetração Acelerada por Cloretos (E-463 / Setembro 2004)			
Resultados			
Coeficiente de difusão no estado não estacionário ($x10^{-12}$ m^2/s)	Média do Coeficiente de Difusão (x10-12 m^2/s)	Desvio Padrão	Provetes
15,25	16,01	0,69	CTL 1
16,61			CTL 2
16,17			CTL 3
16,78	16,57	0,43	GRT 1
16,86			GRT 2
16,08			GRT 3
10,84	12,78	1,68	DRG 1
13,86			DRG 2
13,63			DRG 3

ANEXO 8. RESISTIVIDADE

Resistividade							
Provetes	Voltagem (volts)	Área Transversal (m^2)	Comprimento do provete (m)	Corrente Inicial (mA)	ρ	Média	Desvio Padrão
CTL 1	30	0,007853982	0,05	124,1	37,97	38,27	1,17
CTL 2	30	0,007853982	0,05	126,4	37,28		
CTL 3	30	0,007853982	0,05	119,1	39,57		
GRT 1	30	0,007853982	0,05	119,3	39,50	39,57	0,47
GRT 2	30	0,007853982	0,05	120,4	39,14		
GRT 3	30	0,007853982	0,05	117,6	40,07		
DRG 1	30	0,007853982	0,05	100	47,12	46,15	1,21
DRG 2	30	0,007853982	0,05	105,2	44,79		
DRG 3	30	0,007853982	0,05	101,3	46,52		

ANEXO 9. ENSAIO DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

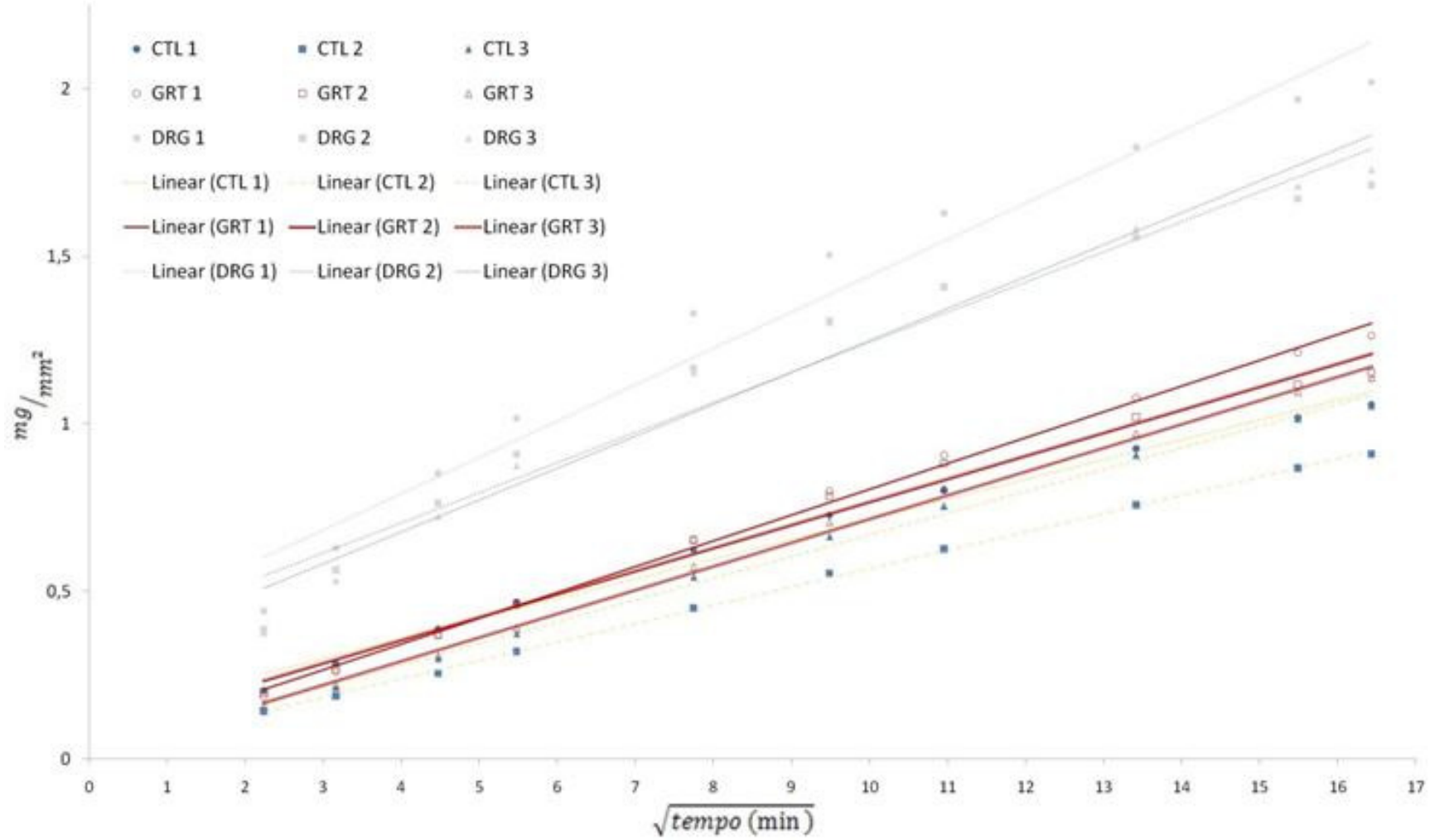
CTL 1			CTL 2			CTL 3		
Peso no tempo (g)	mg/mm²	√t	Peso no tempo (g)	mg/mm²	√t	Peso no tempo (g)	mg/mm²	√t
1288,53	0	0,00	1258,45	0	0,00	1206,85	0	0,00
1290,57	0,204	2,24	1259,86	0,141	2,24	1208,34	0,149	2,24
1291,37	0,284	3,16	1260,32	0,187	3,16	1208,98	0,213	3,16
1292,41	0,388	4,47	1261	0,255	4,47	1209,85	0,3	4,47
1293,21	0,468	5,48	1261,65	0,32	5,48	1210,59	0,374	5,48
1294,77	0,624	7,75	1262,95	0,45	7,75	1212,28	0,543	7,75
1295,8	0,727	9,49	1263,99	0,554	9,49	1213,48	0,663	9,49
1296,55	0,802	10,95	1264,72	0,627	10,95	1214,39	0,754	10,95
1297,79	0,926	13,42	1266,03	0,758	13,42	1215,92	0,907	13,42
1298,71	1,018	15,49	1267,13	0,868	15,49	1217	1,015	15,49
1299,1	1,057	16,43	1267,55	0,91	16,43	1217,39	1,054	16,43

GRT 1			GRT 2			GRT 3		
Peso no tempo (g)	mg/mm²	√t	Peso no tempo (g)	mg/mm²	√t	Peso no tempo (g)	mg/mm²	√t
1412,95	0	0,00	1149,04	0	0,00	1171,93	0	0,00
1414,8	0,185	2,24	1151,01	0,197	2,24	1173,54	0,161	2,24
1415,55	0,26	3,16	1151,72	0,268	3,16	1174,14	0,221	3,16
1416,65	0,37	4,47	1152,75	0,371	4,47	1175,02	0,309	4,47
1417,56	0,461	5,48	1153,66	0,462	5,48	1175,83	0,39	5,48
1419,5	0,655	7,75	1155,56	0,652	7,75	1177,65	0,572	7,75
1420,93	0,798	9,49	1156,88	0,784	9,49	1178,99	0,706	9,49
1422,02	0,907	10,95	1157,85	0,881	10,95	1180	0,807	10,95
1423,73	1,078	13,42	1159,24	1,02	13,42	1181,65	0,972	13,42
1425,08	1,213	15,49	1160,21	1,117	15,49	1182,88	1,095	15,49
1425,59	1,264	16,43	1160,55	1,151	16,43	1183,3	1,137	16,43

DRG 1			DRG 2			DRG 3		
Peso no tempo (g)	mg/mm²	√t	Peso no tempo (g)	mg/mm²	√t	Peso no tempo (g)	mg/mm²	√t
1388,05	0	0,00	1147,31	0	0,00	1144,54	0	0,00
1392,46	0,441	2,24	1151,16	0,385	2,24	1148,31	0,377	2,24
1394,34	0,629	3,16	1152,95	0,564	3,16	1149,86	0,532	3,16
1396,57	0,852	4,47	1154,94	0,763	4,47	1151,77	0,723	4,47
1398,22	1,017	5,48	1156,4	0,909	5,48	1153,29	0,875	5,48
1401,35	1,33	7,75	1158,97	1,166	7,75	1156,07	1,153	7,75
1403,09	1,504	9,49	1160,39	1,308	9,49	1157,57	1,303	9,49
1404,34	1,629	10,95	1161,4	1,409	10,95	1158,69	1,415	10,95
1406,31	1,826	13,42	1162,89	1,558	13,42	1160,38	1,584	13,42
1407,74	1,969	15,49	1164,03	1,672	15,49	1161,64	1,71	15,49
1408,25	2,02	16,43	1164,44	1,713	16,43	1162,12	1,758	16,43

Absorção													
Provetes	Área da base (mm²)	Tempos de absorção (em minutos) / Hora da medição											
		Peso seco	5	10	20	30	60	90	120	180	240	270	Dia seguinte
			5 min	10 min	20 min	30 min	1:00hs	1:30hs	2:00hs	3:00hs	4:00hs	4:30hs	
		10:03:00	10:08:00	10:13:00	10:23:00	10:33:00	11:03:00	11:33:00	12:03:00	13:03:00	14:03:00	14:33:00	15:48:00
CTL 1	10000	1288,53	1290,57	1291,37	1292,41	1293,21	1294,77	1295,80	1296,55	1297,79	1298,71	1299,10	1306,22
CTL 2	10000	1258,45	1259,86	1260,32	1261,00	1261,65	1262,95	1263,99	1264,72	1266,03	1267,13	1267,55	1272,97
CTL 3	10000	1206,85	1208,34	1208,98	1209,85	1210,59	1212,28	1213,48	1214,39	1215,92	1217,00	1217,39	1222,78
GRT 1	10000	1412,95	1414,80	1415,55	1416,65	1417,56	1419,50	1420,93	1422,02	1423,73	1425,08	1425,59	1432,67
GRT 2	10000	1149,04	1151,01	1151,72	1152,75	1153,66	1155,56	1156,88	1157,85	1159,24	1160,21	1160,55	1167,16
GRT 3	10000	1171,93	1173,54	1174,14	1175,02	1175,83	1177,65	1178,99	1180,00	1181,65	1182,88	1183,30	1189,93
DRG 1	10000	1388,05	1392,46	1394,34	1396,57	1398,22	1401,35	1403,09	1404,34	1406,31	1407,74	1408,25	1417,88
DRG 2	10000	1147,31	1151,16	1152,95	1154,94	1156,40	1158,97	1160,39	1161,40	1162,89	1164,03	1164,44	1173,00
DRG 3	10000	1144,54	1148,31	1149,86	1151,77	1153,29	1156,07	1157,57	1158,69	1160,38	1161,64	1162,12	1171,32

Coeficientes de Absorção			
Provetes	Coeficientes de Absorção [mg/((mm²×√min))]	Média dos Coeficientes de Absorção [mg/((mm²×√min))]	Desvio Padrão
CTL 1	0,062	0,061	0,005
CTL 2	0,055		
CTL 3	0,065		
GRT 1	0,077	0,072	0,004
GRT 2	0,070		
GRT 3	0,070		
DRG 1	0,117	0,106	0,009
DRG 2	0,099		
DRG 3	0,103		


CTL 1
CTL 2
CTL 3
GRT 1
GRT 2
GRT 3
DRG 1
DRG 2
DRG 3
Linear (CTL 1)
Linear (CTL 2)
Linear (CTL 3)
Linear (GRT 1)
Linear (GRT 2)
Linear (GRT 3)
Linear (DRG 1)
Linear (DRG 2)
Linear (DRG 3)
mg/mm²
√tempo (min)
0
0,5
1
1,5
2
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17

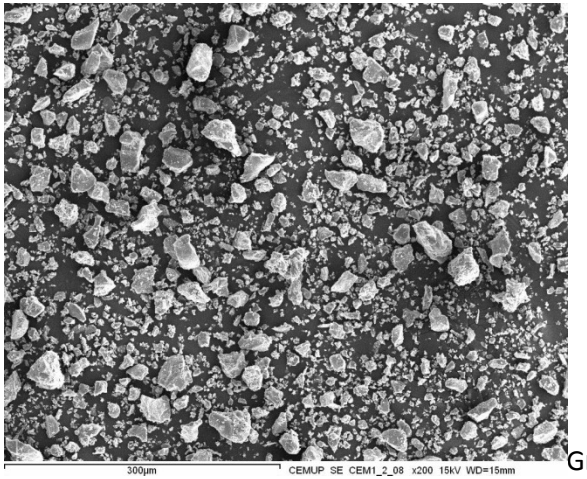
ANEXO 10. ENSAIO DE CARBONATAÇÃO ACELERADA

Ensaio de Carbonatação

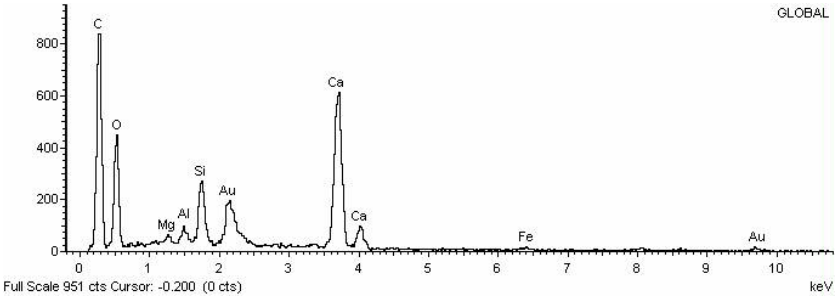
	Profundidades de carbonatação																					
	LADO 1					LADO 2					LADO 3						LADO 4				Média	Máximo
CTL	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,45	0,55	0,5	0,7	0,35	0,3	0,45	0,3	0,6						**4,13**	**7**
GRT	0,4	0,5	0,5	0,4	0,3	0,5	0,45	0,5	0,5	0,5	0,3	0,4	0,3	0,4	0,4						**4,23**	**5**
DRG	0,8	0,65	0,6	0,6	0,7	0,5	0,55	0,6	0,5		0,4	0,3	0,4	0,6		0,7	0,8	0,75	0,75		**6,00**	**8**

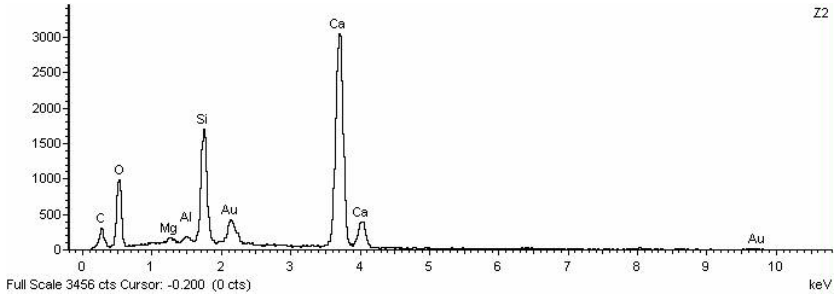
ANEXO 11. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE VARRIMENTO

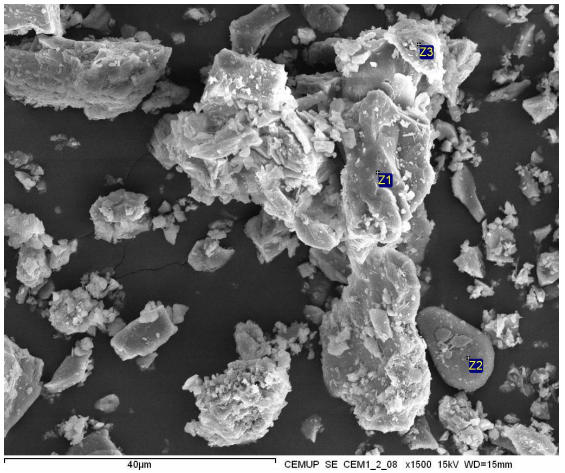
AMOSTRA 1 – CIMENTO UTILIZADO (CEM I)

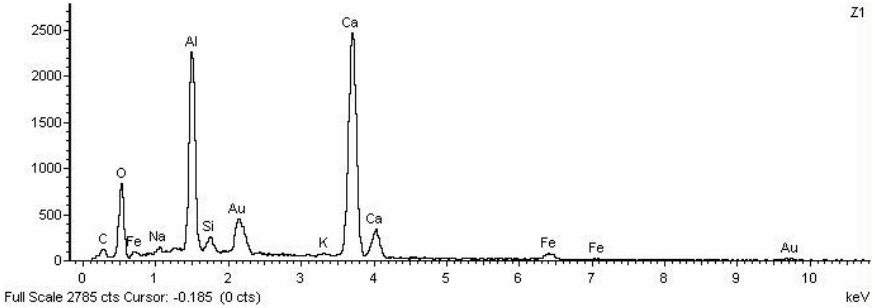


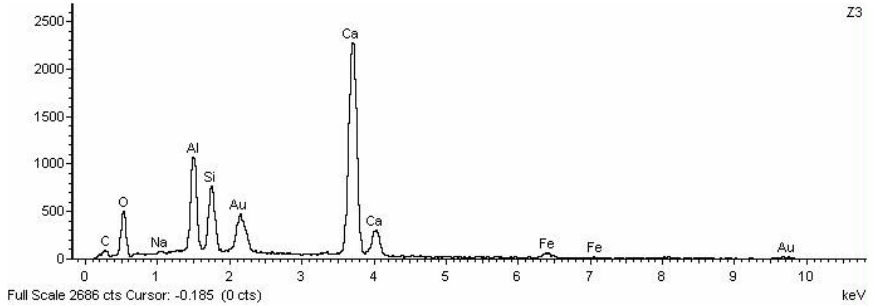
GLOBAL



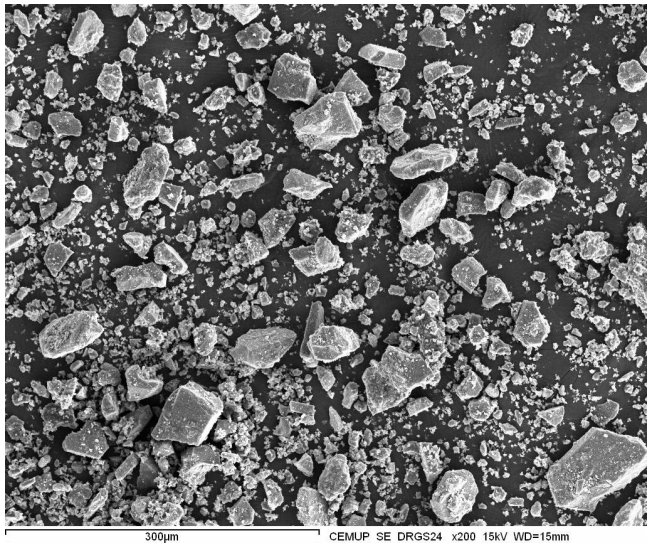




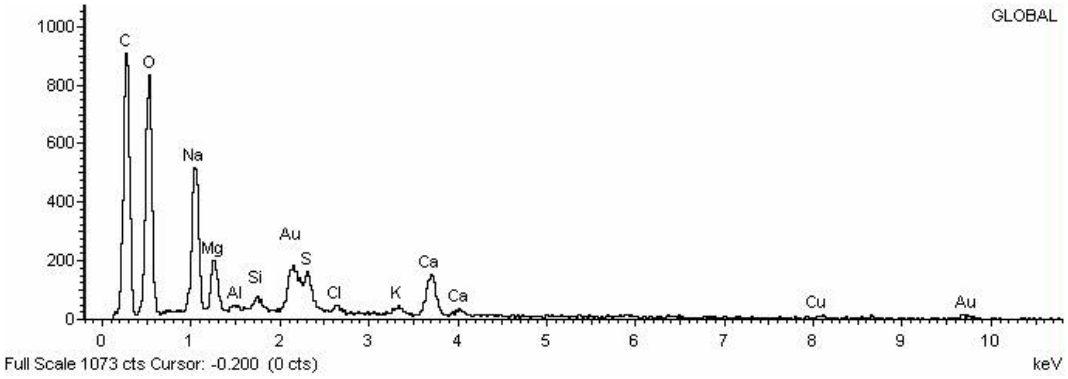


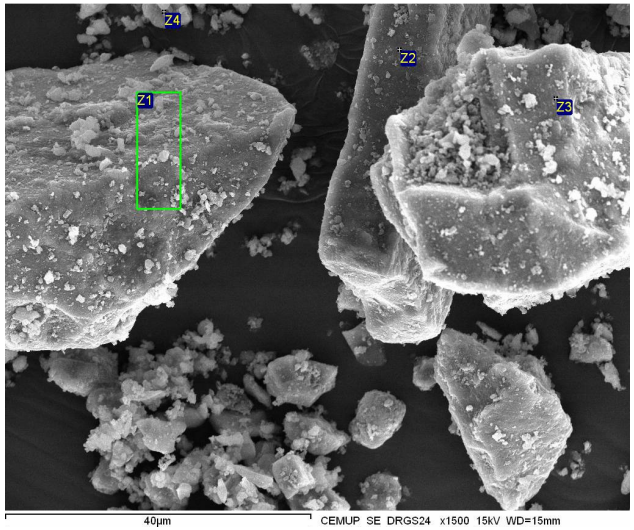


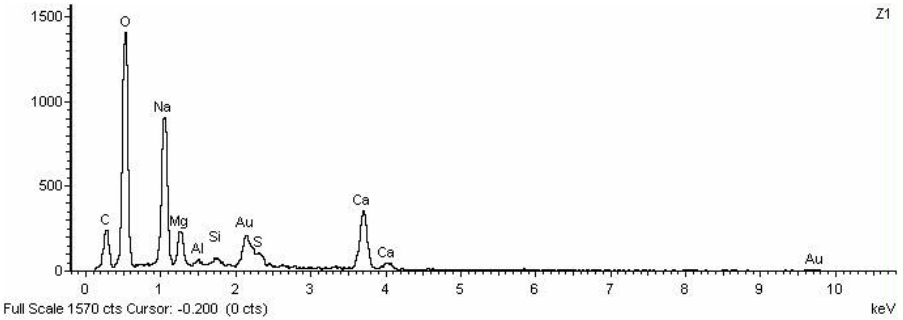
AMOSTRA 2– DREGS UTILIZADOS (DRG)

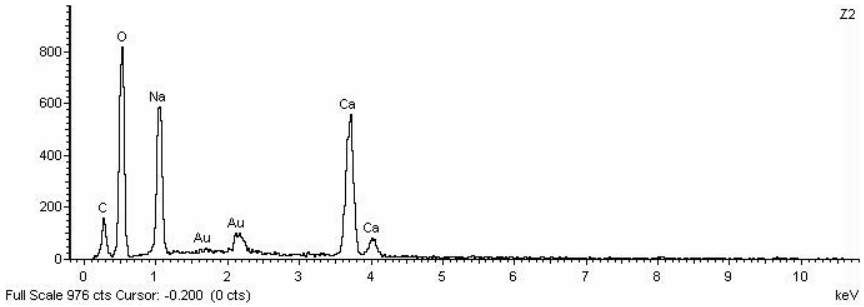


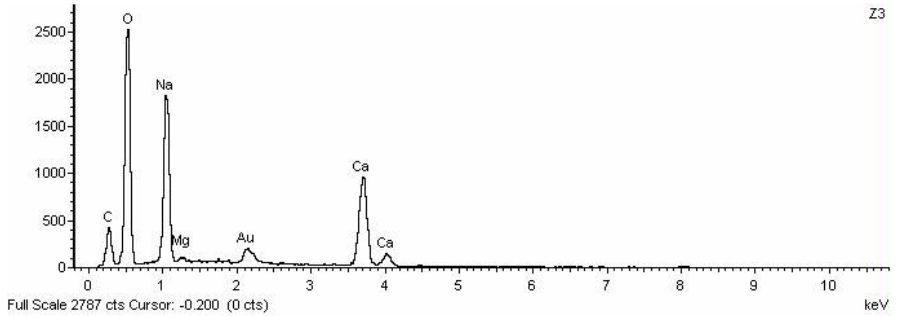
GLOBAL

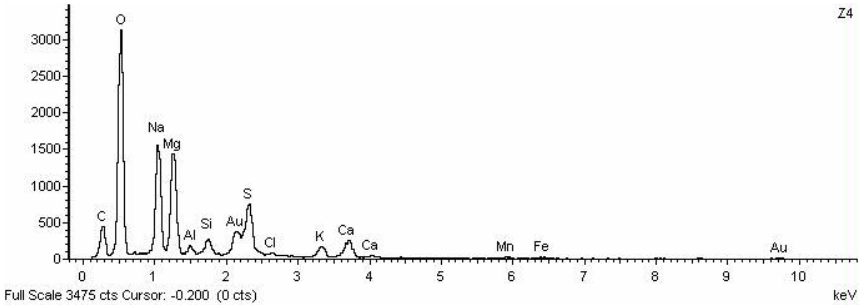



Z4
Z2
Z1
Z3
40µm
CEMUP SE DRGS24 x1500 15kV WD=15mm

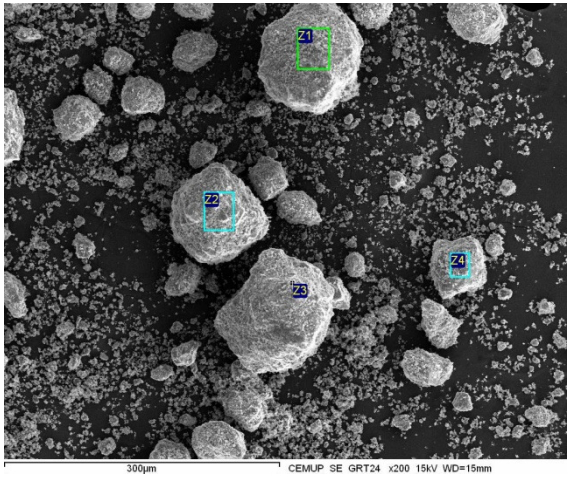

Z1
O
Na
C
Mg
Al
Si
Au
S
Ca
Ca
Au
Full Scale 1570 cts Cursor: -0.200 (0 cts)
keV

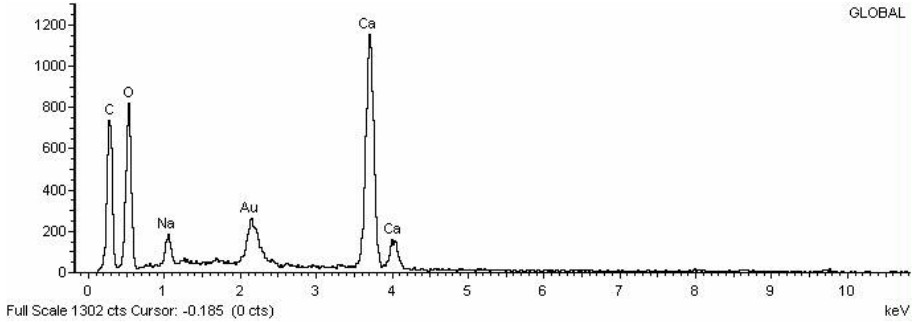

Z2
O
Na
C
Au
Au
Ca
Ca
Full Scale 976 cts Cursor: -0.200 (0 cts)
keV

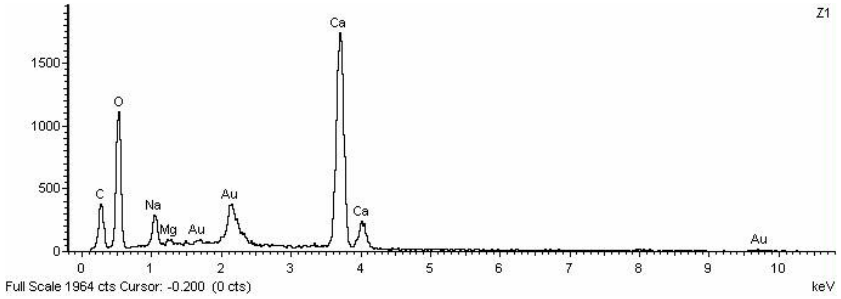

Z3
O
Na
C
Mg
Au
Ca
Ca
Full Scale 2787 cts Cursor: -0.200 (0 cts)
keV

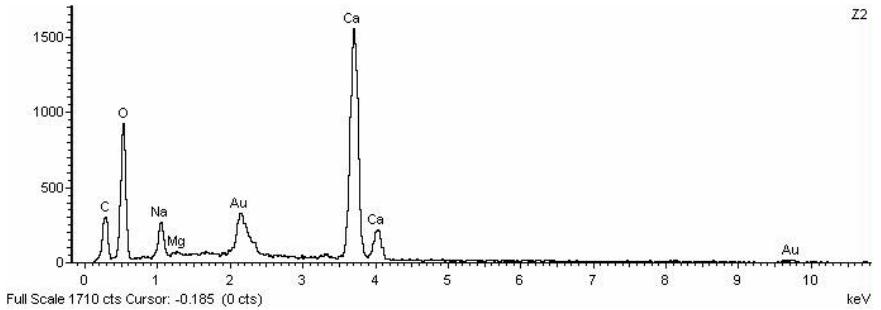

Z4
O
Na
Mg
C
Al
Si
Au
S
Cl
K
Ca
Ca
Mn
Fe
Au
Full Scale 3475 cts Cursor: -0.200 (0 cts)
keV

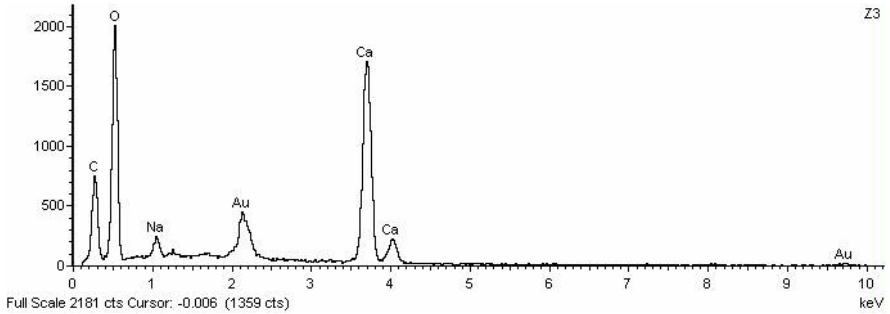
AMOSTRA 3 – GRITS UTILIZADOS (GRT)

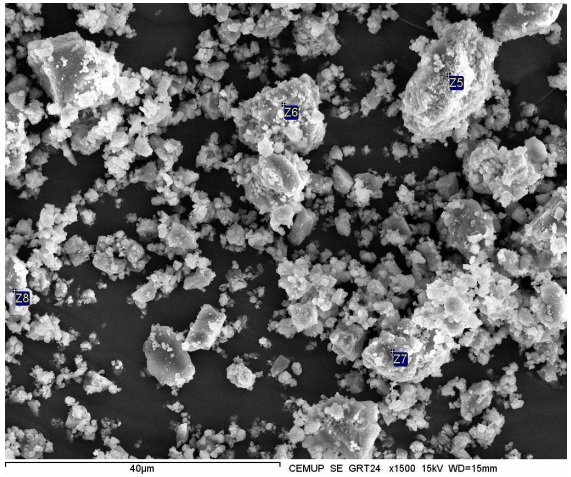


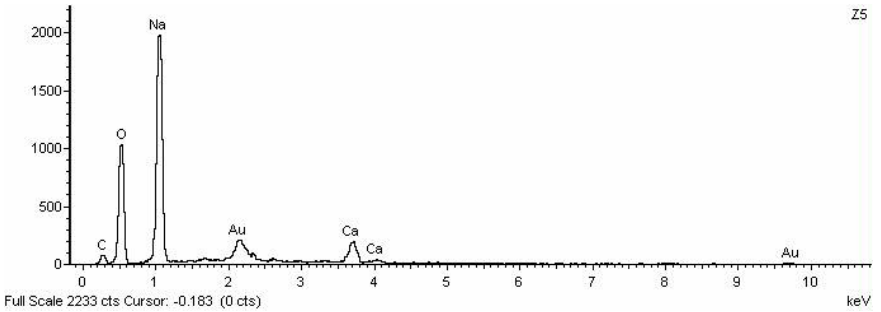


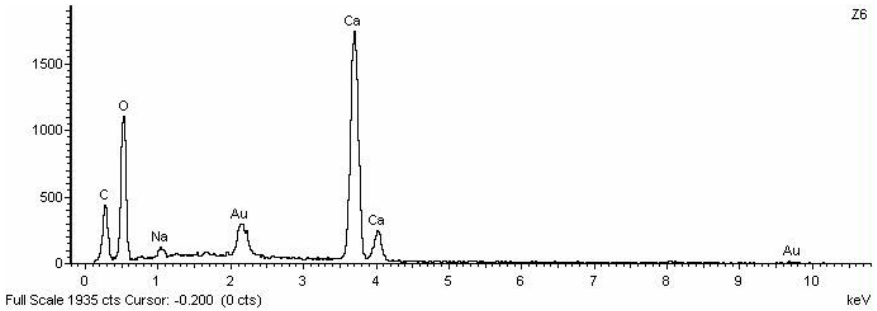


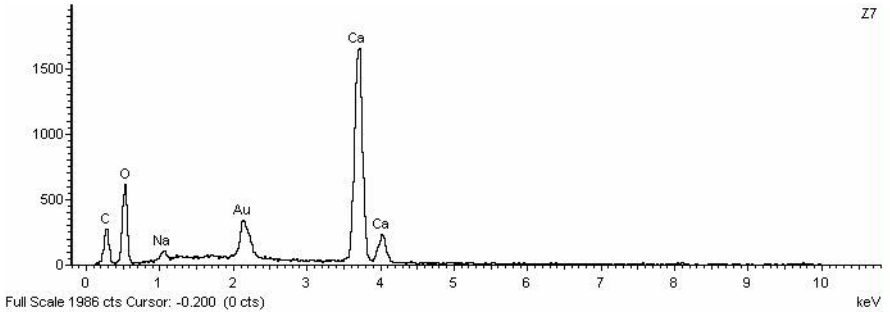


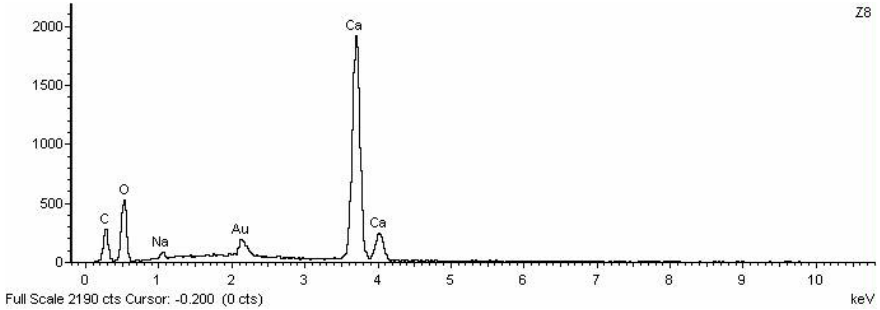



Z5
Z6
Z8
Z7
40µm
CEMUP SE GRT24 x1500 15kV WD=15mm

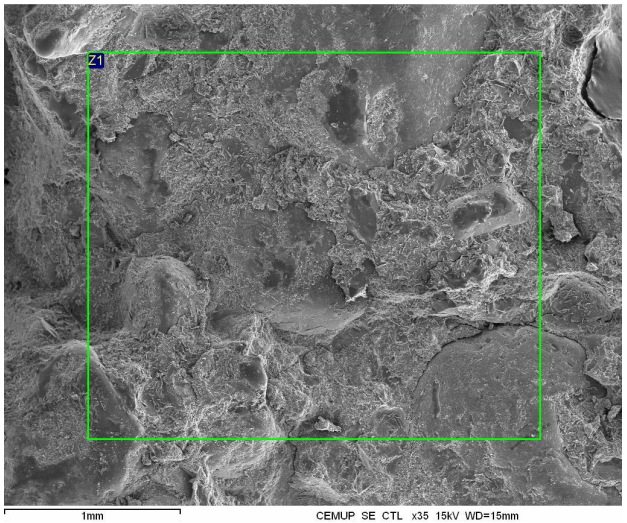

Z5
Na
O
C
Au
Ca
Ca
Au
Full Scale 2233 cts Cursor: -0.183 (0 cts)
keV

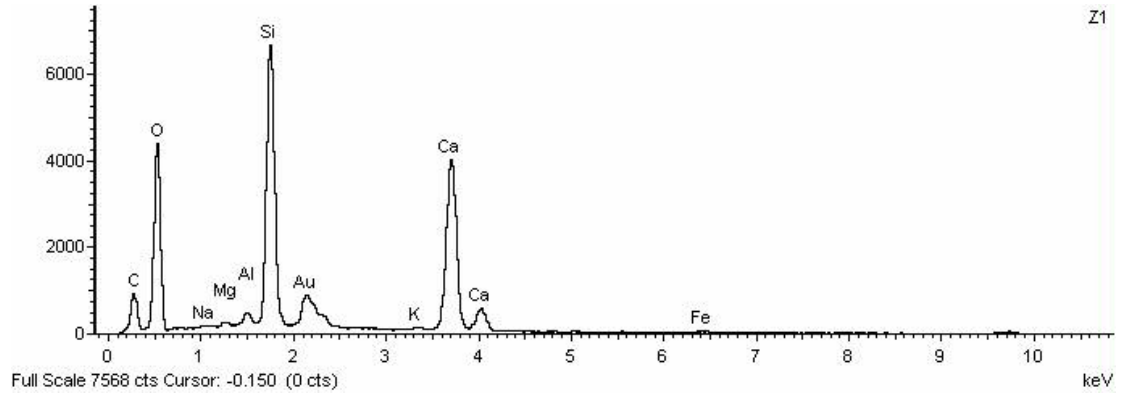

Z6
Ca
O
C
Na
Au
Ca
Au
Full Scale 1935 cts Cursor: -0.200 (0 cts)
keV

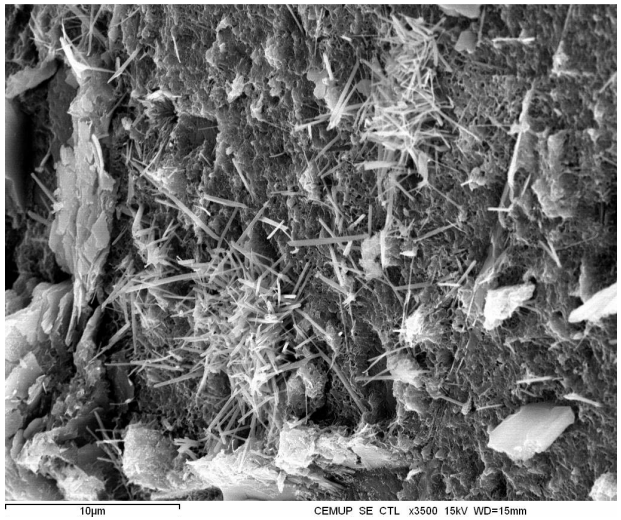

Z7
Ca
O
C
Na
Au
Ca
Full Scale 1986 cts Cursor: -0.200 (0 cts)
keV

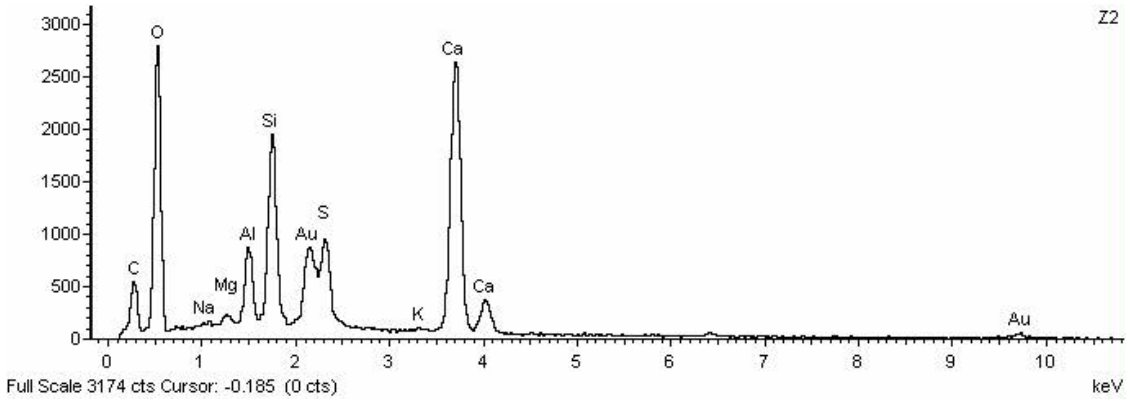

Z8
Ca
O
C
Na
Au
Ca
Full Scale 2190 cts Cursor: -0.200 (0 cts)
keV

AMOSTRA 4– ARGAMASSA DE CONTROLO (CTL)

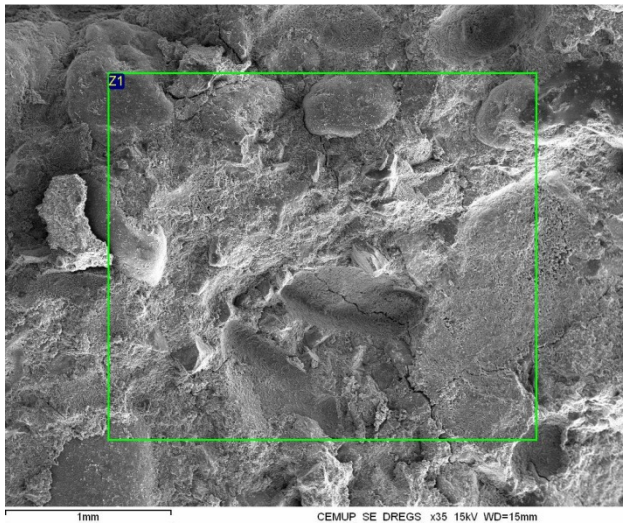


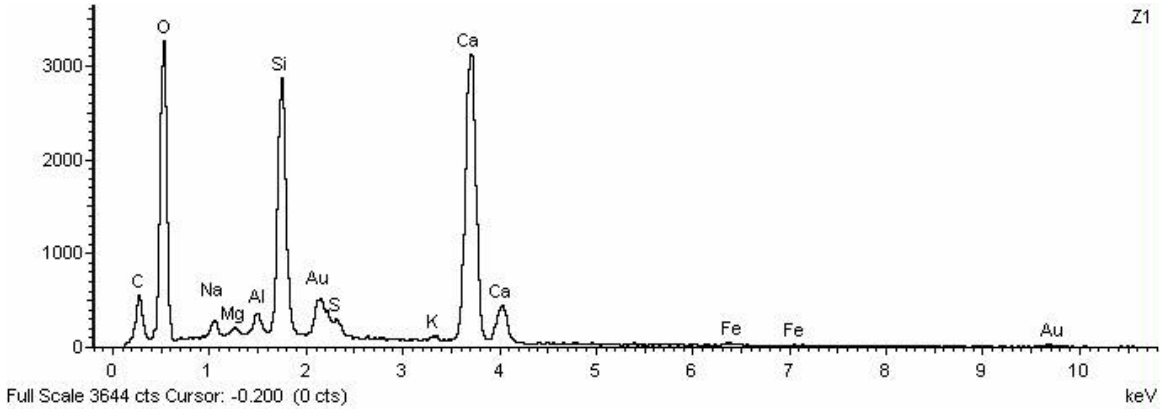


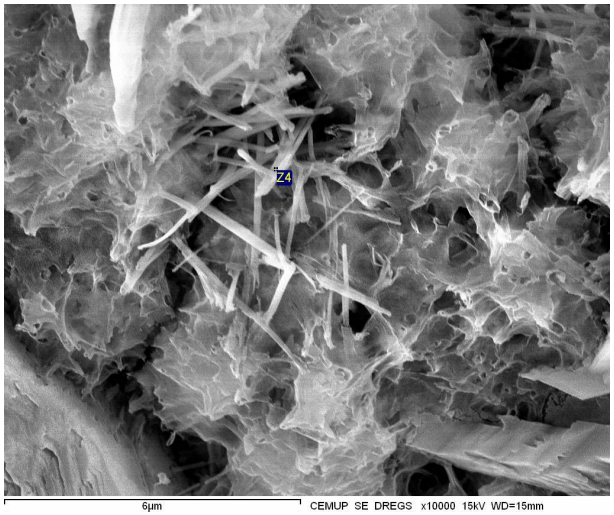


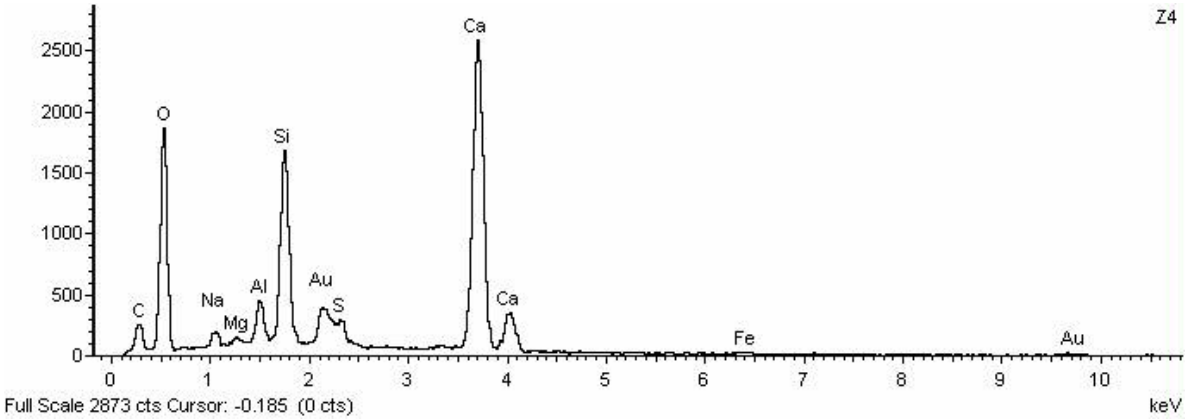


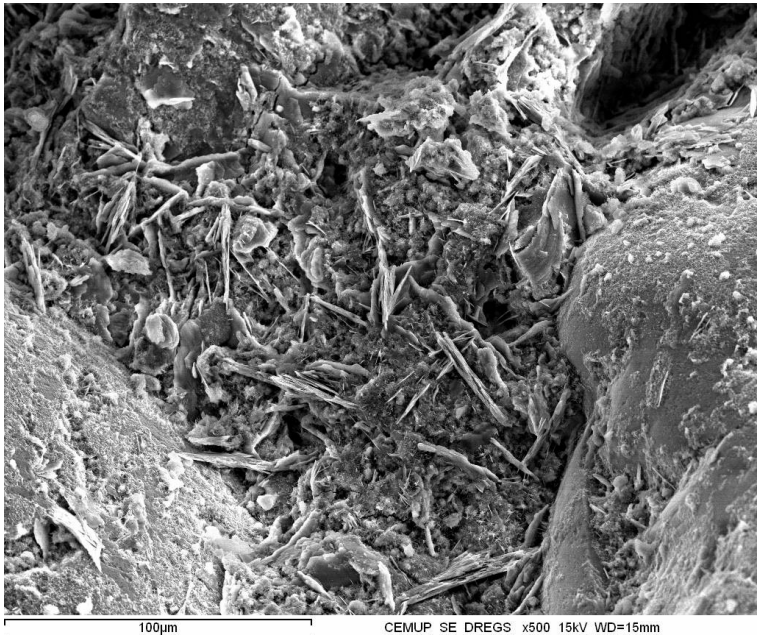
AMOSTRA 5– ARGAMASSA COM DREGS A 10% DO LIGANTE (DRG)

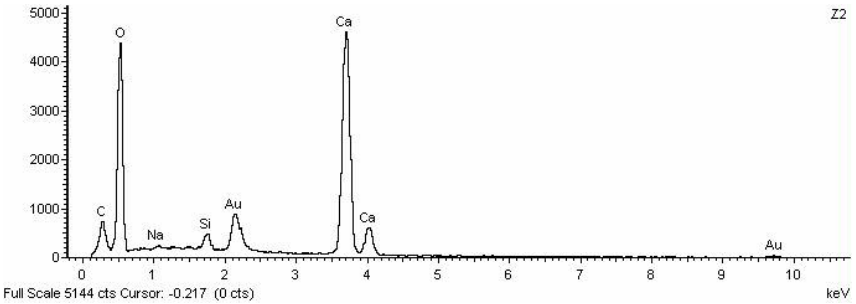


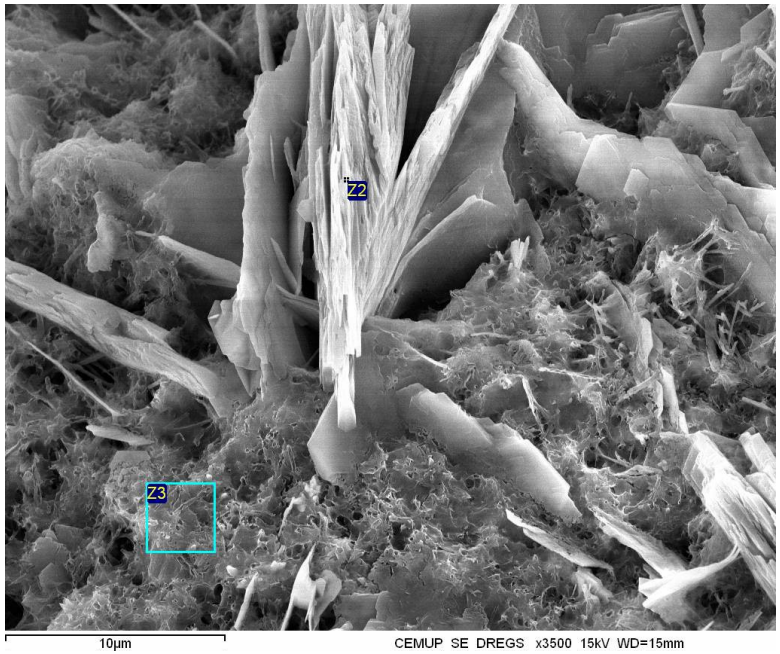


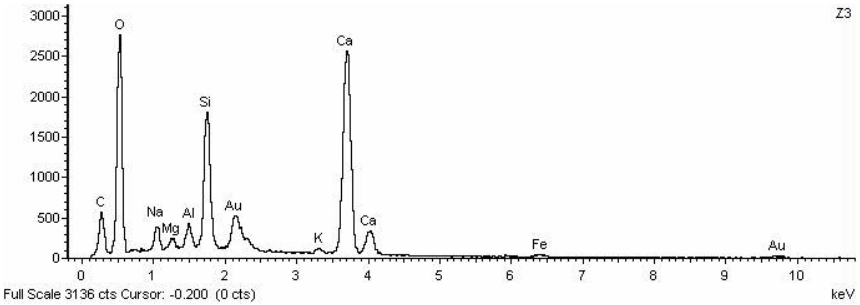


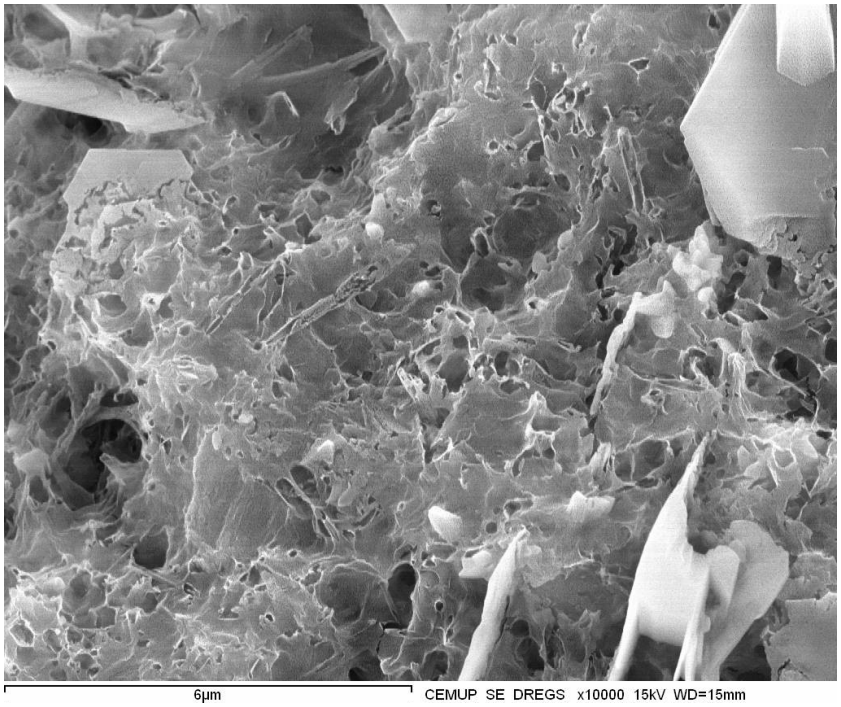


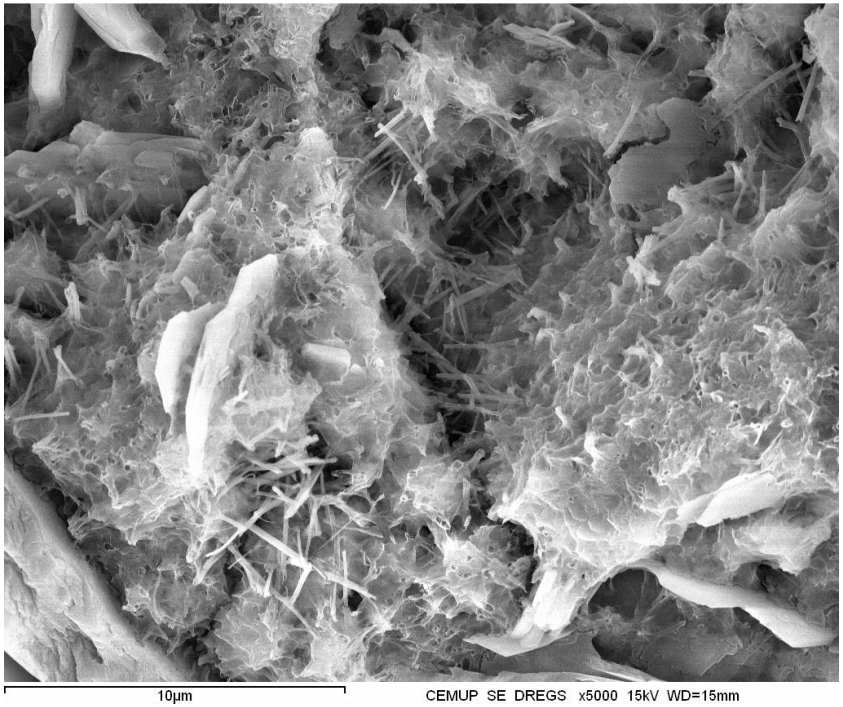

100µm
CEMUP SE DREGS x500 15kV WD=15mm


Z2
O
Ca
C
Na
Si
Au
Ca
Au
Full Scale 5144 cts Cursor: -0.217 (0 cts)
keV

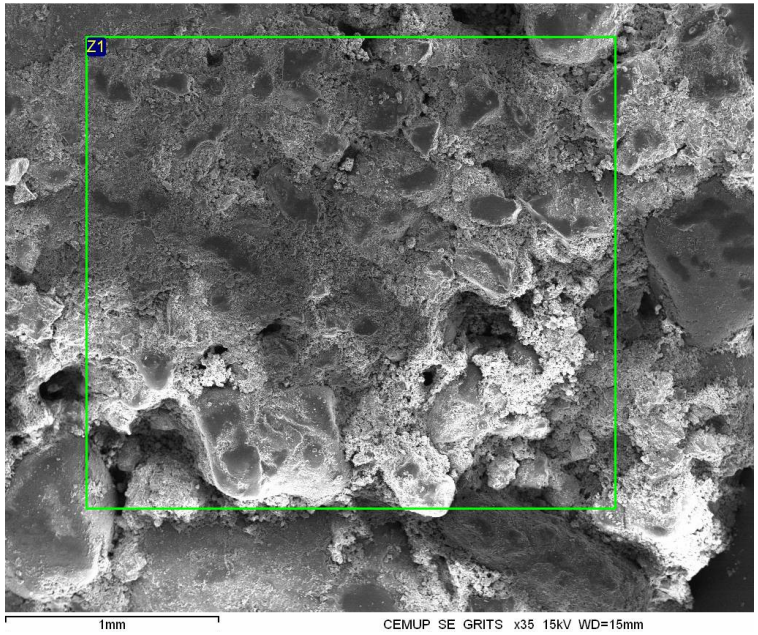

Z2
Z3
10µm
CEMUP SE DREGS x3500 15kV WD=15mm

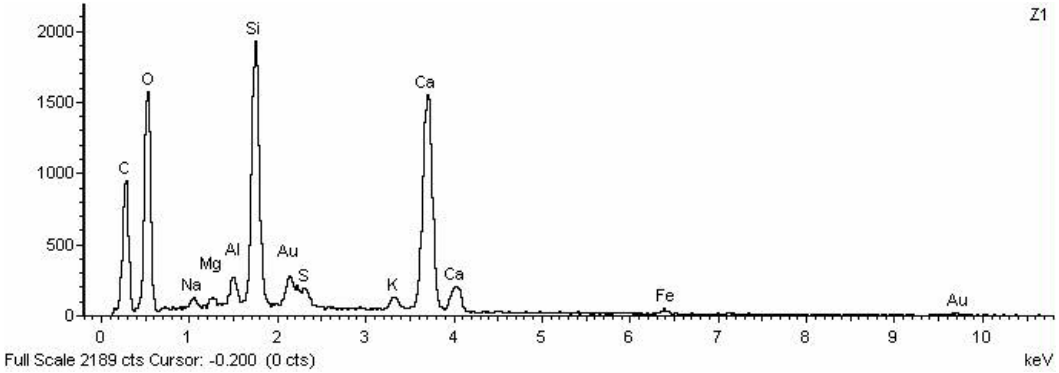

Z3
O
Ca
Si
C
Na
Mg
Al
Au
K
Ca
Fe
Au
Full Scale 3136 cts Cursor: -0.200 (0 cts)
keV

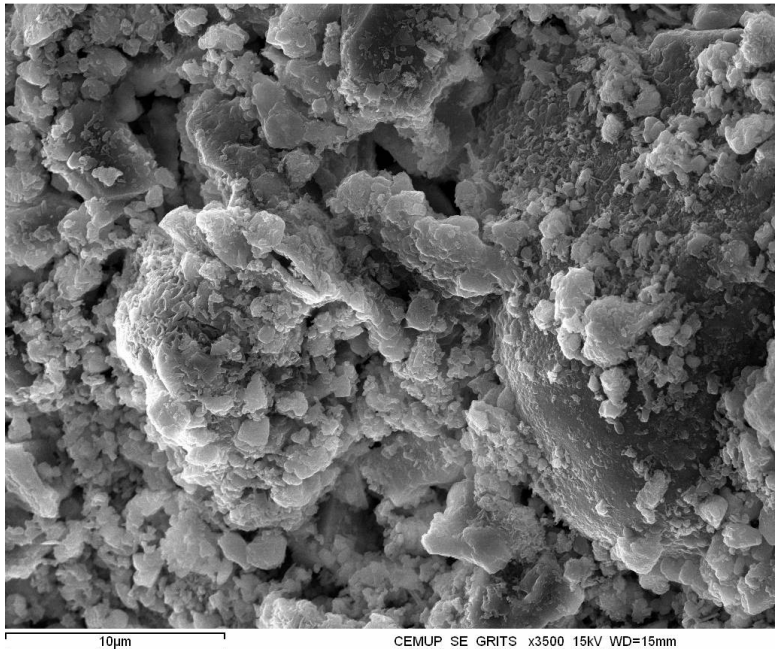

6µm
CEMUP SE DREGS x10000 15kV WD=15mm

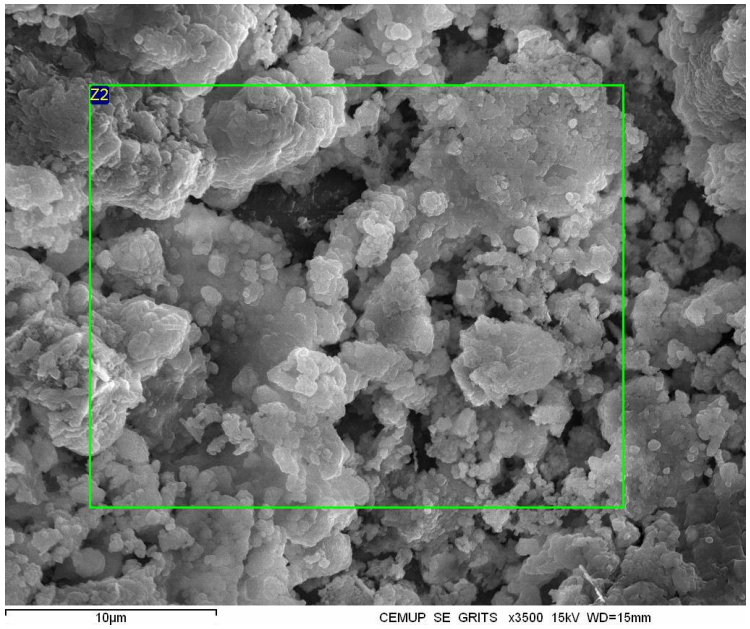

10µm
CEMUP SE DREGS x5000 15kV WD=15mm

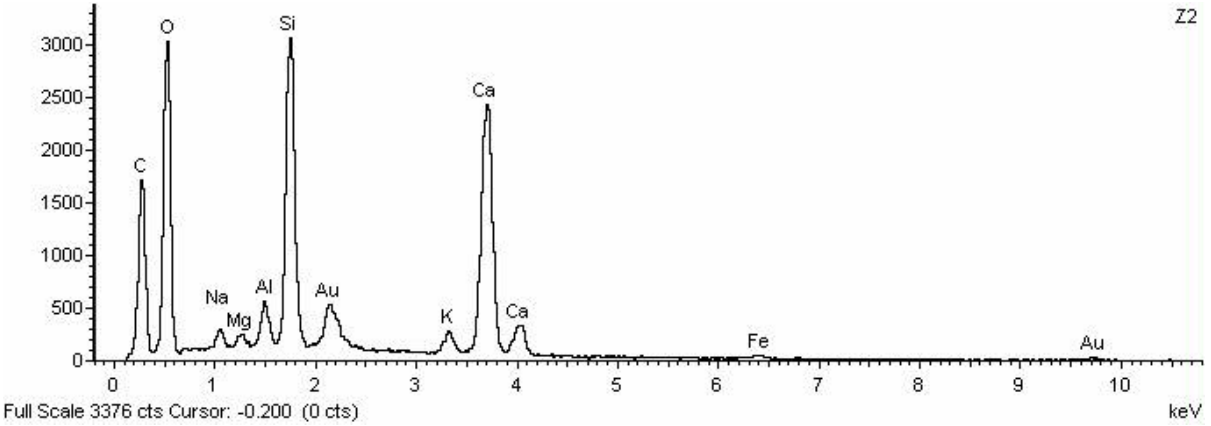
AMOSTRA 6– ARGAMASSA COM GRITS A 10% DO LIGANTE (DRG)






10µm
CEMUP SE GRITS x3500 15kV WD=15mm


Z2
10µm
CEMUP SE GRITS x3500 15kV WD=15mm


Z2
O
Si
Ca
C
Na
Mg
Al
Au
K
Ca
Fe
Au
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
keV
Full Scale 3376 cts Cursor: -0.200 (0 cts)

ANEXO 12. CURVAS GRANULOMÉTRICAS

MASTERSIZER 2000

Result Analysis Report

Sample Name:
Background com Ethanol - Nuno

SOP Name:

Measured:
terça-feira, 17 de Junho de 2008 10:06:27

Sample Source & type:

Measured by:
snunes

Analysed:
terça-feira, 17 de Junho de 2008 10:06:28

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:
14.51 %

Dispersant Name:
Ethanol

Dispersant RI:
1.360

Weighted Residual:
0.287 %

Result Emulation:
Off

Concentration:
0.0095 %Vol

Span :
2.366

Uniformity:
0.738

Result units:
Volume

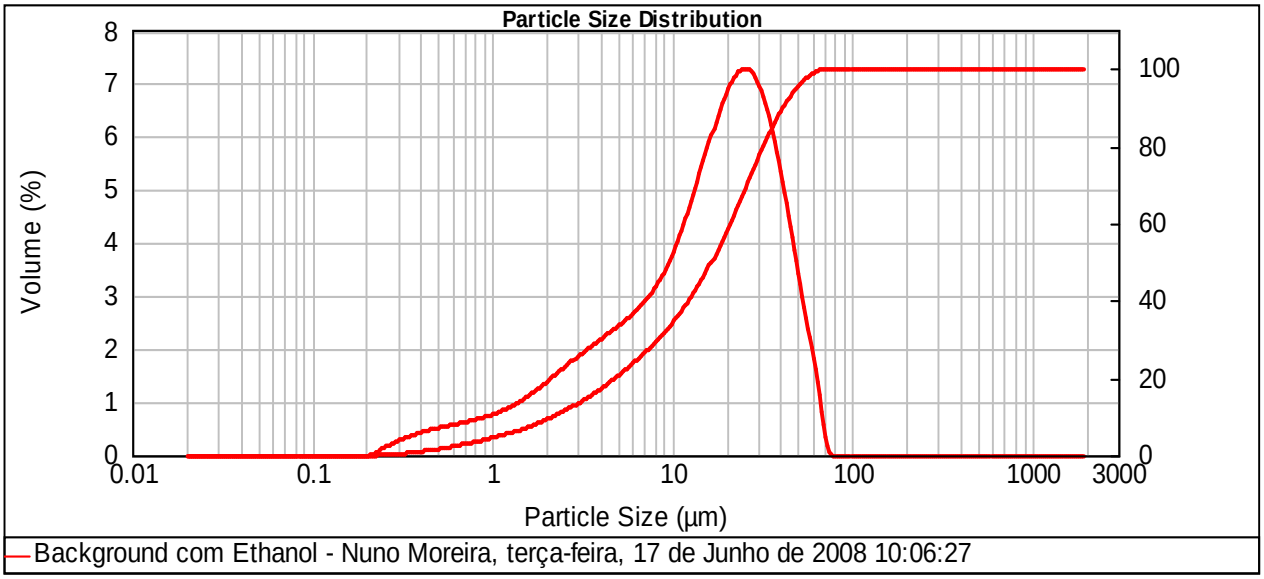
Specific Surface Area:
1.22 m²/g

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

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

---

d(0.1): 2.186 um **d(0.5):** 16.557 um **d(0.9):** 41.354 um



Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00
0.011	0.00
0.013	0.00
0.015	0.00
0.017	0.00
0.020	0.00
0.023	0.00
0.026	0.00
0.030	0.00
0.035	0.00
0.040	0.00
0.046	0.00
0.052	0.00
0.060	0.00
0.069	0.00
0.079	0.00
0.091	0.00
0.105	0.00

Size (µm)	Volume In %
0.105	0.00
0.120	0.00
0.138	0.00
0.158	0.00
0.182	0.00
0.209	0.00
0.240	0.04
0.275	0.14
0.316	0.23
0.363	0.30
0.417	0.37
0.479	0.43
0.550	0.48
0.631	0.52
0.724	0.56
0.832	0.60
0.955	0.64
1.096	0.70

Size (µm)	Volume In %
1.096	0.78
1.259	0.87
1.445	0.98
1.660	1.11
1.905	1.26
2.188	1.41
2.512	1.56
2.884	1.72
3.311	1.86
3.802	2.00
4.365	2.14
5.012	2.27
5.754	2.43
6.607	2.62
7.586	2.87
8.710	3.19
10.000	3.62
11.482	

Size (µm)	Volume In %
11.482	4.14
13.183	4.74
15.136	5.37
17.378	5.94
19.953	6.38
22.909	6.58
26.303	6.48
30.200	6.05
34.674	5.32
39.811	4.37
45.709	3.31
52.481	2.25
60.256	1.29
69.183	0.09
79.433	0.00
91.201	0.00
104.713	0.00
120.226	

Size (µm)	Volume In %
120.226	0.00
138.038	0.00
158.489	0.00
181.970	0.00
208.930	0.00
239.883	0.00
275.423	0.00
316.228	0.00
363.078	0.00
416.869	0.00
478.630	0.00
549.541	0.00
630.957	0.00
724.436	0.00
831.764	0.00
954.993	0.00
1096.478	0.00
1258.925	

Size (µm)	Volume In %
1258.925	0.00
1445.440	0.00
1659.587	0.00
1905.461	0.00
2187.762	0.00
2511.886	0.00
2884.032	0.00
3311.311	0.00
3801.894	0.00
4365.158	0.00
5011.872	0.00
5754.399	0.00
6606.934	0.00
7585.776	0.00
8709.636	0.00
10000.000	

Operator notes:

MASTERSIZER 2000

Result Analysis Report

Sample Name:
Background com Ethanol - Nuno

SOP Name:

Measured:
terça-feira, 17 de Junho de 2008 10:43:10

Sample Source & type:

Measured by:
snunes

Analysed:
terça-feira, 17 de Junho de 2008 10:43:12

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:
12.71 %

Dispersant Name:
Ethanol

Dispersant RI:
1.360

Weighted Residual:
0.239 %

Result Emulation:
Off

Concentration:
0.0259 %Vol

Span :
2.111

Uniformity:
1.62

Result units:
Volume

Specific Surface Area:
0.403 m²/g

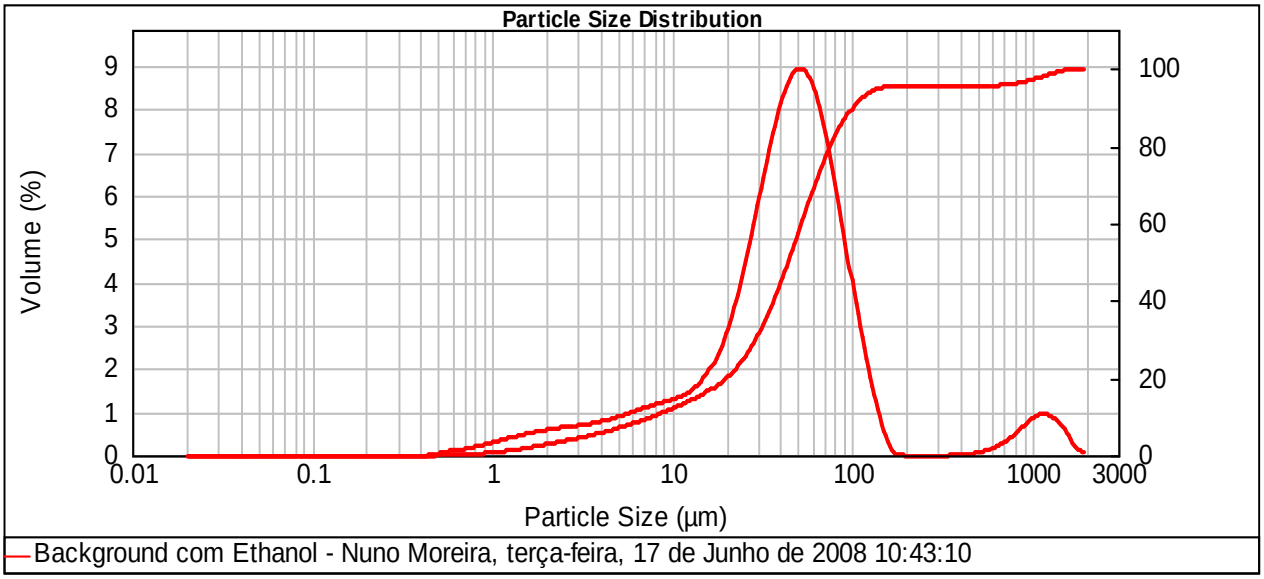
Surface Weighted Mean D[3,2]:
14.903 um

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

---

d(0.1): 7.726 um **d(0.5):** 44.090 um **d(0.9):** 100.785 um

---



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	0.34	11.482	1.31	120.226	1.40	1258.925	0.75
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.39	13.183	1.49	138.038	0.55	1445.440	0.48
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.45	15.136	1.79	158.489	0.06	1659.587	0.14
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.50	17.378	2.27	181.970	0.00	1905.461	0.03
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.54	19.953	2.93	208.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.57	22.909	3.80	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.60	26.303	4.81	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.63	30.200	5.88	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.67	34.674	6.88	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.71	39.811	7.64	416.869	0.03	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.77	45.709	8.03	478.630	0.07	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.06	5.012	0.84	52.481	7.97	549.541	0.14	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.09	5.754	0.92	60.256	7.42	630.957	0.25	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.13	6.607	0.99	69.183	6.45	724.436	0.42	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.17	7.586	1.06	79.433	5.19	831.764	0.62	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.22	8.710	1.13	91.201	3.82	954.993	0.80	10000.000	
0.091	0.00	0.955	0.28	10.000	1.20	104.713	2.50	1096.478	0.87		
0.105		1.096		11.482		120.226		1258.925			

Operator notes:

MASTERSIZER 2000

Result Analysis Report

Sample Name:
Background com Ethanol - Nuno

SOP Name:

Measured:
terça-feira, 17 de Junho de 2008 10:33:37

Sample Source & type:

Measured by:
snunes

Analysed:
terça-feira, 17 de Junho de 2008 10:33:38

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:
16.57 %

Dispersant Name:
Ethanol

Dispersant RI:
1.360

Weighted Residual:
0.745 %

Result Emulation:
Off

Concentration:
0.0132 %Vol

Span :
5.157

Uniformity:
1.53

Result units:
Volume

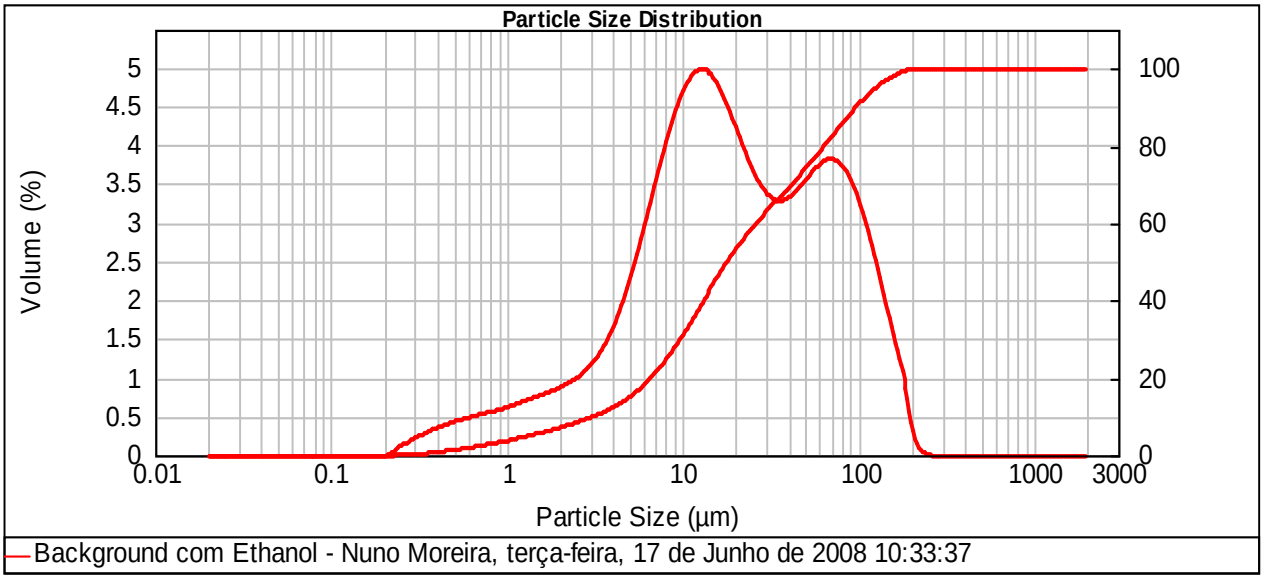
Specific Surface Area:
1.02 m²/g

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

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

---

d(0.1): 3.081 um **d(0.5):** 18.005 um **d(0.9):** 95.924 um



Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00
0.011	0.00
0.013	0.00
0.015	0.00
0.017	0.00
0.020	0.00
0.023	0.00
0.026	0.00
0.030	0.00
0.035	0.00
0.040	0.00
0.046	0.00
0.052	0.00
0.060	0.00
0.069	0.00
0.079	0.00
0.091	0.00
0.105	0.00

Size (µm)	Volume In %
0.105	0.00
0.120	0.00
0.138	0.00
0.158	0.00
0.182	0.00
0.209	0.00
0.240	0.03
0.275	0.12
0.316	0.20
0.363	0.26
0.417	0.31
0.479	0.36
0.550	0.40
0.631	0.44
0.724	0.47
0.832	0.50
0.955	0.53
1.096	0.57

Size (µm)	Volume In %
1.096	0.61
1.259	0.65
1.445	0.70
1.660	0.74
1.905	0.80
2.188	0.86
2.512	0.95
2.884	1.08
3.311	1.26
3.802	1.52
4.365	1.86
5.012	2.28
5.754	2.75
6.607	3.24
7.586	3.71
8.710	4.10
10.000	4.37
11.482	

Size (µm)	Volume In %
11.482	4.50
13.183	4.46
15.136	4.29
17.378	4.01
19.953	3.69
22.909	3.38
26.303	3.13
30.200	2.99
34.674	2.97
39.811	3.04
45.709	3.18
52.481	3.33
60.256	3.43
69.183	3.44
79.433	3.31
91.201	3.03
104.713	2.62
120.226	

Size (µm)	Volume In %
120.226	2.14
138.038	1.61
158.489	1.11
181.970	0.55
208.930	0.08
239.883	0.00
275.423	0.00
316.228	0.00
363.078	0.00
416.869	0.00
478.630	0.00
549.541	0.00
630.957	0.00
724.436	0.00
831.764	0.00
954.993	0.00
1096.478	0.00
1258.925	

Size (µm)	Volume In %
1258.925	0.00
1445.440	0.00
1659.587	0.00
1905.461	0.00
2187.762	0.00
2511.886	0.00
2884.032	0.00
3311.311	0.00
3801.894	0.00
4365.158	0.00
5011.872	0.00
5754.399	0.00
6606.934	0.00
7585.776	0.00
8709.636	0.00
10000.000	

Operator notes:

ANEXO 13. FICHA TÉCNICA DO ADJUVANTE UTILIZADO

FICHA TÉCNICA **PROD. NO. 0766**

DELVO®CRETE T (VZ)

Certificado: 0965-CPD-AH-010

Sistema para controlo de hidratação do cimento

Descrição do produto:

DELVO®CRETE T é o único sistema químico sem cloretos, que controla a dinâmica da hidratação do cimento, suspendendo o processo de hidratação e reactivando-o horas ou mesmo dias depois, sem perda de qualidade do betão endurecido. Quando adicionado a amassaduras molhadas ou secas, estabiliza completamente o processo de hidratação formando uma barreira protectora envolvendo a partícula de cimento. Pode ser usado sempre que seja necessário parar a presa do cimento.
DELVO®CRETE T actua em todas as fases da hidratação de um cimento mineral (C_3S, C_2S, C_2A, C_4AF e Gesso).

Campo de aplicação:

Retardador de betão, segundo NP EN 934-2 T 8.
- Estabilizar amassaduras mantendo a trabalhabilidade (consistência) por períodos longos i.e. 5 horas a 48 horas são valores aceitáveis.
- Túneis, gunitagem, grandes massas de betão, estradas.
- Reparação de estruturas de betão.
- Betão bombeado.
- Argamassas de injecção e caldas de injecção usando cimento.

Particularidades e benefícios:

Manutenção de consistência e controlo do inicio de presa do betão
- Completa flexibilidade na entrega de misturas betão projectado.
- Não há necessidade de limpeza de bomba ou tubagens durante as interrupções de bombeagem.
- Pode ser usado em amassaduras com cimento secas ou húmidas.
- Reduz o desperdício de betão ou argamassas.
- Redução de custos gerais no planeamento e projecto construtivo.
- Melhores resistências quando comparado com um betão normal.

Dados técnicos:

Matéria prima:	acido orgânico
Cor:	Castanho claro.
Forma:	Líquida.
Peso un. vol. (20ºC)	$1{,}09 \pm 0{,}2$ g/cm^3
pH (20ºC)	$1{,}3 \pm 0{,}8$
Teor de álcalis	$\leq 0{,}6$ M%, Na_2O-Equivalente
Teor de cloretos	$\leq 0{,}1$ M%

R. Aires Ornelas, 137 - 4000-023 PORTO - PORTUGAL www.euromodal.pt
Telef: + 351 - 22 537 91 71 Fax: + 351 - 22 536 05 08 E-mail: mail@euromodal.pt

Dosagem: 0,2 – 3,6 M% peso do cimento.
Para controlo de hidratação até 72 horas a dosagem de 0,2 – 2 M% ligante (Cimento + Microsilica) será aconselhável com uma quantidade de cimento de 400-460 kg/m^3.
A quantidade necessária de adição depende do efeito retardador desejado e deve ser determinada por testes segundo NP EN 206-1.

Aplicação: O aditivo pode juntar-se à água de preparação ou melhor ainda juntar-se ao betão já preparado na fábrica ou na obra.
Deve-se providenciar em todo o caso um período de mistura suficiente.
Para aplicações em misturas a seco recomenda-se a colaboração de um técnico da Euromodal.

Armazenagem: Proteger de geada e sujidade.
Armazenar normalmente fechado (20°C) duração mínima 1 ano.

Comportamento ambiental: Não é matéria perigosa no sentido da legislação. A utilizar correctamente não é necessário observar medidas de protecção especiais.

Nota:
As especificações contidas nesta ficha técnica reflectem os nossos conhecimentos e experiências actuais. Devido à grande variedade de possíveis influências no manejo e aplicação dos nossos produtos, o utente não é dispensado de levar a efeito os seus próprios testes e ensaios. Não se pode deduzir uma garantia, juridicamente obrigatória, de determinadas propriedades ou da aptidão para um uso concreto. Portanto, a nossa garantia cobre unicamente a qualidade dos nossos produtos segundo as nossas condições de venda e fornecimento, mas não a sua armazenagem e manejo ulterior.
Setembro, 2004

R. Aires Ornelas, 137 - 4000-023 PORTO - PORTUGAL www.euromodal.pt
Telef: + 351 - 22 537 91 71 Fax: + 351 - 22 536 05 08 E-mail: mail@euromodal.pt