



Sílvia Magalhães da Silva Pires

Licenciatura em Engenharia de Materiais

**Estudo Comparativo da
Resistência à Compressão do Betão
em Provete Normalizados
e em Estrutura Betonada**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia dos Materiais

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Margarida Lima, FCT-UNL
Co-Orientadora: Eng.^a Ana Carvalho, Unibetão

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Alexandre José da Costa Velinho
Arguente: Prof. Doutor João Pedro Botelho Veiga
Vogais: Prof.^a Doutora Regina da Conceição Correadeira Monteiro
Prof.^a Doutora Maria Margarida Rolim Augusto Lima
Engenheira Ana Luísa Duarte Nunes de Carvalho



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro 2011

Sílvia Magalhães da Silva Pires

Licenciatura em Engenharia de Materiais

**Estudo Comparativo da
Resistência à Compressão do Betão
em Provetes Normalizados
e em Estrutura Betonada**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia dos Materiais

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Margarida Lima, FCT-UNL
Co-Orientadora: Eng.^a Ana Carvalho, Unibetão

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Alexandre José da Costa Velhinho
Arguente: Prof. Doutor João Pedro Botelho Veiga
Vogais: Prof.^a Doutora Regina da Conceição Corredeira Monteiro
Prof.^a Doutora Maria Margarida Rolim Augusto Lima
Engenheira Ana Luísa Duarte Nunes de Carvalho

Dezembro 2011

Estudo Comparativo da Resistência à Compressão do Betão em Provetes Normalizados e em Estrutura Betonada

“Copyright” Sílvia Magalhães da Silva Pires, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Muitos foram aqueles que contribuíram, directa ou indirectamente, para a realização deste trabalho.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à Unibetão e, em particular, ao seu administrador, o Sr. Eng. António Juliano Barbosa, que me proporcionou a possibilidade de realização do estágio na Central de Frielas e ofereceu todas as condições para que este decorresse da melhor forma.

Presto os meus agradecimentos ao Sr. Eng. Pedro Menéres (director de zona de Lisboa) que disponibilizou os meios práticos para o estágio e contribuiu para a minha segurança no decorrer do mesmo.

Gostaria de fazer um agradecimento especial à Sr.^a Eng.^a Ana Carvalho (directora do Departamento de Qualidade da Unibetão e minha orientadora externa) e ao Sr. Eng. Ricardo Ribeiro (responsável pelo Laboratório Central da Unibetão), pela orientação dentro da empresa, apoio na elaboração deste estudo e pela amizade e atenção que sempre demonstraram durante todo o estágio.

Queria também agradecer ao Sr. Adelino Ferreira e ao Sr. Eng. Paulo Vicente (do Laboratório Central) e aos técnicos de laboratório, em especial ao Sr. Arcílio e ao Sr. Noé pela simpatia e por se mostrarem sempre disponíveis para me auxiliarem na realização dos ensaios mecânicos. Agradeço também a todo o pessoal dos diversos departamentos constituintes da Central de Frielas com quem convivi e que tornaram muito agradável e inesquecível todo o período que passei na empresa para realização do estágio.

Gostaria de agradecer à minha orientadora interna, a Sr.^a Prof.^a Doutora Margarida Lima (do Departamento de Ciência dos Materiais da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa), pela disponibilidade, motivação e orientação prestadas, contribuindo para a realização deste longo caminho dentro da faculdade.

Não poderia deixar de agradecer também aos professores do mesmo departamento da faculdade: ao Sr. Prof. Doutor João Pedro Veiga pelo auxílio prestado nos ensaios

de FRX, ao Sr. Prof. Doutor Braz Fernandes nos ensaios de DRX e ao Sr. Prof. Doutor Rui Silva nas análises SEM/EDS. Um agradecimento também à Sr.^a Doutora Teresa Silva (do LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I.P.) pelas análises DTA/TG realizadas.

Por fim, gostaria de agradecer aos meus pais pelo esforço e todo o incentivo que me deram para que eu pudesse tirar o curso. Agradeço também ao meu irmão e ao meu avô por todo o carinho e apoio. E, aos meus amigos: Cláudia Antunes, Cláudio Gomes, David Pulquério, Luís Bexiga, Mónica Pereira e Sara Correia, pela amizade, carinho e apoio, sem os quais esta etapa não teria sido concluída com o mesmo ânimo.

A todos, muito obrigada!

Resumo

A resistência à compressão é por excelência o parâmetro de caracterização do betão numa estrutura.

O presente trabalho consiste no estudo da relação existente entre a resistência à compressão numa estrutura *in situ* com a resistência à compressão obtida através de ensaios normalizados em laboratório. Para o efeito, procurou-se correlacionar valores obtidos nos ensaios de resistência à compressão (destrutivo) e de esclerometria (não destrutivo) do betão, com o intuito de definir a fiabilidade deste último.

Através dos resultados obtidos em ensaios esclerométricos e de resistência à compressão realizados em provetes cúbicos de $150mm \times 150mm \times 150mm$ foram traçadas curvas de correlação para dois esclerómetros. Estas curvas relacionam ambos os métodos e serviram de base para a transformação de resultados obtidos em ensaios esclerométricos efectuados directamente na estrutura. Esses resultados foram comparados com ensaios esclerométricos e de resistência à compressão normalizados a que foram submetidos provetes cúbicos moldados com o betão utilizado na estrutura, e ainda com carotes extraídas da mesma. Foram estudadas duas diferentes classes de betão: C25/30 e C30/37 (com e sem adição de cinza volante). Os ensaios foram efectuados nas idades de 3, 7, 14, 28, 56 e 90 dias, tendo sido considerados dois tipos de cura (em condições normalizadas e em condições ambientais).

Através de técnicas de caracterização de materiais, nomeadamente FRX, DRX, SEM e DTA/TG procurou-se, ainda, fazer um acompanhamento da evolução da microestrutura durante o processo de hidratação e endurecimento do betão. Para tal, foram moldados prismas de $40mm \times 40mm \times 160mm$ de pasta de cimento obtida por peneiração de material proveniente de colheitas de betão utilizadas na execução dos provetes cúbicos.

A caracterização microestrutural mostrou a presença de calcite (CC), etringite ($C_6A\bar{S}_3H_{32}$), monosulfoaluminato ($C_4A\bar{S}H_{12}$), portlandite (CH) e silicato de cálcio hidratado ($C-S-H$).

O ensaio esclerométrico revelou ser válido para a estimativa da resistência do betão na estrutura, desde que sejam traçadas as devidas curvas de correlação para o

aparelho tendo em conta os vários factores que influenciam ambos os tipos de ensaio.

Palavras-chave: Betão, Resistência à Compressão, Esclerometria, Carotagem, DRX, DTA, FRX, SEM, TG.

Abstract

The compressive strength is the characterizing parameter of concrete in a structure.

The present work presents a study of the relationship between compressive strength of a structure in situ with compressive strength obtained from standard tests in the laboratory. For this, we tried to correlate values obtained from compressive strength tests (destructive) and sclerometry (non destructive) of concrete in order to define the reliability of application of the last.

Correlation curves were plotted through the results obtained in compressive strength and sclerometry tests made on cubic specimens of $150mm \times 150mm \times 150mm$ for two rebound hammers. These curves relate both methods and were used as the basis for the transformation of results obtained in tests carried out directly on the rebound hammer structure. A comparison was made between results obtained with rebound hammer test and compressive strength applied on standard cubic specimens molded from the concrete used in the structure, and with cores taken from the same. We studied two different classes of concrete: C25/30 and C30/37 (with and without addition of fly ash). The tests were conducted at ages 3, 7, 14, 28, 56 and 90 days, and it was considered two types of concrete curing (in standard conditions and environmental conditions).

By techniques of materials characterization, including XRF, XRD, DTA/TG and SEM we tried also to follow up the evolution of microstructure during the hydration and hardening of concrete. To this end, we made prismatic samples $40mm \times 40mm \times 16mm$ of cement paste obtained by sieving of material from crops used to produce concrete cubic specimens.

The microstructural characterization showed the presence of calcite (CC), calcium silicate hydrate ($C-S-H$), portlandite (CH), ettringite ($C_6A\bar{S}_3H_{32}$) and monosulfoaluminate ($C_4A\bar{S}H_{12}$).

The rebound hammer test proved to be valid for estimating the concrete resistance in a structure, provided the correlation curves for the device are determined taking into account the various factors that influence both types of test.

Keywords: Concrete, Compressive Strength, Rebound Hammer, Coring, DTA, XRD, XRF, SEM, TG.

Nomenclatura

Abreviaturas

Fórmulas Químicas



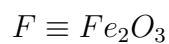
Óxido de alumínio (Alumina)



Óxido de cálcio (Cal livre)



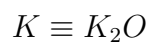
Dióxido de carbono



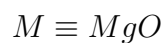
Óxido de ferro III



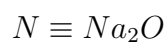
Água



Óxido de potássio (Alcális)



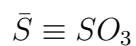
Óxido de magnésio (Magnésia)



Óxido de sódio (Alcális)



Óxido de silício (Sílica ou Quartzo)



Trióxido de enxofre



Carboneto de cálcio

NOMENCLATURA

$CFH \equiv CaO.Fe_2O_3.H_2O$	Ferrato monocálcico
$CH \equiv Ca(OH)_2$	Hidróxido de cálcio (Portlandite)
$C\bar{S}H_2 \equiv CaSO_4.2H_2O$	Sulfato de cálcio bihidratado (Gesso natural)
$C-S-H \equiv CaO_x.SiO_2.H_2O_y$	Silicato de cálcio hidratado
$C_2S \equiv 2CaO.SiO_2$	Silicato bicálcico (Belite)
$C_3A \equiv 3CaO.Al_2O_3$	Aluminato tricálcico (Celite)
$C_3AH_6 \equiv 3CaO.Al_2O_3.6H_2O$	Aluminato tricálcico
$C_3F \equiv 3CaO.Fe_2O_3$	Ferrato tricálcico
$C_3FH_m \equiv 3CaO.Fe_2O_3.mH_2O$	Ferrato tricálcico hidratado
$C_3S \equiv 3CaO.SiO_2$	Silicato tricálcico (Alite)
$C_4AF \equiv 4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	Alumino ferrite tetracálcica (Felite ou Fase Ferrítica)
$C_4AH_{13} \equiv 4CaO.Al_2O_3.13H_2O$	Aluminato tetracálcico hidratado
$C_4A\bar{S}H_{12} \equiv 3CaO.Al_2O_3.CaSO_4.12H_2O$	Sulfoaluminato de cálcio hidratado (Monosulfoaluminato)
$C_6A\bar{S}_3H_{32} \equiv 3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$	Sulfoaluminato de cálcio hidratado
$C_5S_6.5H(aprox.) \equiv Ca_5Si_6O_{16}(OH)_2.4H_2O$	Tobermorite

Técnicas Experimentais

BE	Electrões retrodifundidos
DRX	Difracção de raios-X
DTA	Análise térmica diferencial

DTG	Derivada termogravimétrica
EDS / EDX	Sistema detector de radiação-X por energia dispersiva
FRX	Fluorescência de raios-X
SE	Electrões secundários
SEM	Microscopia electrónica de varrimento
TG	Termogravimetria

Siglas

APEB	Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto
CENIMAT	Centro de Engenharia e Investigação de Materiais
DCM	Departamento de Ciências dos Materiais
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
ICDD	International Centre for Diffraction Data
JCPDS	Joint Committee on Powder Diffraction Standards
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I.P.
UNL	Universidade Nova de Lisboa

Símbolos

a/c	Relação água/cimento (<i>% em peso</i>)
AF_m	Monosulfoaluminato
AF_t	Etringite
Cu	Cobre
d/D	Razão entre as aberturas do peneiro inferior (d) e do peneiro superior (D)
dm/dt	Variação de massa ao longo do tempo
f_c	Resistência à compressão do betão determinada em provetes cúbicos
$f_{ck,cyl}$	Resistência característica à compressão do betão determinada em provetes cilíndricos
$f_{ck,cube}$	Resistência característica à compressão do betão determinada em provetes cúbicos
IE	Índice esclerométrico
K_α	Riscas características de um espectro de raios-X
m_o	massa inicial
R^2	Coeficiente de correlação
Δm	Perda de massa
$\Delta m/m_o$	Perda de massa relativa
θ	Ângulo de difracção
λ	Comprimento de onda

Glossário

A

Adição	Material finamente dividido utilizado no betão com a finalidade de lhe melhorar certas propriedades ou alcançar propriedades especiais. As adições podem ser de dois tipos: quase inertes (tipo I) e pozolânicas ou hidráulicas latentes (tipo II).
Adjuvante	Material adicionado, durante o processo de mistura do betão, em pequenas quantidades em relação à massa de cimento, para modificar as propriedades do betão fresco ou endurecido.
Agregado	Material mineral granular adequado para utilização no betão. Os agregados podem ser naturais, artificiais ou reciclados de materiais previamente usados na construção.
Amassadura	Quantidade de betão fresco produzido num ciclo de operações de uma betoneira ou a quantidade descarregada durante $1min$ por uma betoneira de funcionamento contínuo.
Argamassa	Mistura feita com pelo menos um aglomerante, agregados miúdos e água. O aglomerante pode ser a cal, o cimento ou o gesso. O agregado mais comum é a areia, embora possa ser utilizado o pó de pedra.

B

Betão	Material formado pela mistura de cimento, agregados grossos e finos e água, com ou sem a incorporação de adjuvantes e adições, que desenvolve as suas propriedades por hidratação do cimento.
Betão Endurecido	Encontra-se sólido tendo desenvolvido uma certa resistência.
Betão Fresco	É completamente misturado e encontra-se ainda em condições de poder ser compactado pelo método escolhido.
Betonagem	Colocação do betão fresco para enchimento de zona limitada na estrutura.
Betoneira	Equipamento utilizado para a mistura de materiais, no qual se depositam cargas de pedra, areia, cimento e água, na proporção e textura devida, de acordo com o tipo de betão que se pretende para determinada obra.
Bombagem	Transporte de betão.

C

Carotagem	Técnica que permite realizar aberturas circulares em lages, vigas e maciços em betão armado, mesmo em locais de difícil acesso.
Carote	Pequeno espécime retirado de uma peça de betão, visando a sua caracterização mecânica.
Carotadora	Equipamento utilizado para extracção de carotes de betão endurecido.
Cimento (ligante hidráulico)	Material inorgânico finamente moído que, quando misturado com água, forma uma pasta que faz presa e endurece por meio de reacções e processos de hidratação e que, depois de endurecer, mantém a sua resistência e estabilidade mesmo debaixo de água.

Cinza volante	Material residual obtido através da captação das poeiras que são arrastadas pelos gases de combustão provenientes da queima de combustível nas centrais termoeléctricas a carvão.
Cura	Estabelecimento de condições adequadas ao favorecimento do processo de endurecimento do betão (exemplo: temperatura controlada)

E

Endurecimento	Ganho de resistência por parte do betão devido a reacções de hidratação dos seus componentes.
Ensaio esclerométrico	Consiste em determinar a resistência à compressão do betão, através da inspecção <i>in situ</i> com uso de um esclerómetro. Na realidade o que é medido é a dureza superficial do betão, valor que é posteriormente convertido com o auxílio de uma curva de correlação.
Ensaio de abaixamento	Ensaio mais utilizado em obra para verificar a classe de consistência do betão.
Esclerometria	Ver ensaio esclerométrico.
Esclerómetro	Martelo em aço, ligado a uma mola em tensão que quando largado embate num percutor em contacto com a superfície de betão. A distância entre o percutor e o martelo após a repercussão deve ser medida numa escala linear instalada no corpo do equipamento. Também conhecido por <i>martelo esclerométrico</i> .
Exsudação	Processo de saída de água do betão durante a cura.

P

Presença	Início de rigidez no betão fresco. É distinto de endurecimento, que descreve o desenvolvimento da resistência útil e mensurável. Ambos são, no entanto, mudanças graduais que são controlados pela hidratação contínua do cimento. A presença pode ser vista como um período de transição entre os estados de fluidez e rigidez real do betão.
-----------------	--

R

**Razão
água/cimento (a/c)**

Razão, em massa, entre a dosagem efectiva de água e a dosagem de cimento no betão fresco.

**Resistência
característica**

Valor de resistência abaixo do qual se espera que ocorra 5% da população de todos os possíveis resultados da resistência, relativos ao volume de betão em consideração.

S

Segregação

Separação de componentes do betão fresco, resultando numa mistura não uniforme. Em geral, isto significa alguma separação do agregado grosso da argamassa.

Slump

Ver ensaio de abaixamento.

T

Trabalhabilidade

Propriedade do betão, no estado fresco, que determina a facilidade de transporte, colocação, consolidação e acabamento, e ainda a ocorrência de desagregamento ou segregação.

Z

**Zona de Transição
Interfacial (ITZ)**

Fina camada de material da matriz em redor de cada inclusão no betão.

Índice de Matérias

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento e Objectivos	1
1.2	Estrutura do trabalho	3
1.3	Unibetão – Indústrias de Betão Preparado, S.A	4
1.3.1	A Empresa	4
1.3.2	Unidade Industrial de Frielas	4
2	Fundamento Teórico	7
2.1	Betão – Material de Engenharia	7
2.2	Matérias-Primas	8
2.2.1	Cimento Portland	8
2.2.2	Água de Amassadura	11
2.2.3	Agregados Finos e Grossos	12
2.2.4	Outras Adições	12
2.3	Resistência à Compressão do Betão	13
2.3.1	Ensaio Destrutivo	14
2.3.2	Ensaio Semi-Destrutivo	15
2.3.3	Ensaio Não Destrutivo	17
2.4	Endurecimento do Cimento Portland	20
2.4.1	Reacções dos Principais Componentes com a Água	20
2.4.2	Etapas do Mecanismo de Hidratação	23
2.4.3	Identificação de Produtos de Hidratação Presentes numa Pasta de Cimento	27
2.5	Microestrutura da Pasta de Cimento Hidratada	30
2.5.1	Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H)	32
2.5.2	Portlandite (CH)	34
2.5.3	Sulfoaluminato de Cálcio Hidratado (AF_t e AF_m)	35
2.5.4	Resíduos de Cimento Não Hidratado	36

2.5.5	Calcite (CC)	37
2.5.6	Cinza Volante	37
2.5.7	Poros	38
2.5.8	Zona de Transição Interfacial (ITZ)	38
3	Procedimento Experimental	41
3.1	Obtenção de Amostras	43
3.1.1	Determinação da consistência do betão	43
3.1.2	Execução de provetes	44
3.1.3	Cura de provetes	46
3.1.4	Carotagem	47
3.2	Caracterização do Betão	48
3.2.1	Ensaio Esclerométrico	48
3.2.2	Ensaio de Compressão	50
3.3	Caracterização da Pasta de Cimento	51
3.3.1	Preparação das amostras para análise	51
3.3.2	Difracção de Raios-X	53
3.3.3	Fluorescência de Raios-X	54
3.3.4	Análises Térmicas	55
3.3.5	Microscopia Electrónica de Varrimento	56
4	Apresentação e Discussão de Resultados	59
4.1	Caracterização do Betão	59
4.1.1	Obtenção de Curvas de Correlação	59
4.1.2	Comparação da Resistência de Provetes e da Estrutura	62
4.2	Caracterização da Pasta de Cimento	69
4.2.1	Caracterização Mineralógica	69
4.2.2	Caracterização Química	71
4.2.3	Caracterização Térmica	72
4.2.4	Caracterização Morfológica	78
5	Conclusões e Perspectivas Futuras	81
5.1	Conclusões	81
5.2	Perspectivas Futuras	83
	Bibliografia	85
	Anexos	I

A	Processo de Fabrico de Betão	III
B	Determinação do teor de humidade dos agregados	V
B.1	Método Clássico	V
B.2	Método Speedy	V
C	Difracção e Fluorescência de Raios-X	VII
C.1	Difracção de Raios-X	VII
C.2	Fluorescência de Raios-X	VIII
D	Análises Térmicas	IX
D.1	Análise Térmica Diferencial	IX
D.2	Termogravimetria	X
E	Microscopia Electrónica de Varrimento	XI
F	Calibração dos Esclerómetros	XIII
G	Compressão e Esclerometria	XXV
H	Registo de Temperatura em Fielas	XXXVII
I	Análises Térmicas	XXXIX
I.1	Amostras referentes à base de dados	XXXIX
I.2	Amostras referentes à estrutura	XLIV
J	Resultados das Análises SEM-EDX	XLIX

Índice de Figuras

2.1	(a) Esquema representativo do volume unitário de betão; (b) Secção de um provete de betão após endurecimento.	7
2.2	Exemplos de rupturas de provetes cúbicos: (a) satisfatórias; (b) não satisfatórias.	15
2.3	Elementos estruturais.	16
2.4	Direcções de aplicação de carga em carotes e provetes cúbicos.	17
2.5	Relação entre a resistência à compressão de cubos em N/mm^2 (MPa) e a dureza ao choque, fornecida pelo fabricante para o uso de esclerómetros de Schmidt (tipo N).	18
2.6	Desenvolvimento da resistência à compressão resultante da hidratação de cada composto puro que constitui o cimento Portland.	19
2.7	Etapas do mecanismo de hidratação do cimento portland.	24
2.8	Diagrama-modelo da transição de estado no processo de hidratação do cimento portland.	26
2.9	Esquema representativo do desenvolvimento microestrutural de um grão de cimento durante o processo de hidratação.	31
2.10	Micrografias de silicato de cálcio hidratado obtidas por SEM: (a) cristais de <i>C-S-H</i> em forma de lascas ou escamas; (b) <i>C-S-H</i> revestindo resíduos de cimento não hidratado.	33
2.11	Micrografias de portlandite obtidas por SEM: ; (a) nanoplacas hexagonais; (b) placa hexagonal;(c) aglomeração de nanopartículas em forma de placas redondas; (d) pormenor das nanopartículas.	34
2.12	Micrografias de etringite obtidas por SEM: (a) cristais de etringite; (b) agulhas de etringite e hidróxido de cálcio tabular crescendo no interior de um poro.	35
2.13	Micrografias de monosulfoaluminato obtidas por SEM: (a) placas hexagonais; (b) placas.	36

2.14	Micrografias de silicatos de cálcio anidros obtidas por SEM: (a) cristais de alite; (b) cristais de belite.	36
2.15	Micrografias de calcite obtidas por SEM: (a) blocos com morfologia trigonal ou romboédrica; (b) prismas hexagonais.	37
2.16	Micrografias de cinza volante obtidas por SEM.	38
2.17	Representações esquemáticas da ITZ: (a) esquema evidenciando a morfologia das fases presentes; (b) esquema evidenciando a barreira de filme de CH e gel de C-S-H.	39
2.18	Micrografias da ITZ obtidas por SEM: (a) superfície de uma brita; (b) zona de transição interfacial.	40
3.1	Esquema representativo do procedimento experimental.	42
3.2	Ensaio de abaixamento: (a) esquema do procedimento; (b) fotografia de um ensaio de slump efectuado durante este trabalho.	44
3.3	Moldes utilizados: (a) para um provete cúbico ($150mm \times 150mm \times 150mm$); (b) para três prismas ($40mm \times 40mm \times 160mm$).	44
3.4	Processo de moldagem de prismas de argamassa: (a) separação da pasta de cimento por peneiração; (b) enchimento do molde; (c) agitação manual; (d) identificação dos prismas.	45
3.5	Endurecimento dos provetes nos moldes.	46
3.6	Cura dos provetes: (a) condições normalizadas; (b) em condições ambientais.	46
3.7	Carotagem: (a) processo; (b) caroteadora; (c) carote pronta a ser removida.	47
3.8	Carotes: (a) de uma viga de fundação; (b) de um pilar; (c) da laje.	47
3.9	Ensaio esclerométrico: (a) esquema do funcionamento do esclerómetro; (b) fotografia de um ensaio esclerométrico efectuado durante este trabalho.	48
3.10	Ensaio esclerométrico aos provetes cúbicos: (a) provetes com marcação quadriculada prontos a ensaiar e os dois esclerómetros utilizados; (b) ensaio a um provete.	49
3.11	Ensaio esclerométrico à estrutura: (a) num pilar (orientação = 0°); (b) na laje (orientação = 90°).	50
3.12	Ensaio de compressão: (a) prensa; (b) provete cúbico pronto a ensaiar.	51
3.13	Britagem: (a) prisma seco; (b) redução do prisma; (c) pedaços.	52
3.14	Moinho de martelos: (a) exterior; (b) interior; (c) crivo de 1,5mm.	52
3.15	Moagem: (a) alimentação do moinho com o material; (b) remoção do excesso de material do interior do moinho; (c) pedaços e pó obtido.	53

3.16	Enquartação: (a) monte achatado e alisado; (b) divisão em quatro partes iguais; (c) remoção de duas partes opostas; (d) amostra identificada pronta para análise.	53
3.17	Análise de DRX: (a) difractómetro; amostras (b) em pó e (c) em pedaço.	54
3.18	Análise de FRX: (a) espectrómetro de raios-X; (b) porta-amostras.	55
3.19	Equipamento para análise de SEM:(a) microscópio; (b) metalizador.	56
4.1	Comparação de amostras de betão C25/30 com adição de cinza: (a) ensaio de compressão; (b) ensaio esclerométrico.	60
4.2	Comparação de amostras de betão C25/30 sem adição de cinza: (a) ensaio de compressão; (b) ensaio esclerométrico.	60
4.3	Comparação de amostras de betão C30/37 com adição de cinza: (a) ensaio de compressão; (b) ensaio esclerométrico.	60
4.4	Comparação de amostras de betão C30/37 sem adição de cinza: (a) ensaio de compressão; (b) ensaio esclerométrico.	61
4.5	Comparação entre as curvas de correlação obtidas para os esclerómetros A e B com a curva fornecida pelo fabricante.	61
4.6	Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID43 (Pilar - C 25/30), respectivos carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro B, ao longo da idade.	64
4.7	Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID47 (Lage - C 25/30 sem cinza), respectivos carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro B, ao longo da idade.	65
4.8	Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID46 (Lage - C 30/37), respectivos carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro B, ao longo da idade.	66
4.9	Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes ID41 (Pavimento - C 30/37) e de esclerometria, realizados ao longo da idade: (a) com o esclerómetro A; (b) com o esclerómetro B.	68
4.10	Comparação dos difractogramas obtidos para as amostras ID28 (base de dados comparativa) com diferentes graus de hidratação:(a) em pó; (b) em pedaço.	70
4.11	Comparação dos difractogramas obtidos para as amostras ID48 (estrutura) com diferentes graus de hidratação:(a) em pó; (b) em pedaço.	70
4.12	Análises DTA e TG da amostra ID48 com 3 dias de hidratação.	73
4.13	Análises DTA e TG da amostra ID48 com 28 dias de hidratação.	73
4.14	Análises DTA e TG da amostra ID48 com 90 dias de hidratação.	73

4.15	Derivada Termogravimétrica (DTG) das amostras ID48 com 3, 28 e 90 dias de hidratação.	75
4.16	Análise Térmica Diferencial (DTA) efectuada às matérias-primas. . . .	75
4.17	Análise Termogravimétrica (TG) efectuada às matérias-primas.	76
4.18	Derivada Termogravimétrica (DTG) efectuada para as matérias-primas.	76
4.19	Micrografias da pasta de cimento com 3 dias de hidratação: (a) parte interior da amostra ID28; (b) parte exterior da amostra ID28; (c) parte interior da amostra ID48; (d) parte exterior da amostra ID48.	78
4.20	Micrografias da pasta de cimento com 28 dias de hidratação: (a) parte interior da amostra ID28; (b) parte interior da amostra ID48; (c) parte interior da amostra ID48 (estrutura); (d) parte exterior da amostra ID48.	79
4.21	Micrografias da pasta de cimento com 90 dias de hidratação: (a) parte interior da amostra ID28; (b) parte interior da amostra ID28; (c) parte exterior da amostra ID28; (d) parte exterior da amostra ID28.	80
A.1	Vista da unidade industrial de Frielas com identificação dos departamentos que a constituem.	III
A.2	Esquema representativo do funcionamento das duas centrais de Frielas .	III
B.1	Speedy.	V
C.1	Esquema exemplificativo do princípio de funcionamento do DRX. . . .	VII
F.1	Curva de calibração esclerométrica referente ao esclerómetro A.	XIII
F.2	Curva de calibração esclerométrica referente ao esclerómetro B.	XIII
G.1	Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID39 (Viga - C 25/30), respectivos carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro A, ao longo da idade.	XXV
G.2	Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID39 (Viga - C 25/30), respectivos carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro B, ao longo da idade.	XXV
G.3	Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID40 (Viga - C 30/37), respectivos carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro A, ao longo da idade.	XXVI
G.4	Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID40 (Viga - C 30/37), respectivos carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro B, ao longo da idade.	XXVI

G.5	Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID41 (Pavimento - C 30/37) e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro A, ao longo da idade.	XXVII
G.6	Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID41 (Pavimento - C 30/37) e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro B, ao longo da idade.	XXVII
G.7	Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID42 (Pavimento - C 25/30) e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro A, ao longo da idade.	XXVIII
G.8	Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID42 (Pavimento - C 25/30) e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro B, ao longo da idade.	XXVIII
G.9	Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID43 (Pilar - C 25/30), respectivos carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro A, ao longo da idade.	XXIX
G.10	Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID43 (Pilar - C 25/30), respectivos carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro B, ao longo da idade.	XXIX
G.11	Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID44 (Pilar - C 30/37), respectivos carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro A, ao longo da idade.	XXX
G.12	Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID44 (Pilar - C 30/37), respectivos carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro B, ao longo da idade.	XXX
G.13	Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID45 (Pilar - C 25/30 sem cinza), respectivos carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro A, ao longo da idade. XXXI	XXXI
G.14	Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID45 (Pilar - C 25/30 sem cinza), respectivos carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro B, ao longo da idade. XXXI	XXXI
G.15	Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID46 (Lage - C 30/37), respectivos carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro A, ao longo da idade.	XXXII
G.16	Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID46 (Lage - C 30/37), respectivos carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro B, ao longo da idade.	XXXII

G.17	Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID47 (Lage - C 25/30 sem cinza), respectivos carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro A, ao longo da idade.	XXXIII
G.18	Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID47 (Lage - C 25/30 sem cinza), respectivos carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro B, ao longo da idade.	XXXIII
G.19	Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID48 (Lage - C 25/30), respectivos carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro A, ao longo da idade.	XXXIV
G.20	Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID48 (Lage - C 25/30), respectivos carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro B, ao longo da idade.	XXXIV
H.1	Temperatura registada em Frielas de duas em duas horas entre os meses de Fevereiro e Junho de 2010.	XXXVII
I.1	Análises térmicas da amostra ID28 com 3 dias de hidratação.	XXXIX
I.2	Análises térmicas da amostra ID28 com 7 dias de hidratação.	XL
I.3	Análises térmicas da amostra ID28 com 28 dias de hidratação.	XLI
I.4	Análises térmicas da amostra ID28 com 56 dias de hidratação.	XLII
I.5	Análises térmicas da amostra ID28 com 90 dias de hidratação.	XLIII
I.6	Análises térmicas da amostra ID48 com 3 dias de hidratação.	XLIV
I.7	Análises térmicas da amostra ID48 com 7 dias de hidratação.	XLV
I.8	Análises térmicas da amostra ID48 com 28 dias de hidratação.	XLVI
I.9	Análises térmicas da amostra ID48 com 56 dias de hidratação.	XLVII
I.10	Análises térmicas da amostra ID48 com 90 dias de hidratação.	XLVIII
J.1	Análise SEM-EDX da amostra ID28 com 3 dias de hidratação (parte interior): (a) micrografia (imagem BE - escala $20\mu m$) com identificação dos pontos analisados; (b) espectros global e relativos a cada ponto analisado.	XLIX
J.2	Análise SEM-EDX da amostra ID48 com 3 dias de hidratação (parte exterior): (a) micrografia (imagem BE - escala $20\mu m$) com identificação dos pontos analisados; (b) espectros global e relativos a cada ponto analisado.	XLIX

J.3	Análise SEM-EDX da amostra ID28 com 28 dias de hidratação (parte interior): (a) micrografia (imagem BE - escala $20\mu m$) com identificação dos pontos analisados; (b) espectros global e relativos a cada ponto analisado.	L
J.4	Análise SEM-EDX da amostra ID28 com 28 dias de hidratação (parte exterior): (a) micrografia (imagem BE - escala $20\mu m$); (b) espectro global.	L
J.5	Análise SEM-EDX da amostra ID48 com 28 dias de hidratação (parte exterior): (a) micrografia (imagem BE - escala $20\mu m$) com identificação dos pontos analisados; (b) espectros global e relativos a cada ponto analisado.	LI
J.6	Análise SEM-EDX da amostra ID28 com 90 dias de hidratação (parte interior): (a) micrografia (imagem BE - escala $20\mu m$) com identificação dos pontos analisados; (b) espectros global e relativos a cada ponto analisado.	LII
J.7	Análise SEM-EDX da amostra ID28 com 90 dias de hidratação (parte exterior): (a) micrografia (imagem BE - escala $20\mu m$) com identificação dos pontos analisados; (b) espectros global e relativos a cada ponto analisado.	LIII

Índice de Tabelas

2.1	Composição típica do cimento portland comum.	9
2.2	Composição típica (em termos de óxidos) do cimento portland.	10
2.3	Classes de abaixamento.	11
2.4	Classes de resistência à compressão de betões.	14
2.5	Compostos geralmente identificados em análises de DRX a pastas de cimento.	28
2.6	Reacções que ocorrem com o aumento da temperatura numa pasta de cimento.	29
2.7	Características morfológicas dos principais produtos de hidratação. . . .	32
3.1	Plano de trabalho.	41
4.1	Comparação dos resultados da resistência do betão considerando as diversas variáveis inerentes aos ensaios de compressão e esclerometria realizados ao longo da idade.	63
4.2	Composição química das matérias-primas obtida por FRX.	71
4.3	Composição química das pastas de cimento obtida por FRX.	72
4.4	Valores obtidos nas análises térmicas realizadas para as amostras referentes à estrutura (ID48).	77
F.1	Resultados dos ensaios referentes à base de dados comparativa (amostras ID1 a ID4).	XIV
F.2	Resultados dos ensaios referentes à base de dados comparativa (amostras ID5 a ID8).	XV
F.3	Resultados dos ensaios referentes à base de dados comparativa (amostras ID9 a ID12).	XVI
F.4	Resultados dos ensaios referentes à base de dados comparativa (amostras ID13 a ID16).	XVII

F.5	Resultados dos ensaios referentes à base de dados comparativa (amostras ID17 a ID20).	XVIII
F.6	Resultados dos ensaios referentes à base de dados comparativa (amostras ID21 a ID24).	XIX
F.7	Resultados dos ensaios referentes à base de dados comparativa (amostras ID25 a ID28).	XX
F.8	Resultados dos ensaios referentes à base de dados comparativa (amostras ID29 a ID32).	XXI
F.9	Resultados dos ensaios referentes à base de dados comparativa (amostras ID33 a ID36).	XXII
F.10	Resultados dos ensaios referentes à base de dados comparativa (amostras ID37 e ID38).	XXIII
G.1	Valores obtidos nos ensaios de resistência à compressão e esclerometria efectuados em provetes cúbicos, na estrutura e em carotes.	XXXV
I.1	Valores obtidos na análise DTA/TG da amostra ID28 com 3 dias de hidratação.	XXXIX
I.2	Valores obtidos na análise DTA/TG da amostra ID28 com 7 dias de hidratação.	XL
I.3	Valores obtidos na análise DTA/TG da amostra ID28 com 28 dias de hidratação.	XLI
I.4	Valores obtidos na análise DTA/TG da amostra ID28 com 56 dias de hidratação.	XLII
I.5	Valores obtidos na análise DTA/TG da amostra ID28 com 90 dias de hidratação.	XLIII
I.6	Valores obtidos na análise DTA/TG da amostra ID48 com 3 dias de hidratação.	XLIV
I.7	Valores obtidos na análise DTA/TG da amostra ID48 com 7 dias de hidratação.	XLV
I.8	Valores obtidos na análise DTA/TG da amostra ID48 com 28 dias de hidratação.	XLVI
I.9	Valores obtidos na análise DTA/TG da amostra ID48 com 56 dias de hidratação.	XLVII
I.10	Valores obtidos na análise DTA/TG da amostra ID48 com 90 dias de hidratação.	XLVIII

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento e Objectivos

O presente trabalho, realizado em parceria entre a Unibetão – Indústrias de Betão Preparado, S.A. e o Departamento de Ciências dos Materiais da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, encontra-se inserido no âmbito do Mestrado em Engenharia de Materiais da mesma faculdade, visando a realização de um estudo a nível da resistência à compressão do betão, comparando o método clássico destrutivo (ensaio de compressão) com um método não destrutivo: a esclerometria.

Desde 1940, têm sido realizados vários estudos com o intuito de desenvolver métodos de ensaio não destrutivos, para avaliar a qualidade do betão aplicado numa estrutura sem o danificar. Muitos testes foram propostos, embora todos eles ainda apresentem dificuldades na interpretação dos seus resultados [Mindess/Young/Darwin, 2003, p. 386]. Em particular, o ensaio esclerométrico é um método de ensaio *in situ* não destrutivo que tem sido amplamente aplicado em diversos países, encontrando-se na literatura técnica internacional trabalhos de vários autores nos quais são apresentadas correlações entre os dois métodos (destrutivo e não destrutivo). Ele permite dar uma estimativa da resistência mecânica do betão sem o danificar, ou seja, sem perda da sua capacidade de resistência. Esta estimativa é dada através da curva de calibração do aparelho. No entanto, as curvas de calibração fornecidas pelos fabricantes de esclerómetros poderão referir-se a betões preparados com outros materiais e em diferentes condições, devendo-se portanto dispor de correlações fiáveis obtidas para o tipo de betão que se pretende avaliar [Evangelista, 2002, pp. 8 e 49].

A Unibetão tencionava dispor de um estudo aprofundado onde fossem determinadas curvas correlacionando os dois métodos, de forma a poder controlar até que ponto o ensaio não destrutivo produz resultados fiáveis da resistência do betão. Este

estudo foi realizado para dois aparelhos (esclerómetros Schmidt - Tipo N) geralmente utilizados, pela mesma entidade, na avaliação da qualidade do betão aplicado em obra.

Não sendo, os provetes, verdadeiramente representativos do betão existente numa estrutura, devido às diferentes condições de aplicação, compactação e cura [Evangelista, 2002, p. 1]; uma análise comparativa das propriedades do betão, em provetes e em obra, utilizando os métodos mais racionais, dará uma validade científica e experimental à investigação. Portanto, para o presente estudo são efectuados ensaios esclerométricos numa estrutura consolidada e em provetes cúbicos normalizados. São também efectuados ensaios de compressão aos provetes cúbicos e a carotes provenientes da estrutura. Estes ensaios são efectuados para várias idades.

Os resultados obtidos nestes ensaios encontram-se, geralmente, afectados por alguns parâmetros, como: o tipo e o tamanho do agregado, a composição e a proporção de componentes na mistura e a idade do material [Mindess/Young/Darwin, 2003, p. 386]. Segundo Coutinho (1988a, p. 17), à medida que a dosagem de cimento aumenta, a tensão de ruptura do betão tende para um valor constante, dependendo da tensão de ruptura da rocha que constitui o inerte; sendo geralmente superior a 60 ou 70MPa. Logo, a resistência do betão está directamente relacionada com a resistência da pasta de cimento.

A estrutura utilizada como elemento de estudo, no presente trabalho, tem na sua constituição diferentes classes de betão, pelo que são efectuados ensaios em provetes feitos com o mesmo betão utilizado na estrutura, pretendendo-se aferir o comportamento do diferente material e a forma como pode influenciar os resultados. A realização de um estudo comparativo relacionando as correlações entre ensaios destrutivos e não destrutivos, obtidas a partir de corpos de prova padronizados e testemunhos extraídos de diferentes elementos estruturais (lage, viga e pilar) é considerado importante, sendo sugerido por outros investigadores [Evangelista, 2002, p. 201].

Como material compósito, o betão é uma mistura de pasta de cimento (matriz) com inclusões de agregados de vários tamanhos (reforço). Foi verificado que a presença de grãos na pasta de cimento provoca uma fina camada de material da matriz em redor de cada inclusão, podendo ser mais porosa do que o volume de toda a restante matriz circundante. Essa camada é chamada de zona de transição interfacial. Estudos realizados por outros investigadores mostraram que a zona de transição entre a matriz e as fases de agregação da massa tem um papel importante nas propriedades de um betão [Sun/Garboczi/Shah, 2007, p. 22 e Mindess/Young/Darwin, 2003, p. 304]. É, portanto, feita uma análise da pasta de cimento a nível da composição e das fases ocorrentes, ao longo da idade do betão, com o intuito de realizar um estudo acompanhando o endurecimento do betão e a forma como as fases presentes na pasta podem influenciar

a resistência do mesmo, procurando de alguma forma relacioná-lo com os resultados obtidos a nível da resistência mecânica. Este estudo engloba as seguintes técnicas de caracterização: difracção de raios-X, fluorescência de raios-X, análise térmica diferencial e termogravimétrica, e microscopia electrónica de varrimento.

1.2 Estrutura do trabalho

Este trabalho encontra-se dividido em 5 capítulos, estando o presente texto incluído no primeiro. De seguida apresenta-se uma breve descrição de cada um dos capítulos.

Capítulo 1 – Introdução: é apresentada uma panorâmica geral sobre o tema em estudo e a sua importância, enumerando os tipos de ensaio realizados. Este capítulo pretende ser a base para a compreensão deste trabalho pelo que engloba também a forma como a informação foi distribuída pelos diferentes capítulos constituintes do presente documento escrito. Por último, é feita uma breve apresentação da empresa que solicitou a realização deste estudo.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: é abordado o tema do estudo proposto, sendo feito um levantamento de toda a pesquisa efectuada para melhor justificar cada ponto deste estudo.

Capítulo 3 – Procedimento Experimental: é esquematizado e descrito todo o procedimento experimental para a realização do trabalho, sendo apresentada uma breve descrição das técnicas e dos parâmetros utilizados. (O princípio de funcionamento de algumas técnicas é apresentado em anexo).

Capítulo 4 – Apresentação e Discussão de Resultados: são apresentados os resultados obtidos e é feita a análise dos mesmos.

Capítulo 5 – Conclusões e Perspectivas Futuras: é feita uma síntese das principais conclusões retiradas da realização deste trabalho. É feita a confrontação com os objectivos pretendidos e são apresentadas sugestões para futuros trabalhos.

1.3 Unibetão – Indústrias de Betão Preparado, S.A

1.3.1 A Empresa

A Unibetão – Indústrias de Betão Preparado, S.A. é uma empresa certificada pela ISO 9001:2008 e a sua actividade está classificada como sendo de fabrico e comercialização de betão, correspondendo-lhe o CAE 26 630. Exercendo a sua actividade no sector da construção civil e obras públicas, foi responsável pelo fornecimento de betão para a construção de obras de grande envergadura, das quais se destacam na área da Grande Lisboa: o Hospital Dr. Fernando Fonseca (Amadora/Sintra), o Centro Cultural de Belém, o El Corte Inglés, o Atrium Saldanha e a Praça Sony, o Pavilhão Conhecimento dos Mares e o Pavilhão do Futuro (3 obras da Expo'98 nas quais foram aplicados betões com cimento branco, arquitectónicos ou pigmentados).

Sendo uma empresa do grupo Secil – Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A., tem actualmente um capital social de €13.110.000,00 totalmente detido pela Secil Betões e Inertes SGPS, S.A.

A constituição da Unibetão remonta a 1974 no âmbito e com os capitais provenientes da então Cinorte – Companhia de Cimentos do Norte. Com a nacionalização dos cimentos é integrada na Cimpor de onde transita por decreto de 1980 para o IPE, que a vem a alienar por concurso público em 1984, data a partir da qual passa a integrar o conjunto das participações detidas pela Secil no sector. A dimensão da empresa era nessa altura modesta, contando com cinco centrais, uma em Braga – a primeira da Unibetão – e as outras em Viana do Castelo, Vila da Feira, Vila Nova de Gaia e Sines. Desde então tem-se vindo a verificar um crescimento contínuo aliado a uma ampliação do seu raio de acção, seja pela compra de outras empresas, seja pela montagem de novas Centrais.

A Unibetão tem a sua sede na Av. António Augusto de Aguiar, 21-4.^o, 1069-128 Lisboa, e conta actualmente com 41 Centrais fixas distribuídas em unidades industriais espalhadas por todo o país, principalmente nas áreas litoral norte e centro.

1.3.2 Unidade Industrial de Frielas

O presente trabalho foi desenvolvido na unidade industrial de Frielas (Loures), onde se encontra situado o Laboratório Central, que requereu este estudo.

Esta unidade é constituída por duas centrais (identificadas como CENTRAL 1 e CENTRAL 2) que funcionam de forma independente, como se pode ver no esquema de funcionamento apresentado no Anexo A. No mesmo anexo é visível uma fotografia da unidade industrial, onde é possível ver a disposição de cada elemento que a constitui.

Todo o processo é sucintamente explicado de seguida.

O trabalho realizado por cada uma destas centrais é comandado e controlado na sala de produção, onde chegam os pedidos dos clientes, anteriormente encaminhados pelo departamento comercial.

Os agregados armazenados em baias são transportados até ao grupo de tolvas onde são pesados. É feita também a pesagem de cimento, água, adjuvantes e adições (cinzas), que são misturados produzindo o betão. Regularmente são efectuados ensaios aos agregados. Em laboratório, é determinado o teor de humidade das areias e é feita uma análise granulométrica às areias e à brita.

O camião betoneira é, então, carregado e efectua o transporte do material até à obra. De acordo com um plano de amostragem para controlo da produção, antes de seguir para a obra, é recolhida uma amostra do betão produzido para fazer provetes que são ensaiados em laboratório, seja por pedido do cliente seja por procedimento interno da unidade industrial. A central de Frielas, em particular, tem o controlo da produção certificado de acordo com a norma NP EN 206-1:2007.

Capítulo 2

Fundamento Teórico

2.1 Betão – Material de Engenharia

O betão é o principal material de engenharia usado em construções como: pontes, edifícios, barragens, muros de suporte e em pavimentos e estradas. É um compósito cerâmico (ver Figura 2.1) formado pela mistura de agregados grossos e finos (britas e areias), rodeados por uma matriz dura obtida a partir da pasta de um cimento (o ligante), constituída normalmente por cimento portland misturado com água [Smith, 1998, p. 792]. A capacidade de endurecimento desta matriz, confere à mistura uma coesão e resistência permitindo-lhe servir como material de construção [Coutinho, 1988a, p. 1].

Segundo a norma NP EN 206-1:2007, referente à especificação, desempenho, produção e conformidade do betão, define-se betão fresco como aquele que é completamente misturado e ainda em condições de poder ser compactado pelo método escolhido. O betão endurecido, por seu lado, encontra-se sólido tendo desenvolvido uma certa resistência.

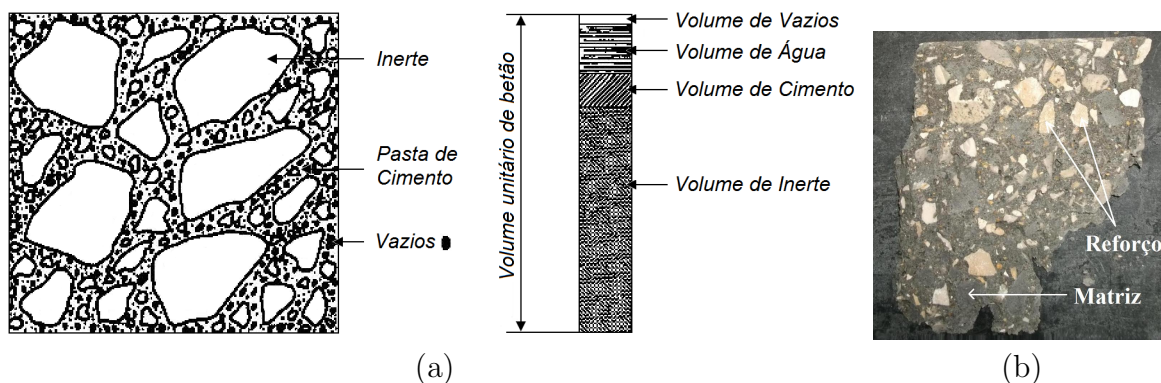


Figura 2.1: (a) Esquema representativo do volume unitário de betão [Fonte: Coutinho, 1988b, p. 8]; (b) Secção de um provete de betão após endurecimento.

No betão, a pasta de cimento actua como uma “cola”, ligando entre si as partículas do agregado neste tipo de material compósito [Smith, 1998, p. 792].

Como material de construção, o betão oferece muitas vantagens, incluindo, por exemplo, flexibilidade na escolha das formas (uma vez que pode ser vertido), economia, durabilidade, resistência ao fogo, possibilidade de ser fabricado no local e aparência estética. Do ponto de vista da engenharia, as principais desvantagens do betão residem na sua baixa resistência à tracção, baixa ductilidade e alguma contracção [Smith, 1998, p. 792].

2.2 Matérias-Primas

O betão pode apresentar composições variadas, mas geralmente contém (em volume) cerca de 7 a 15% de cimento portland, 14 a 21% de água, 0,5 a 8% de ar, 24 a 30% de agregados finos e 31 a 51% de agregados grossos [Smith, 1998, p. 792]. Podem ainda ser adicionados à sua composição adjuvantes ou outros constituintes (cinzas, por exemplo), de forma a conferir diferentes propriedades ao betão fresco ou endurecido consoante a aplicação pretendida.

2.2.1 Cimento Portland

O cimento portland é o mais importante ligante hidráulico utilizado na construção civil em todo o mundo. Os ligantes hidráulicos são constituídos por pós muito finos que ao serem amassados com água formam uma pasta cujo endurecimento ocorre devido apenas à reacção química entre eles e a água. São denominados ligantes porque possuem a capacidade de poder aglomerar uma porção elevada de materiais inertes, como areias, godos, pedra britada, etc., conferindo grande coesão e resistência ao conjunto. E consideram-se hidráulicos porque, além de endurecerem ao ar, são capazes de adquirir elevadas resistências debaixo de água, suportando perfeitamente a sua acção [Coutinho, 1988a, p. 125].

Este cimento é obtido a partir de uma mistura devidamente proporcionada de calcário (carbonato de cálcio), argila (silicatos de alumínio e ferro hidratados) e, eventualmente, outra ou outras substâncias apropriadas (ricas em sílica, alumina ou ferro). Os componentes após serem reduzidos a pó muito fino, são misturados e introduzidos num forno rotativo estando sujeitos a temperaturas entre 1400 e 1650°C. A estas temperaturas as matérias reagem entre si dando origem a novos compostos. A reacção é facilitada pela fase líquida obtida pela fusão de cerca de 20% da matéria-prima. Os

novos compostos, produtos da reacção, ao arrefecerem rapidamente aglomeram-se em pedaços de dimensões geralmente entre 2 e 20 *mm*, a que se dá o nome de clínquer, sendo estes posteriormente reduzidos a pó. [Coutinho, 1988a, p. 131 e Smith, p. 793].

Existem vários tipos de cimento que são produzidos por variação das percentagens dos seus constituintes, sendo classificados consoante as propriedades para determinada aplicação. O cimento portland Tipo I é de aplicação genérica, sendo geralmente aplicado em passeios, edifícios em betão armado, pontes, aquedutos e tanques. É utilizado quando, por exemplo, o betão não irá ser exposto a um ataque por sulfatos provenientes do solo ou da água (neste caso aplica-se cimento Tipo II ou Tipo V, caso o ataque seja forte), quando a velocidade de endurecimento não é crucial (caso do cimento Tipo III que apresenta um endurecimento rápido e consequente resistência mecânica elevada ao fim de um período relativamente curto) ou quando não existem problemas a nível do aumento de temperatura resultante do calor gerado no processo de hidratação (caso do cimento Tipo IV que apresenta baixo calor de hidratação, sendo este um factor crítico na construção de estruturas de betão muito espessas como grandes barragens) [Smith, 1998, pp. 793 e 794].

A composição química típica deste cimento, do ponto de vista prático, vem apresentada na Tabela 2.1. É de notar que as percentagens em peso não perfazem os 100%, o restante encontra-se atribuído às impurezas.

Tabela 2.1: Composição típica do cimento portland comum.

Nome comum	Nome químico	Fórmula química	Notação abreviada	Concentração (%)
Alite	Silicato tricálcico	$3CaO.SiO_2$	C_3S	55
Belite	Silicato bicálcico	$2CaO.SiO_2$	C_2S	18
Celite	Aluminato tricálcico	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A	10
Felite ¹	Aluminoferrite tetracálcica	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF	8
Gesso	Sulfato de cálcio bihidratado	$CaSO_4.2H_2O$	$C\bar{S}H_2$	6

[Fonte: adaptado de Mindess/Young/Darwin, pp. 21 e 30]

As fórmulas químicas destes compostos são tradicionalmente escritas numa notação em óxidos frequentemente usada em química cerâmica. No entanto, esta notação

¹Também denominada por “Fase Ferrítica”.

dá lugar a uma outra abreviada, simples e útil, que é usada por muitos cientistas em todo o mundo, e também será aqui adoptada. Nesta notação, cada fórmula de óxido é abreviada por recurso a uma única letra maiúscula. Quando a fórmula química de dado composto possui mais do que um mesmo óxido, esse número é contabilizado sendo colocado em índice à frente da letra maiúscula que o define. Alguns óxidos têm de ser abreviados por uma letra maiúscula com uma barra em cima, visto a letra mais apropriada já se encontrar atribuída. Por exemplo, o SO_3 é abreviado para $\bar{S}$, visto S estar atribuído a SiO_2 [Mindess/Young/Darwin, 2003, p.21]. Por vezes, é inserida uma letra em índice de forma a fazer distinção de fases, como será visto mais à frente na secção 2.4 deste capítulo.

Na Tabela 2.2 é apresentada a composição em termos de óxidos presentes no cimento portland. Como se pode ver nessa mesma tabela, a cal livre (óxido de cálcio, CaO) é a que se encontra presente em maior quantidade, sendo o calcário (carbonato de cálcio, $CaCO_3$) a principal fonte desse óxido [Mindess/Young/Darwin, 2003, p. 15].

Tabela 2.2: Composição típica (em termos de óxidos) do cimento portland.

Óxido	Notação abreviada	Nome comum	Concentração (%)
CaO	C	Cal livre	65
SiO_2	S	Sílica	21
Al_2O_3	A	Alumina	6
Fe_2O_3	F	Óxido de ferro III	3
MgO	M	Magnésia	3
K_2O	K	Alcális	<1
Na_2O	N	"	<1
SO_3	$\bar{S}$	Trióxido de enxofre	2
CO_2	$\bar{C}$	Dióxido de carbono	—
H_2O	H	Água	—

[Fonte: adaptado de Mindess/Young/Darwin, p. 22]

As matérias-primas básicas do cimento portland são, portanto, a cal (CaO), a sílica (SiO_2), a alumina (Al_2O_3) e o óxido de ferro (Fe_2O_3). É ainda adicionada uma pequena quantidade de gesso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) de modo a controlar o tempo de presa do betão, ou seja o tempo de perda de consistência que antecede o endurecimento propriamente dito (ver secção 2.4.1, equação 2.4).

2.2.2 Água de Amassadura

A água é um componente essencial de uma argamassa² por duas funções primordiais [Polito, 2008, p. 53]:

- possibilita que a mistura seja trabalhável. A trabalhabilidade de um betão é definida como sendo a propriedade deste, no estado fresco, que determina a facilidade de transporte, colocação, consolidação e acabamento e ainda a ocorrência de desagregamento ou segregação [Coutinho, 1988b, p. 18];
- combina-se quimicamente com os aglomerantes proporcionando o endurecimento e consequente resistência da argamassa.

Amassadura é definida, segundo a norma NP EN 206-1:2007, como sendo a quantidade de betão fresco produzido num ciclo de operações de uma betoneira ou a quantidade descarregada durante 1 *min* por uma betoneira de funcionamento contínuo.

A consistência e trabalhabilidade são factores muito importantes e estão directamente relacionados com a relação água/cimento (a/c) no betão.

O betão é classificado pela sua consistência de acordo com NP EN 206-1:2007. Essa classificação é apresentada na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Classes de abaixamento.

Classe	Abaixamento (<i>mm</i>)
S1	10 a 40
S2	50 a 90
S3	100 a 150
S4	160 a 210
S5	≥ 210

[Fonte: NP EN 206-1:2007, p. 24]

Estas classes são definidas através de um ensaio de abaixamento, ensaio este que será explicado mais à frente na subsecção 3.1.1 do Capítulo 3, que se refere ao procedimento experimental.

Para o fabrico de betão pode-se utilizar água de variadas origens tais como: a água subterrânea, residual doméstica ou industrial. No entanto, é necessária a realização de ensaios para verificar o grau de contaminações e se os parâmetros normalizados estão todos dentro dos limites admitidos.

²Mistura de pelo menos um aglomerante, agregados miúdos e água.

No presente trabalho foi utilizada água potável, não sendo necessária a realização de ensaios de controlo. Geralmente diz-se que se uma água é boa para beber, então também é boa para o fabrico de betão [Polito, 2008, p. 53].

2.2.3 Agregados Finos e Grossos

Os agregados constituem o conjunto de inertes presentes na composição do betão. A classificação destes materiais como inertes tem, no entanto, sido contestada ao longo do tempo visto que, com o entendimento do seu real desempenho nas propriedades de uma argamassa e de um betão, não podem ser considerados como tal, no verdadeiro sentido da palavra [Polito, 2008, p. 40]. Estes materiais influenciam todas as propriedades do betão, em particular na sua resistência através da distribuição granulométrica, da sua tensão de ruptura e da resistência da ligação entre a pasta de cimento e a sua superfície [Coutinho, 1988a, p. 17].

Sendo materiais de origem mineral, os agregados correspondem às areias (fundamentalmente, quartzo - SiO_2) e britas (calcário - $CaCO_3$, no caso em estudo).

De acordo a norma NP EN 12620:2004, a dimensão do agregado é a designação dada em termos das aberturas do peneiro inferior(d) e do superior (D) utilizados na análise granulométrica, expressando-se segundo a razão d/D . Os agregados finos são, então, aqueles cujas partículas são de menores dimensões e cujo D é menor ou igual a $4mm$. Os agregados grossos são constituídos por partículas de maiores dimensões e cujo D é maior ou igual a $4mm$ e d é maior ou igual a $2mm$. Como controlo da dimensão do agregado deve ser feita regularmente uma análise granulométrica dos agregados. Esta é feita pelo método de peneiração, segundo a norma NP EN 933-1:2000.

A humidade destes também é um factor importante, a sua determinação permite que sejam feitas correcções a nível da água de amassadura a adicionar. São utilizados geralmente dois testes (descritos no Anexo B): um por secagem do material em estufa e outro com o auxílio de um humidímetro.

2.2.4 Outras Adições

As adições são definidas como materiais finos aplicados no betão com o propósito de melhorar determinadas propriedades ou alcançar propriedades especiais para uma dada aplicação. Podem ser, por exemplo, adicionados: adjuvantes, fibras poliméricas ou metálicas, sílica activa, pigmentos, resíduos e sub-produtos industriais (cinzas volantes). Os aditivos químicos vão interagir com os vários constituintes do cimento, influenciando as reacções de hidratação do cimento [Castro/Pandolfelli, 2009].

Neste trabalho foram considerados betões com e sem adição de cinza volante. As cinzas volantes constituem o material residual obtido através da captação das poeiras que são arrastadas pelos gases de combustão provenientes da queima de combustível nas centrais termoeléctricas a carvão [Coutinho, 1988a, p. 244]. Dada a sua origem nas impurezas minerais contidas no carvão, as cinzas são maioritariamente constituídas por sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro III (Fe_2O_3). Geralmente, possuem ainda pequenas percentagens de óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO), trióxido de enxofre (SO_3), óxido de potássio (K_2O), óxido de sódio (Na_2O), óxido de titânio (TiO_2) e cloretos [Coutinho, 1988a, p. 247].

As principais vantagens de aplicação de cinzas volantes na constituição de um betão são [Coutinho, 1988a, pp. 246 e 248]:

- substituir parcialmente o cimento no betão permitindo economizar a esse nível;
- corrigir a granulometria do inerte fino, diminuindo a exsudação (aparecimento de água na superfície do betão devido à existência de poucos finos nos agregados, baixos níveis de cimento ou demasiada água contida na mistura);
- facilitar a bombagem (transporte de betão);
- retardar o início de presa;
- e aumentar a trabalhabilidade.

2.3 Resistência à Compressão do Betão

A selecção do tipo de betão a utilizar em determinada aplicação, tendo em vista a sua resistência à compressão, deve ser feita tendo também em consideração o(s) ambiente(s) a que a estrutura ou elemento estrutural vai estar sujeito ao longo da sua vida útil, por forma a garantir a durabilidade pretendida. Os principais factores que afectam a resistência do betão são [Evangelista, 2002, p. 5]:

- as propriedades dos componentes (cimento, agregados, adjuvantes e outras adições);
- as proporções dos componentes (relações a/c e agregado/cimento);
- condições de cura;
- idade.

Na norma NP EN 206-1:2007 são apresentadas as várias classificações atribuídas ao betão, incluindo a classificação quanto à resistência à compressão, como se pode ver na Tabela 2.4. Nessa mesma tabela é visível a resistência esperada para determinada classe correspondente a diferentes tipo de provetes: cilíndricos e cúbicos.

Tabela 2.4: Classes de resistência à compressão de betões.

Classe de resistência à compressão	Resistência característica mínima em cilindros $f_{ck,cyl}$ (N/mm^2)	Resistência característica mínima em cubos $f_{ck,cube}$ (N/mm^2)
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60
C55/67	55	67
C70/85	70	85
C80/95	80	95
C90/105	90	105
C100/115	100	115

[Fonte: NP EN 206-1:2007, pp. 25 e 26]

2.3.1 Ensaio Destrutivo

Para classificar o betão a este nível, geralmente é efectuado o ensaio de resistência à compressão de amostras do betão aplicado em obra, obedecendo a determinadas normas de qualidade. Ou seja, durante a realização de uma obra é recolhido betão antes de se efectuar a betonagem (colocação do betão fresco para enchimento de zona limitada na estrutura), do qual se produzem provetes normalizados para posterior ensaio em laboratório.

Quando se procede a este ensaio há que ter em atenção a forma como o provete rompe. Todas as quatro faces expostas deverão ficar fissuradas aproximadamente da mesma forma, enquanto que as outras duas que estão em contacto com os pratos da

prensa sofrem, geralmente, apenas alguns danos. Na figura seguinte são apresentados alguns exemplos de rupturas que possam suceder durante este ensaio.

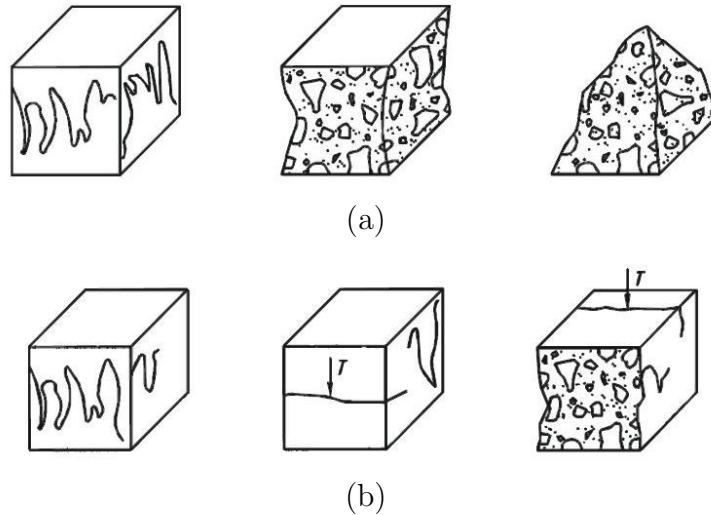


Figura 2.2: Exemplos de rupturas de provetes cúbicos: (a) satisfatórias; (b) não satisfatórias. [Fonte: NP EN 12390-3:2009]

No entanto, estes testes são efectuados a betão “companheiro” daquele que foi colocado em obra, supondo-se representar o betão presente nas estruturas; o que por vezes se tem verificado não ser verdadeiro (por defeitos na aplicação, cura, etc.), sendo a sua resistência em estrutura geralmente menor que a obtida em ensaios de provetes normalizados [Evangelista, 2002, p. 6].

Existem situações em que é desejável ter alguma medida da real resistência do betão na estrutura (*in situ*). É o caso particular de suspeita de baixos níveis de resistência devido à má preparação das referidas amostras, o aparecimento de fendas ou outros sinais de perigo na estrutura que possam justificar a investigação do material aplicado, ou até por alterações do que inicialmente teria sido projectado para determinada obra, tentando aumentar as cargas admissíveis pela mesma, sendo necessário um estudo da resistência do betão e da posição e tamanho da armadura de aço [Mindess/Young/Darwin, 2003, p. 384].

2.3.2 Ensaio Semi-Destrutivo

A forma mais comum de medir a resistência do betão *in situ* é cortando cilindros do material (carotes) da estrutura usando uma broca de diamante. As carotes podem conter um pouco de aço embutido sendo, por isso, devidamente inspeccionadas e rectificadas

segundo a norma em vigor. Embora esta possa parecer uma forma perfeitamente clara de avaliar a qualidade do betão, há uma série de problemas na interpretação dos resultados obtidos, pois as propriedades do betão *in situ* variam de acordo com [Mindess/Young/Darwin, 2003, pp. 384-386 e Evangelista, 2002, p. 6]:

- o elemento estrutural (laje, pilar, viga), devido principalmente às diferenças de compactação, cura e exsudação.

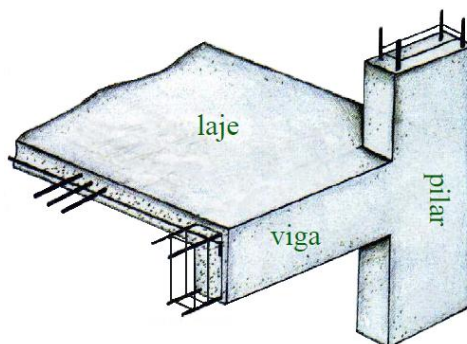


Figura 2.3: Elementos estruturais. [Fonte: UFRJ].

- a sua posição na estrutura, sendo que as carotes retiradas duma parte superior de um elemento estrutural apresentam-se, geralmente, mais fracas do que as duma inferior, simplesmente por causa dos efeitos de segregação e da resolução do agregado graúdo, pois o agregado mais pesado tende a ir ao fundo devido ao efeito da gravidade;
- a humidade, sendo afectadas por gradientes de humidade entre a superfície da amostra e o seu interior. O material seco ao ar apresenta-se cerca de 5 a 9% mais resistente que o interior, no entanto um período de 48 horas a 7 dias é considerado demasiado curto para que se estabilize um teor de humidade uniforme em todo o material;
- a direcção da carotagem, dado que o betão é um material anisotrópico³. Como visto acima, a segregação pode causar uma fraca ligação cimento-agregado em determinada zona do material, criando planos de fraqueza que são sempre horizontais, devido à influência da gravidade. Por este motivo, a aplicação de carga na direcção perpendicular a esses planos leva a resultados geralmente inferiores (cerca de 4 a 10%) aos obtidos quando a carga é aplicada segundo a direcção

³Material cujas propriedades mecânicas dependem da direcção.

paralela aos mesmos. O mesmo se verifica nos provetes normalizados, sendo a aplicação de carga efectuada sempre nas faces perpendiculares à face de enchimento, como se pode ver na Figura 2.4.

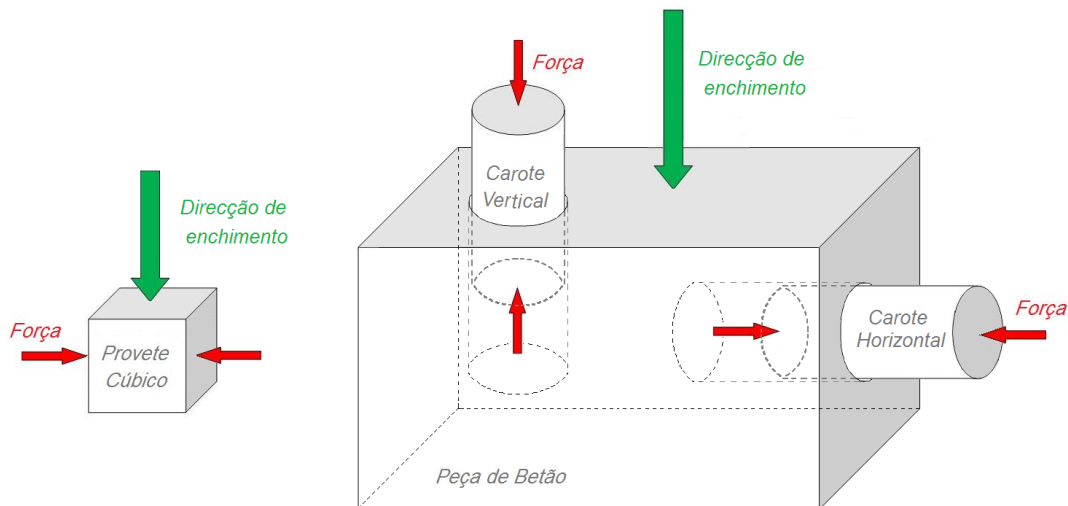


Figura 2.4: Direcções de aplicação de carga em carotes e provetes cúbicos.

No entanto, para se conseguir uma boa análise estatística da resistência do betão *in situ* é necessário o ensaio de muitas carotes, o que para além dos problemas de interpretação de resultados já acima referidos, é um processo caro e demorado. A obtenção das mesmas não é fácil, havendo restrições quanto às zonas de onde possam ser retiradas, pelo facto deste processo poder comprometer a estabilidade da estrutura, apesar de a deixar sempre de certa forma danificada, sendo necessária a sua reparação. Embora os resultados obtidos sejam considerados mais reais que os do ensaio de compressão a provetes normalizados, este é portanto considerado um ensaio semi-destrutivo [Júlio/Fernandes/Veludo, 2004, p. 2].

2.3.3 Ensaio Não Destrutivo

Têm vindo a ser estudados vários métodos que possibilitam a análise da resistência do betão *in situ* sem que a peça estrutural a ser avaliada fique danificada, ou os pequenos danos que possam ocorrer, além de serem facilmente reparáveis, não comprometam o desempenho do material. São, por isso, considerados não destrutivos.

Esses ensaios têm a desvantagem de não medir a resistência à compressão e sim outras propriedades que se supõe correlacionadas a ela [de Castro, 2009, p. 53].

Um desses métodos, que ainda é amplamente utilizado em todo o mundo dado o seu baixo custo, simplicidade na utilização e rapidez nos resultados, é o ensaio esclerométrico. Este ensaio mede a dureza superficial do material e foi desenvolvido

em 1948 pelo engenheiro suíço Ernest Schmidt, ficando o aparelho nele utilizado conhecido mundialmente por “Schmidt Hammer” [Machado, 2005, p. 48]. Tal como noutros métodos não destrutivos, a avaliação da resistência do betão é feita através de uma correlação de valores obtidos entre este e o ensaio de resistência à compressão de provetes normalizados. Com o aparelho de medida é geralmente fornecida uma curva correlação como a da seguinte figura.

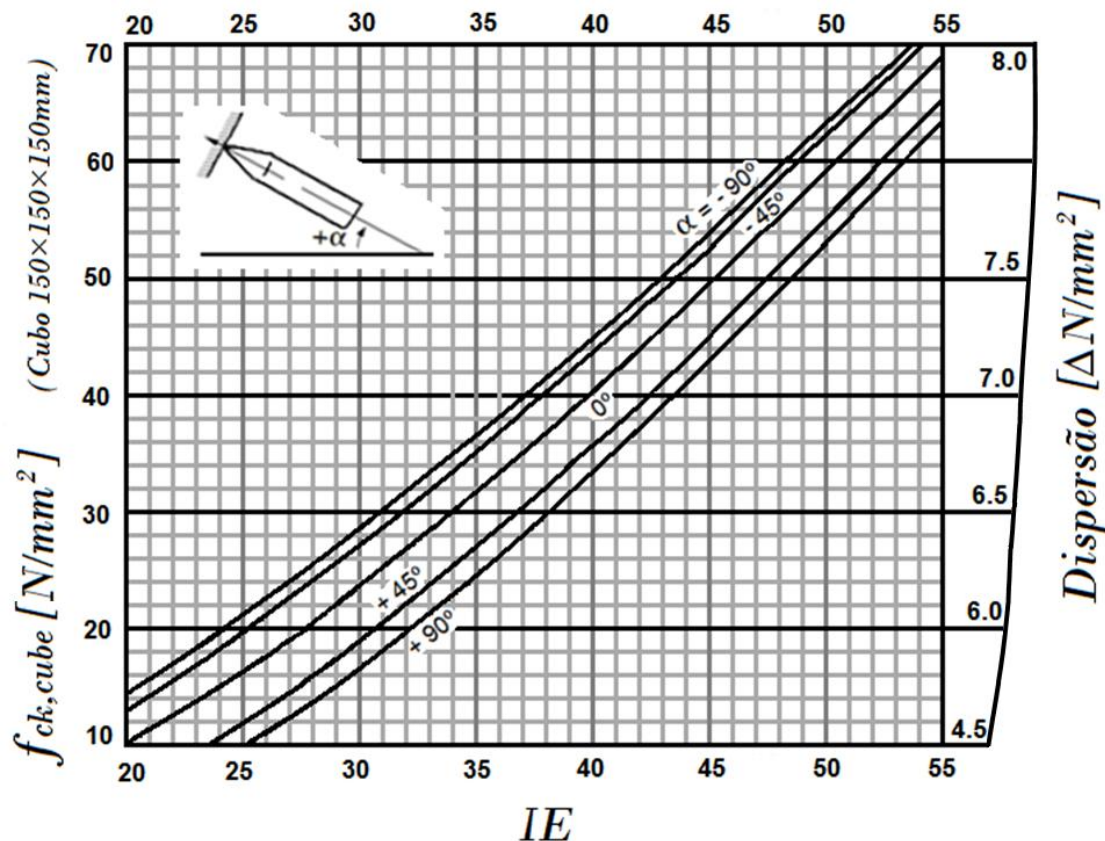


Figura 2.5: Relação entre a resistência à compressão de cubos em N/mm^2 (MPa) e a dureza ao choque, fornecida pelo fabricante para o uso de esclerómetros Schmidt (tipo N). [Fonte: adaptado de catálogo do aparelho.]

No entanto, esta correlação encontra-se afectada por diversos factores, nomeadamente os já referidos como relacionados com a própria resistência do betão. Há, no entanto, que salientar também que durante a realização de um ensaio esclerométrico os resultados obtidos podem ser afectados, por exemplo, pela rugosidade da superfície, pela humidade do betão, pela concentração de agregado grosso na superfície, pela posição da armadura e pela posição do esclerómetro [de Castro, 2009, p. 49].

Vários investigadores, na tentativa de encontrarem a melhor correlação para determinado tipo de betão, apresentam propostas de curvas determinadas com base nos resultados obtidos nos seus ensaios. Essas curvas são obtidas através da determinação

2.3. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO BETÃO

de uma linha de tendência num gráfico que relaciona o ensaio esclerométrico com o de resistência à compressão. No entanto, o tipo adoptado depende do critério do investigador, não havendo nenhuma norma que o defina. Geralmente, os tipos de linha mais aplicados nestes estudos são: exponencial, potência, polinomial de 2º grau e linear. Por exemplo, Evangelista (2002) e Machado (2005) adoptaram nas suas pesquisas a potência como linha de ajuste dos seus resultados, ao passo que Júlio/Fernandes/Veludo (2004) utilizaram uma linha polinomial de 2º grau e Brozovsky (2009) apresenta correlações lineares.

É comum realizar-se os ensaios anteriormente referidos aos 28 dias de idade por se considerar que nesta altura o betão já atingiu as características pretendidas, sendo também considerado o final do processo de hidratação ou endurecimento [Cizer et al., 2008a]. No entanto, por vezes, torna-se necessária a avaliação a idades superiores ou mesmo inferiores. No caso particular do betão com adições do tipo II a sua resistência à compressão vai muito para além dos 28 dias. Para a realização do presente estudo foram efectuados vários ensaios em diversas idades. A descrição do procedimento dos métodos anteriormente mencionados é feita nas subsecções 3.1.4 (extracção de carotes) e 3.2.2 (ensaio à compressão de provetes cúbicos e de carotes) e 3.2.1 (esclerometria) do Capítulo 3.

Na Figura 2.6 é apresentado um gráfico que compara a evolução da resistência à compressão ao longo do tempo obtida em pastas constituídas pelos principais componentes do cimento no seu estado puro. Através deste gráfico é possível ter uma noção da contribuição de cada componente para a resistência à compressão numa pasta, resultante do endurecimento do cimento (secção 2.4).

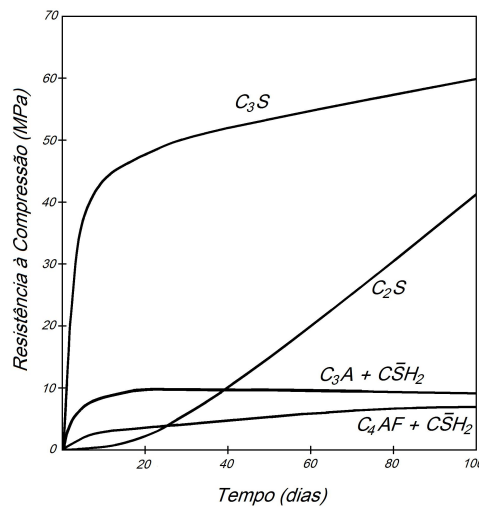


Figura 2.6: Desenvolvimento da resistência à compressão resultante da hidratação de cada composto puro que constitui o cimento Portland. [Fonte: adaptado de Mindess/Young/Darwin, 2003, p. 25].

É visível o grande desenvolvimento de resistência associada às pastas de silicatos de cálcio puros (C_2S e C_3S), sendo estes os compostos presentes em maior percentagem no cimento (ver Tabela 2.1). No entanto, a resistência da pasta de alite (C_3S) aumenta bruscamente logo nos primeiros instantes, continuando a aumentar ao longo de toda a idade, embora mais lentamente. O aumento de resistência da pasta de belite (C_2S) é mais notório a partir de cerca de 20 *dias* após a mistura do componente com a água. Também é visível um incremento da resistência logo nos instantes iniciais para pasta de celite e gesso.

De seguida, será apresentada a forma como estes componentes do cimento Portland reagem entre si e com a água, provocando o endurecimento do betão e o consequente ganho de resistência.

2.4 Endurecimento do Cimento Portland

Como já foi referido (subsecção 2.2.1), quando se mistura cimento portland com água ocorrem determinadas reacções químicas entre os compostos constituintes, possibilitando a obtenção de um sólido com determinada resistência. As reacções químicas com a água são denominadas reacções de hidratação e os compostos obtidos são os chamados produtos de hidratação. Estes são, então, compostos hidratados estáveis que cristalizam com hábito acicular, emaranhando-se e colando-se uns aos outros, conferindo ao conjunto uma resistência notável [Coutinho, 1988a, p. 149].

Estas reacções químicas que ocorrem na hidratação do cimento são também eventualmente responsáveis pelo endurecimento do betão, daí a importância do seu estudo [Mindess/Young/Darwin, 2003, p. 23]. A resistência e a durabilidade de um betão dependem do grau em que ocorrem estas reacções. O processo de hidratação de um betão fresco acabado de colocar realiza-se de uma forma relativamente rápida nos primeiros dias, como se verá de seguida. É importante que nesse tempo o betão retenha a água, pelo que se deve evitar a sua evaporação [Smith, 1998, p. 795].

2.4.1 Reacções dos Principais Componentes com a Água

As reacções de hidratação do cimento portland são muito complexas e não totalmente esclarecidas. Isto deve-se não só a variações da composição, morfologia das partículas e do processo de produção do cimento, mas também a outros factores como a área superficial do cimento, as condições ambientais e a presença de aditivos [Castro/Pandolfelli, 2009].

De seguida é feita, de uma forma simplificada, a apresentação e explicação das

reações consideradas mais importantes. Há que referir que este é um conjunto de reações irreversíveis e que as composições apresentadas dos produtos de hidratação não são rígidas, variando continuamente [Coutinho, 1988a, p. 150].

O *silicato tricálcio* ou *alite* e o *silicato bicálcico* ou *belite* constituem cerca de 75% do cimento portland, como se pode ver na Tabela 2.1. Quando estes compostos reagem com a água durante o endurecimento do cimento, o principal produto de hidratação é o *silicato tricálcico hidratado* ($3CaO.2SiO_2.3H_2O$ ou $C_3S_2H_3$, na notação considerada), também conhecido apenas por *silicato de cálcio hidratado* ($C-S-H$). Este produto de hidratação aparece na forma de partículas extremamente pequenas ($1\mu m$) constituindo um gel coloidal. Forma-se também *hidróxido de cálcio* ou *portlandite* ($Ca(OH)_2$ ou, simplesmente, CH). As reações são as seguintes [Smith, 1998, p. 794 e Coutinho, 1988a, p. 150]:



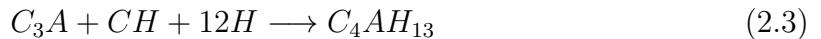
(*alite* + *água* $\longrightarrow$ *silicato de cálcio hidratado* + *portlandite*)



(*belite* + *água* $\longrightarrow$ *silicato de cálcio hidratado* + *portlandite*)

A alite endurece rapidamente e é responsável pelo primeiro aumento da resistência mecânica do cimento portland. A maior parte da hidratação do C_3S realiza-se em cerca de 2 dias, motivo pelo qual os cimentos portland de endurecimento rápido contêm sempre elevadas quantidades deste componente. A reacção de hidratação da belite é mais lenta, sendo considerada a principal responsável pelo aumento da resistência mecânica ao fim de uma semana [Smith, 1998, p. 795]. Os silicatos hidratados têm composições parecidas com minerais conhecidos como a *tobermorite* [Coutinho, 1988a, p. 151] e a *ettringite* [(Mindess/Young/Darwin, 2003, p. 60)], sendo adoptado o nome dos mesmos para os designar. Por exemplo, *C-S-H-gel* é muitas vezes indicada como *tobermorite-gel* [GiraldoM./Tobón, 2006].

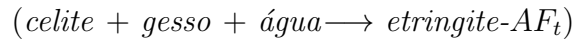
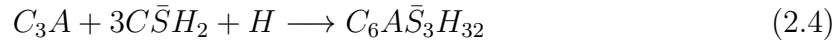
O *aluminato tricálcio* ou *celite* (C_3A) na presença de uma solução saturada de hidróxido de cálcio, fixa este composto e transforma-se num *aluminato tetracálcico hidratado* ($4CaO.Al_2O_3.13H_2O$ ou C_4AH_{13} , na notação considerada). Esta reacção de hidratação ocorre rapidamente, com uma grande velocidade de libertação de calor, segundo a equação [Coutinho, 1988a, p. 151]:



(*celite* + *portlandite* + *água* $\longrightarrow$ *aluminato tetracálcico hidratado*)

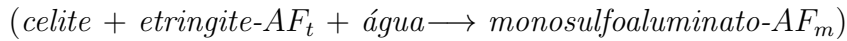
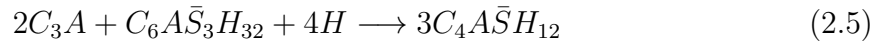
A celite contribui ligeiramente para o primeiro aumento da resistência mecânica do cimento, sendo sempre mantida em baixa percentagem nos cimentos resistentes aos sulfatos (Tipo V) [Smith, 1998, p. 795].

Como a reacção dos aluminatos com a água se processa rapidamente conduzindo a uma “presa instantânea” [Coutinho, 1988a, p. 151], é adicionado um sulfato à composição do cimento, de forma a abrandar esta reacção (ver Tabela 2.1), sendo o mais económico o gesso natural ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ou $C\bar{S}H_2$). Este vai combinar-se rapidamente com os aluminatos evitando a reacção directa destes com a água e formando-se *sulfoaluminato de cálcio hidratado* ou *etringite* ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ou $C_6A\bar{S}_3H_{32}$), como se pode ver na equação [Mindess/Young/Darwin, 2003, p. 60 e Coutinho, 1988a, p. 150]:

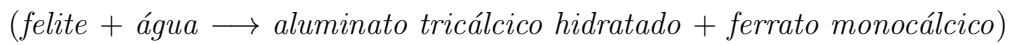
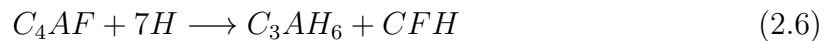


É de frisar que a retenção de água é devida essencialmente a reacções individuais das fases aluminato, felite e sulfato de cálcio. Porém, o sulfato de cálcio reage mais rapidamente com a água que qualquer outro dos quatro componentes do clínquer (ver tabela 2.1) [Brouwers, 2005].

A etringite vai, por sua vez, dar origem a outro sulfoaluminato de cálcio hidratado ($3C_4A\bar{S}H_{12}$), geralmente designado por *monosulfoaluminato* simplesmente, através da equação [Mindess/Young/Darwin, 2003, p. 60]:

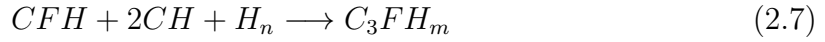


Para finalizar, a introdução de *aluminoferrato tetracálcico* ou *felite* (C_4AF) tem como finalidade a redução da temperatura de formação do clínquer durante o processo de obtenção do cimento [Smith, 1998, p. 795]. Ao reagir com a água, este componente liberta *aluminato tricálcico* ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$ ou C_3AH_6) e *ferrato monocálcico* ($CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot H_2O$ ou CFH) segundo a equação [Coutinho, 1988a, pp. 150 e 151]:



O ferrato monocálcico também vai reagir com a água e alguma portlandite libertada nas reacções anteriores, transformando-se em *ferrato tricálcico* ($3CaO \cdot Fe_2O_3$ ou

C_3F) que forma soluções sólidas com o aluminato tricálcico, também libertado na reacção anterior [Coutinho, 1988a, pp. 150 e 151].



(*ferrato monocálcico + portlandite + água $\longrightarrow$ ferrato tricálcico hidratado*)

Cada um dos componentes e produtos de hidratação do cimento apresenta uma determinada microestrutura identificável, embora com alguma dificuldade dado que numa pasta de cimento hidratada existe uma grande heterogeneidade. A microestrutura é muito dependente de alguns factores como: a composição do clínquer, finura da moagem e processo de transporte [Polito, 2008, p. 87]. Seguidamente é apresentada uma esquematização das várias etapas que constituem o processo de hidratação, mas ainda no presente capítulo, na secção 2.5, será feita uma abordagem mais aprofundada sobre a microestrutura.

2.4.2 Etapas do Mecanismo de Hidratação

Para facilitar a compreensão do mecanismo de hidratação, não esquecendo as reacções químicas que o suportam e que foram anteriormente apresentadas, segue-se um esquema de todo o processo (Figura 2.7), evidenciando a ocorrência das referidas reacções pela visível variação de calor, o desenvolvimento a nível da microestrutura e a percentagem em massa de produtos de hidratação que se vão formando ao longo de todo o processo. Como já referido, é de salientar que, este processo e respectivas reacções ainda não estão totalmente esclarecidos, havendo muitos modelos apresentados que procuram explicar este mecanismo.

Quando a água é adicionada ao cimento ocorrem várias reacções exotérmicas, ou seja, existindo libertação de calor [Mindess/Young/Darwin, 2003, p. 24]. É possível ter uma noção da velocidade a que os minerais vão reagindo, através da monitorização da taxa de calor produzido ao longo do tempo, usando uma técnica chamada de *calorimetria de condução* [Winter, 2010]. Na Figura 2.7 é visível essa variação de calor ao longo do tempo, com indicação das reacções a que se supõe corresponderem os picos de energia calorífica. Esta figura e toda a sua explicação não é mais do que uma adaptação de vários modelos, tentando explicar da melhor forma possível todo o processo de hidratação do cimento.

Considere-se, portanto, que a hidratação do cimento ocorre segundo cinco etapas ou estágios: mistura, dormência, presa, endurecimento e densificação.

Num primeiro estágio, correspondente à *mistura* inicial (cimento + água), as partículas encontram-se dispersas na água de amassadura quer individualizadas quer em flocos, sendo o espaçamento entre elas dependente da relação a/c [Coutinho, 2003].

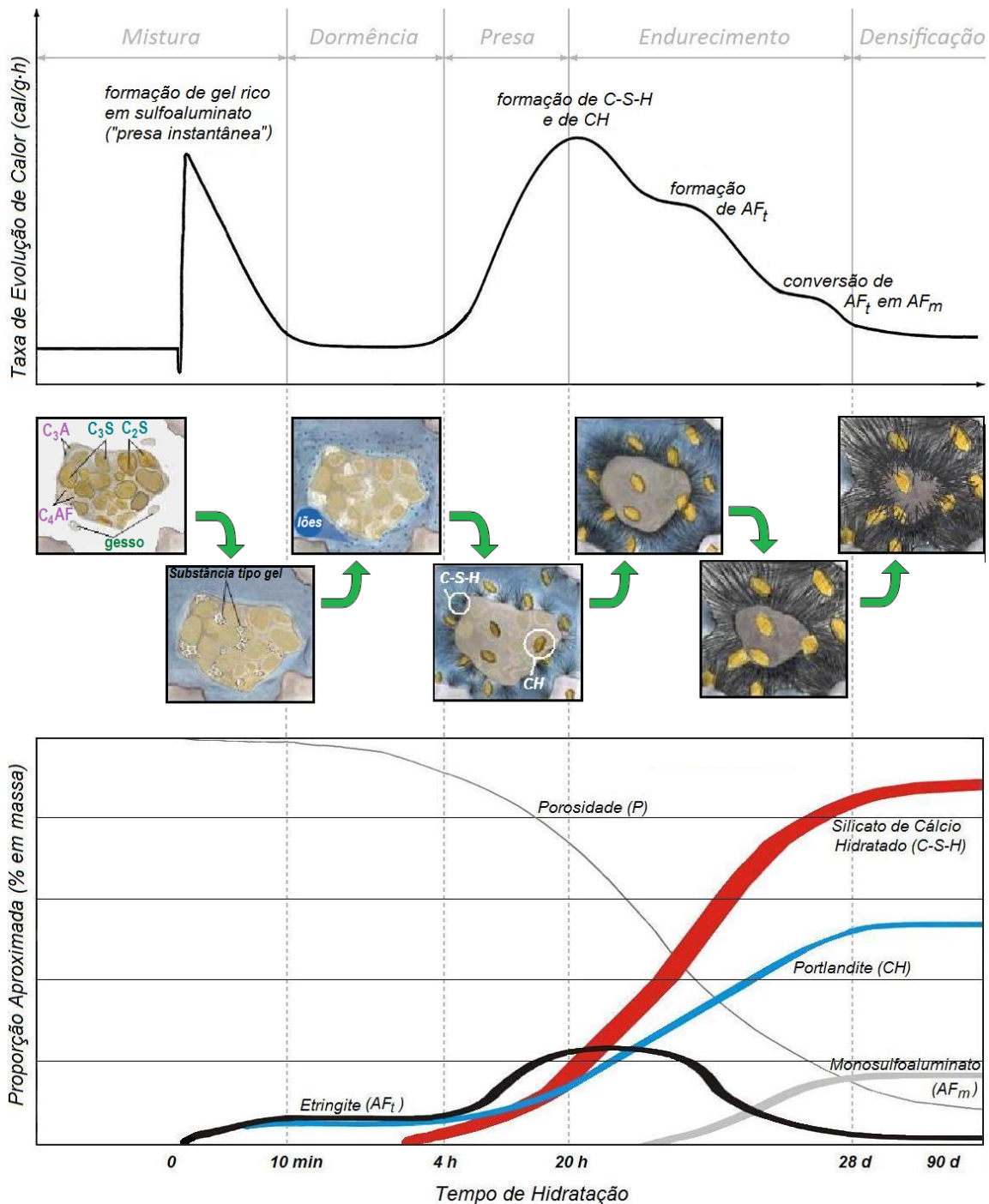


Figura 2.7: Etapas do mecanismo de hidratação do cimento portland. [Fonte: adaptado de Hewlett, 1998, p. 270, de Mindess/Young/Darwin, 2003, p. 65, de Polito, 2008, p. 95, de ISU, 2007, de ISU, 2008 e de Winter, 2010].

Como já referido, os aluminatos são muito reactivos na presença de água. A celite (fase C_3A , que consiste no mais reactivo dos principais minerais do clínquer) reage instantâneamente com a água logo após a mistura, formando um gel rico em aluminato (consistindo na dita “presa instantânea”). Esta reacção é fortemente exotérmica (sendo identificável na Figura 2.7 pelo primeiro pico) e rápida, durando geralmente menos de $15min$ [ISU, 2007]. Este gel vai reagir com iões sulfato em solução, provenientes do gesso que foi adicionado para travar essa reacção, formando os primeiros núcleos de etringite [Winter, 2010], segundo a equação 2.4 referida anteriormente. Pensa-se que a felite também comece a reagir rapidamente com a adição de água, tornando-se depois muito lenta provavelmente devido à formação de uma camada de gel de hidróxido de ferro que reveste a felite agindo como uma barreira, dificultando a propagação da reacção [Winter, 2010]. No gráfico da Figura 2.6 é evidente o aumento de resistência que ocorre nos primeiros instantes nas pastas destes dois aluminatos, verificando-se posteriormente uma evolução muito lenta.

Segue-se um período de cerca de 2 a $4h$ denominado *dormência*, no qual a alite e a belite (fases C_3S e C_2S) se vão começando a dissolver lentamente na água, não sendo registada grande evolução a nível de calor de reacção. Neste período, a pasta de cimento encontra-se plástica (pastosa e trabalhável) sendo este considerado o período ideal para que um betão seja transportado e aplicado.

Passadas essas horas, a pasta começa a perder rapidamente alguma da sua plasticidade, como resultado das reacções de hidratação da alite e da belite que vão ocorrendo com a formação de gel $C-S-H$ e portlandite (segundo as equações 2.1 e 2.2, respectivamente). Atingiu-se, portanto, o chamado *início de presa*. Os cristais que se formam vão crescendo começando a entrelaçar-se uns nos outros dando alguma resistência à pasta de cimento e, conseqüentemente, ao betão. O início de presa dá ao trabalhador uma perspectiva do intervalo de tempo disponível durante o qual betão ainda é trabalhável [Coutinho, 1988a, p. 152]. Considera-se como *fim de presa* o instante em que existe uma perda total da capacidade deformável do material, tornando-se numa massa rígida. A presa termina, geralmente, ao fim de 10 a $20h$ após a mistura inicial [Winter, 2010]. A partir deste momento, um provete de pasta de cimento ou de betão pode ser desmoldado e colocado em cura (processos que serão explicados no capítulo seguinte, subsecção 3.1.3). Pela Figura 2.7 é perceptível um aumento contínuo da temperatura do material durante esta fase, como resultado das referidas reacções.

Perdida a capacidade deformável, dá-se então início ao *endurecimento* propriamente dito, onde ocorre o amadurecimento da pasta. Este fenómeno consiste no prolongamento da presa, ou seja, a pasta depois de se tornar rígida vai endurecer cada vez mais ao longo do tempo. As reacções processam-se cada vez mais lentamente e

com o arrefecimento do material (como se pode ver na Figura 2.7). Os silicatos de cálcio hidratados (*C-S-H*) com maior densidade envolvem os cristais de portlandite. Os cristais vão crescendo e entrelaçando-se tornando o material mais denso e forte com a idade. A celite continua a reagir, também agora com a portlandite até então formada (segundo a reacção definida pela equação 2.3), assim como o ferrato monocálcico (equação 2.7) que se formou através da reacção da felite com a água (equação 2.6). É comum serem identificáveis picos de energia calorífica que são geralmente associados à formação de etringite e à sua posterior conversão em monosulfoaluminato (reacções segundo as equações 2.4 e 2.5, respectivamente). Esta é, portanto, a etapa que corresponde ao desenvolvimento de todas as características que o material deve possuir para desempenhar o seu papel na construção [Coutinho, 2003 e Coutinho, 1988a, p. 152].

Tem sido constante a procura pela compreensão do processo de hidratação do cimento, tendo sido criados modelos a duas e a três dimensões que o tentam representar.

Bentz (1997) apresentou o seguinte diagrama de transição de estado (Figura 2.8) para um modelo tridimensional, por ele desenvolvido, que simula a hidratação e o desenvolvimento a nível microestrutural do cimento portland. Segundo esse modelo, as espécies de difusão executam trajetórias aleatórias no espaço disponível, até que reagem de acordo com as regras previstas na seguinte figura.

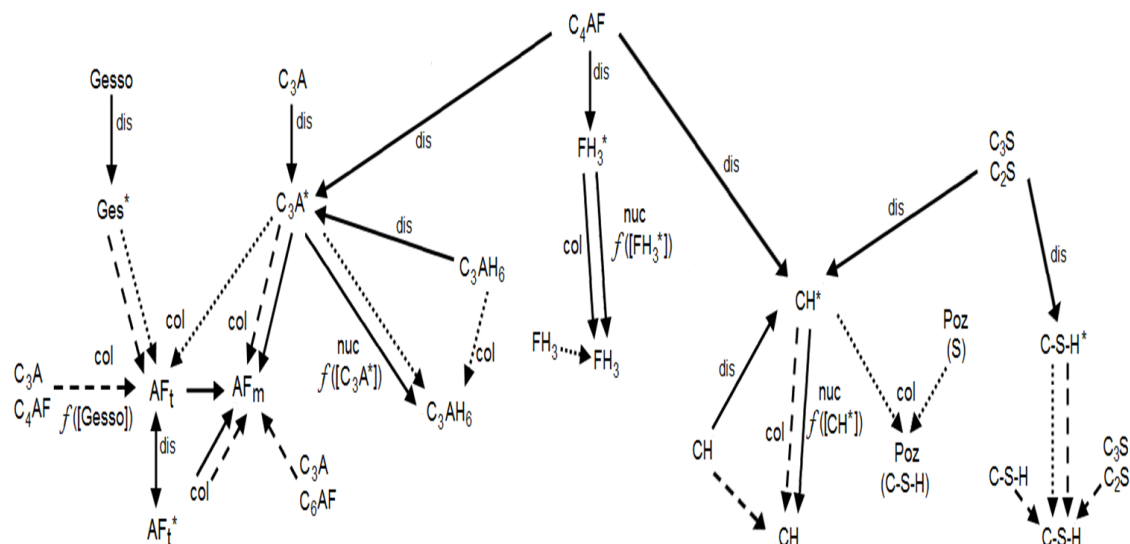


Figura 2.8: Diagrama-modelo da transição de estado no processo de hidratação do cimento portland. Notações: seta ($\rightarrow$) - colisão de duas espécies para formar um produto de hidratação; $f(X)$ - a probabilidade de nucleação ou dissolução é uma função do tipo de concentração ou o volume da fracção da fase X; asterisco (*) - indica difusão das espécies; col - colisão; nuc - nucleação; dis - dissolução; ges - gesso; poz - material pozolânico (cinzas, sílica ativa, etc.). [Fonte: adaptado de Bentz, 1997, p. 11]

Embora possa não ser perceptível à vista desarmada, é sabido que o endurecimento pode prolongar-se por muitos anos; enquanto houver água e cimento por reagir. Considera-se, no entanto, que um betão com cerca de 28 a 30 dias de idade já deverá possuir as características de resistência pretendidas. Alguns autores acrescentam então uma última etapa denominada *densificação* [ISU, 2007] que, como o nome indica, representa esse processo em que o material se vai tornando cada vez mais denso e resistente, separando um período em que esse processo se desenvolve rapidamente de certa forma (alguns dias) de outro no qual vai evoluindo cada vez mais lentamente (durante meses e anos). Na Figura 2.7 é perceptível pelo andamento da curva da taxa de evolução de calor, assim como pelas curvas de proporção de fases hidratadas formadas, a pouca evolução a nível reaccional que ocorre a partir destas idades.

2.4.3 Identificação de Produtos de Hidratação Presentes numa Pasta de Cimento

Tal como visto anteriormente, uma pasta de cimento é constituída essencialmente por: alite (C_3S), belite (C_2S), celite (C_3A), fase ferrítica (C_4AF) e gesso ($C\bar{S}H_2$). Os produtos mais importantes resultantes da sua hidratação são o silicato de cálcio hidratado ($3CaO.2SiO_2.3H_2O = C-S-H$) e a portlandite ($Ca(OH)_2 = CH$), sendo também dada relativa importância à formação de etringite ($C_6A\bar{S}_3H_{32} = AF_t$) e monossulfoaluminato de cálcio hidratado ($C_4A\bar{S}H_{12} = AF_m$) [Alarcon-Ruiz et al. (2005), Castro/Pandolfelli (2009) e Diamond (2004)].

Para fazer um estudo a nível das fases que se formam são geralmente utilizadas técnicas de caracterização de materiais como: análises de difracção de raios-X, análises térmicas e microscopia electrónica de varrimento. Uma das principais vantagens de qualquer uma destas técnicas é o facto de só ser necessária uma pequena quantidade de material como amostra para análise. No entanto, são análises complexas de executar, exigindo uma formação aprofundada e alguma experiência na área [Middendorf et al., 2005]. A microscopia e a análise de difracção de raios-X são dois métodos directos de avaliação do processo de hidratação. Já as análises térmicas, assim como a determinação da resistência à compressão, são métodos indirectos [Gonçalves/Filho/Fairbairn, 2006].

Visto este trabalho ter sido desenvolvido utilizando estas técnicas, faz-se de seguida um levantamento de alguns dos resultados obtidos por outros investigadores, como apoio teórico ao que será previsto obter na realização de estudos a este nível do betão. O princípio de funcionamento de cada uma destas técnicas encontra-se descrito em anexo. No capítulo seguinte são apenas referidos os parâmetros utilizados no

procedimento do estudo descrito neste documento.

A técnica de difracção de raios-X (DRX) é um método preciso e eficiente largamente empregue em pesquisa científica e tecnológica, particularmente, para ensaios não destrutivos em aplicações industriais, para a determinação precisa de estruturas cristalinas e amorfas. Permite identificar minerais presentes numa amostra através da obtenção de um difractograma onde é feita a identificação dos seus picos característicos. Este método será melhor explicado no Capítulo 3 (ver subsecção 3.3.2) e no Anexo C.

Sendo o cimento Portland constituído por vários componentes com composição química similar, uma pasta torna-se um sistema multicomponente e complexo, cujo difractograma apresenta sobreposição de picos difractados, dificultando a identificação de fases presentes em reduzidas quantidades [Middendorf et al., 2005].

Na Tabela 2.5 encontram-se os principais compostos observados por diversos autores neste tipo de análise, sendo também referidos os números das respectivas fichas cristalográficas JCPDS (ver subsecção 3.3.2) utilizadas na identificação.

Tabela 2.5: Compostos geralmente identificados em análises de DRX a pastas de cimento.

Composto	Fórmula Química	Fase	Ficha JCPDS
Hidróxido de Cálcio	$Ca(OH)_2$	Portlandite	04 - 0733 44 - 1481
Carbonato de Cálcio	$CaCO_3$	Aragonite Calcite Vaterite	41 - 1475 05 - 0586 33 - 0268
Óxido de Silício	SiO_2	Quartzo	46 - 1045
Silicato de Cálcio Anidro	$3CaO.SiO_2$ $2CaO.SiO_2$	Alite Belite	49 - 0442 31 - 0301 70 - 0388
Silicato de Cálcio Hidratado	$3CaO.2SiO_2.3H_2O$	<i>C-S-H</i>	33 - 0306
Sulfoaluminato de Cálcio Hidratado	$3CaO.Al_2O_3.3SO_4.32H_2O$	Etringite	41 - 1451

[Fonte: adaptado de GiraldoM./Tobón (2006), de Lopez/Cerri/de Araújo (2006), de Middendorf et al. (2005), de Skripkiūnas et al. (2007), de de Sousa Almeida/Sichieri (2006), de Stepkowska et al. (2007), de Tavares (2010), de Trezza/Scian (2003) e de Ukrainczyk et al. (2006)]

Alguns investigadores consideram que o DRX não é uma boa ferramenta para a identificação da presença de etringite, devido às baixas concentrações e interferências de grandes picos de outros componentes do betão [GiraldoM./Tobón, 2006].

A caracterização térmica de uma pasta cimento é geralmente feita por recurso à análise térmica diferencial e à termogravimetria. Estas análises são largamente utilizadas neste campo por vários investigadores, sendo consideradas ferramentas importantes para avaliar a natureza dos produtos hidratados de acordo com os diferentes estágios de hidratação do cimento, além de quantificar as diferentes fases [Alarcon-Ruiz et al. (2005), Dweck/Pinto/Büchler (2008), Gonçalves/Filho/Fairbairn (2006), Skripkiūnas et al. (2007), de Sousa Almeida/Sichieri (2006) e Trezza/Scian (2003)]. Com base em estudos e análises térmicas a pastas de cimento, diferentes autores têm descrito as reacções que nelas ocorrem com o aumento de temperatura. Na Tabela 2.6, essas reacções são identificadas com os respectivos intervalos de temperatura previstos para a sua ocorrência.

Tabela 2.6: Reacções que ocorrem com o aumento da temperatura numa pasta de cimento.

Intervalo de Temperatura ($^{\circ}C$)	Descrição da Reacção	Tipo de Reacção
25 – 120	Evaporação de água livre e alguma água de ligação. (Geralmente é considerado que a água livre é completamente eliminada a $120^{\circ}C$).	Desidratação de vários hidratos
110 – 200	Decomposição de gesso, etringite e perda de água por parte da tobermorite-gel e dos carboaluminatos hidratados.	
115 – 400	Perda de água de ligação a partir da decomposição do <i>C-S-H</i> e dos carboaluminatos hidratados.	
400 – 600	Decomposição do hidróxido de cálcio com libertação de água	Desidroxilação da portlandite.
450 – 900	Decomposição do carbonato de cálcio com libertação de dióxido de carbono.	Descarbonatação da calcite.

[Fonte: adaptado de Alarcon-Ruiz et al. (2005)], de Ashraf et al. (2009), de Cizer et al. (2008a), de Dweck/Pinto/Büchler (2008), de Gonçalves/Filho/Fairbairn (2006), de Odelson/Kerr/Vichit-Vadakan (2007), de Skripkiūnas et al. (2007), de de Sousa Almeida/Sichieri (2006), de Stepkowska et al. (2007), de Trezza/Scian (2003) e de Ukrainczyk et al. (2006)]

De seguida é feita uma abordagem acerca da microestrutura de uma pasta de cimento hidratada: morfologia e propriedades dos componentes.

2.5 Microestrutura da Pasta de Cimento Hidratada

As propriedades dos produtos de hidratação influenciam claramente as propriedades duma pasta de cimento hidratada. Cada produto de hidratação que se forma tem propriedades distintas, representando um contributo que se irá reflectir no comportamento geral da pasta [Mindess/Young/Darwin, 2003, pp. 66 e 69].

No entanto, para perceber o comportamento da pasta de cimento no betão endurecido é necessário ter ideia de como os produtos de hidratação se encaixam para formarem a matriz. Para tal, é feito um estudo do desenvolvimento da microestrutura da pasta de cimento ao longo da idade, com diferentes níveis de hidratação. As características do cimento hidratado presente num betão não variam muito relativamente às apresentadas por uma pasta do mesmo cimento hidratada [Diamond, 2004, p. 928].

Geralmente, este estudo é realizado com base em observações de micrografias obtidas por microscopia electrónica de varrimento (SEM, do inglês *Scanning Electron Microscopy*). É de salientar o facto de uma microestrutura deste tipo apresentar um certo grau de complexidade, sendo o seu estudo, no entanto, muito requerido por vários investigadores. Esta técnica tem sido amplamente empregue na caracterização de materiais visto permitir a observação directa de limites de grão (que possuem uma grande concentração de defeitos cristalinos) e caracterização de porosidade inter e intragranular. Ou seja, caracterizar microestruturas e identificar os seus mecanismos formadores, tal como a determinação da sua composição química, são passos fundamentais para o conhecimento de determinado material, permitindo prever o seu comportamento nas diversas etapas do processamento industrial [Microlab]. Esta técnica foi utilizada no presente trabalho e é explicada em maior detalhe no Anexo E.

A Figura 2.9 mostra esquematicamente uma sequência simplificada do desenvolvimento da microestrutura de um grão de cimento ao longo da idade, com a respectiva identificação dos produtos de hidratação formados.

No momento inicial (zero minutos), o grão de cimento encontra-se não hidratado. Dez minutos mais tarde, algum do C_3A reage com o sulfato de cálcio (gesso) em solução formando-se, à superfície do grão, gel amorfo rico em aluminatos e agulhas curtas de AF_t a partir do gel e na solução. Com dez horas de hidratação, dá-se a reacção de C_3S produzindo uma capa exterior de gel de $C-S-H$ a partir da rede de agulhas de etringite, deixando um espaço de cerca de $1\mu m$ entre a superfície do grão e a capa hidratada. Após algumas horas, ocorre uma hidratação secundária de C_3A produzindo longas agulhas de AF_t (etringite secundária). Começa, então, a formar-se gel $C-S-H$ no interior da capa devido à continuação da hidratação de C_3A . No período de um a três dias ocorre a reacção entre o C_3A e a AF_t que existe no interior da capa, formando-se

placas hexagonais de monossulfatoaluminato (AF_m). A formação contínua de produtos no interior reduz a separação entre o grão anidro e a capa hidratada. Aos catorze dias já se formou uma quantidade suficiente de C-S-H no interior para encher o espaço entre o grão e a capa, tornando-se mais fibroso o gel C-S-H exterior. Passados anos, o material não hidratado reagiu através de um mecanismo lento, no estado sólido, formando-se gel C-S-H adicional, no interior. A fase ferrítica permanece sem reação (zona branca junto de C_3A , praticamente inalterada desde o início).

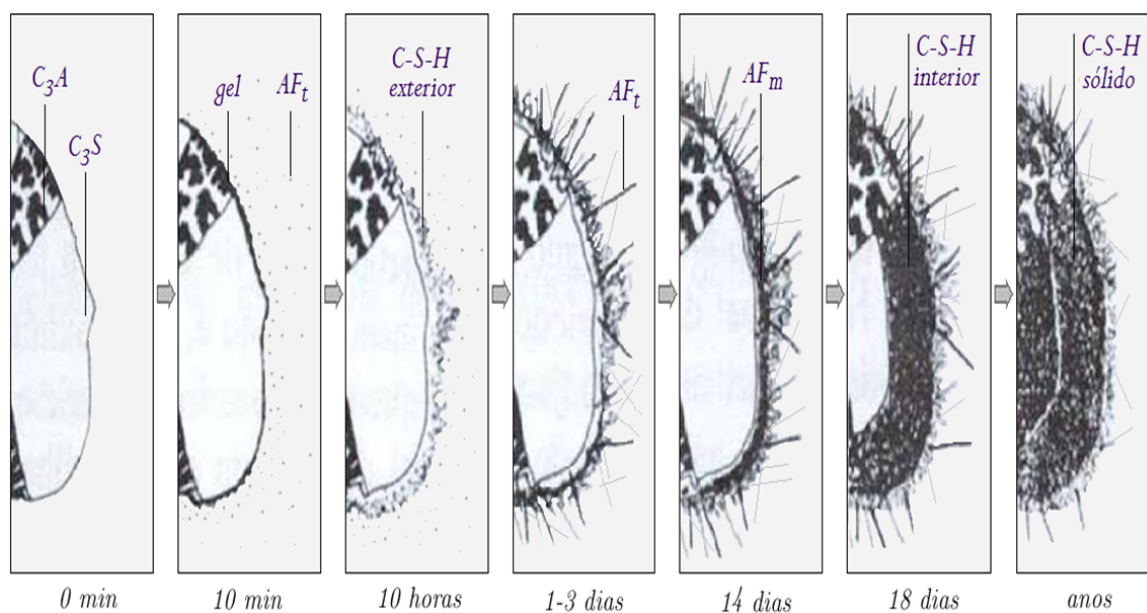


Figura 2.9: Esquema representativo do desenvolvimento microestrutural de um grão de cimento durante o processo de hidratação. [Fonte: adaptado de Coutinho (2003)].

O endurecimento “normal” do cimento portland é considerado como sendo uma consequência da hidratação do C_3A e do C_3S e da formação das fases de silicato de cálcio hidratado ($C-S-H$) e etringite (AF_t), como foi visto anteriormente (subsecções 2.4.1 e 2.4.2). No entanto, existem diferentes opiniões sobre a importância da formação destas duas fases. Muitos investigadores atribuem a responsabilidade deste fenómeno principalmente à formação da fase $C-S-H$, outros acreditam na importância de uma recristalização da etringite microcristalina primária em cristais bem desenvolvidos [Hewlett, 1998, p.272]. Na Tabela 2.7 são apresentadas, resumidamente, as características morfológicas dos principais produtos de hidratação.

De seguida é feita uma breve explicação sobre as características morfológicas dos componentes da pasta de cimento hidratada. São também apresentadas micrografias de SEM obtidas por outros autores.

Tabela 2.7: Características morfológicas dos principais produtos de hidratação.

Composto	Cristalinidade	Morfologia em pastas	Dimensão típica do cristal em pastas
C-S-H	Muito baixa	Espinhas; Morfologia não resolvida	$1 \times 0,1 \mu m$ ($< 0,01 \mu m$ de espessura)
CH	Muito baixa	Material estriado, não poroso	$0,01 - 0,1 mm$
AF_t	Alta	Agulhas prismáticas, longas e finas	$10 \times 0,5 \mu m$
AF_m	Alguma/Alta	Placas hexagonais finas; “rosetas” irregulares	$1 \times 1 \times 0,1 \mu m$

[Fonte: adaptado de Mindess/Young/Darwin, p. 66]

2.5.1 Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H)

A fase *C-S-H* gel, por vezes abreviado simplesmente para “*C-S-H*” [Diamond, 2004, p. 922], é o principal produto de hidratação do cimento portland [Hewlett, 1998, p. 274]. É o componente mais importante, visto se tornar mais de metade do volume da pasta hidratada [Mindess/Young/Darwin, 2003, p. 73].

É considerado um material essencialmente amorfo. A sua estrutura é semelhante à da fase C-S-H formada na hidratação de C_2S ou C_3S puros, apresentando uma cristalinidade muito baixa. Não é considerado uma substância única, constituindo um conveniente termo colectivo para uma série de partículas contendo cálcio, sílica e água [Diamond, 2004, p. 922]. E, não sendo um composto bem definido, a sua fórmula ($C_3S_2H_3$) é apenas uma descrição aproximada visto a estequiometria ser bastante variável (secção 2.4.1). A razão molar CaO/SiO_2 média é geralmente superior a 1,5 mas pode variar dependendo da composição, da relação a/c , da temperatura de hidratação e da idade da pasta de cimento [Hewlett, 1998, p. 274 e Mindess/Young/Darwin, 2003, pp. 65 e 66]. Quando são pobres em cálcio são denominados tipo I, quando são ricos são de tipo II [Coutinho, 1988a, p. 160].

Há que referir que devido ao seu carácter amorfo, à variabilidade de composição e morfologia mal resolvida, o *C-S-H* é um material difícil de estudar. A interpretação de dados experimentais ainda é um assunto de debate activo, tendo sido propostos vários modelos, que enfatizam diferentes aspectos da estrutura, para explicar os resultados experimentais observados. Nenhum modelo pode, no entanto, ser considerado em absoluto como uma verdadeira descrição, sendo modificados quando novos dados são adquiridos [Mindess/Young/Darwin, 2003, p. 67].

Podem ser identificadas duas formas de silicatos de cálcio hidratados (Figura 2.9) numa microestrutura: uma exterior e uma interior [Mindess/Young/Darwin, 2003, p. 73]

e Diamond, 2004, p. 922]. Segue-se a caracterização e distinção de ambas.

C-S-H externo

Durante a hidratação inicial, a fase *C-S-H* cresce para fora da superfície de uma partícula que se encontra em contacto com a água, geralmente sob a forma de um arranjo de lascas finas de baixa densidade. Esta forma de produto *C-S-H externo* ou *premature*, apresenta um elevado grau de microporosidade por secagem, rearranjos de uma variedade de formas morfológicas e porosidade grosseira. Possui, ainda, um elevado nível de impurezas (alumínio, sulfato, alcális) e é, provavelmente, misturado com $C_4A\bar{S}H_{12}$ a nível nanométrico [Mindess/Young/Darwin, 2003, p. 73].

C-S-H interno

Assim que a hidratação é controlada por difusão, as formas de *C-S-H* desenvolvem-se sob a forma de um revestimento mais denso que o inicial em torno dos grãos de cimento hidratado. Este produto é conhecido como *C-S-H interno* ou *tardio*. O revestimento forma uma barreira à difusão durante a hidratação posterior. A sua espessura aumenta ao longo do tempo, crescendo quer para o interior da partícula, quer para o seu exterior.

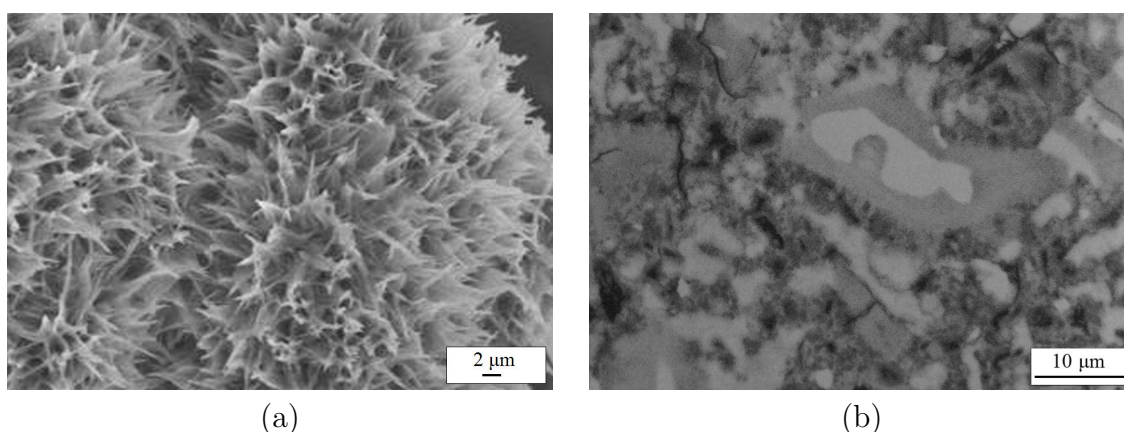


Figura 2.10: Micrografias de silicato de cálcio hidratado obtidas por SEM: (a) cristais de *C-S-H* em forma de lascas ou escamas [Fonte: Alizadeh]; (b) *C-S-H* revestindo resíduos de cimento não hidratado [Fonte: Mindess/Young/Darwin, p. 72].

A morfologia deste produto é visível na Figura 2.10a, apresentando cristais em forma de lascas ou escamas. Esta imagem ilustra o desenvolvimento dos cristais de *C-S-H* numa pasta após duas semanas de hidratação do C_3S ($a/c = 0,8$). Os revestimentos mantêm a forma dos grãos originais. A Figura 2.10b corresponde a uma secção polida de uma pasta com 28 dias de idade e mostra a fase *C-S-H* rodeando os resíduos

não hidratados. Este produto final é mais denso, tem menos impurezas, possui um arranjo mais estável e é mais resistente à mudança física na secagem.

A proporção deste produto final aumenta à medida que aumenta a hidratação ou diminui a relação a/c . Por vezes, é ainda observado via SEM alguns nanocristais de hidróxido de cálcio misturados [Mindess/Young/Darwin, 2003, p. 73].

2.5.2 Portlandite (CH)

Este é o segundo produto de hidratação mais abundante na pasta de cimento. Os cristais de portlandite ocupam cerca de 20-25% do volume de sólidos da pasta. E, ao contrário do $C-S-H$, o hidróxido de cálcio é um material bem cristalizado apresentando uma estequiometria bem definida [Hewlett, 1998, p. 274 e Mindess/Young/Darwin, 2003, p. 69].

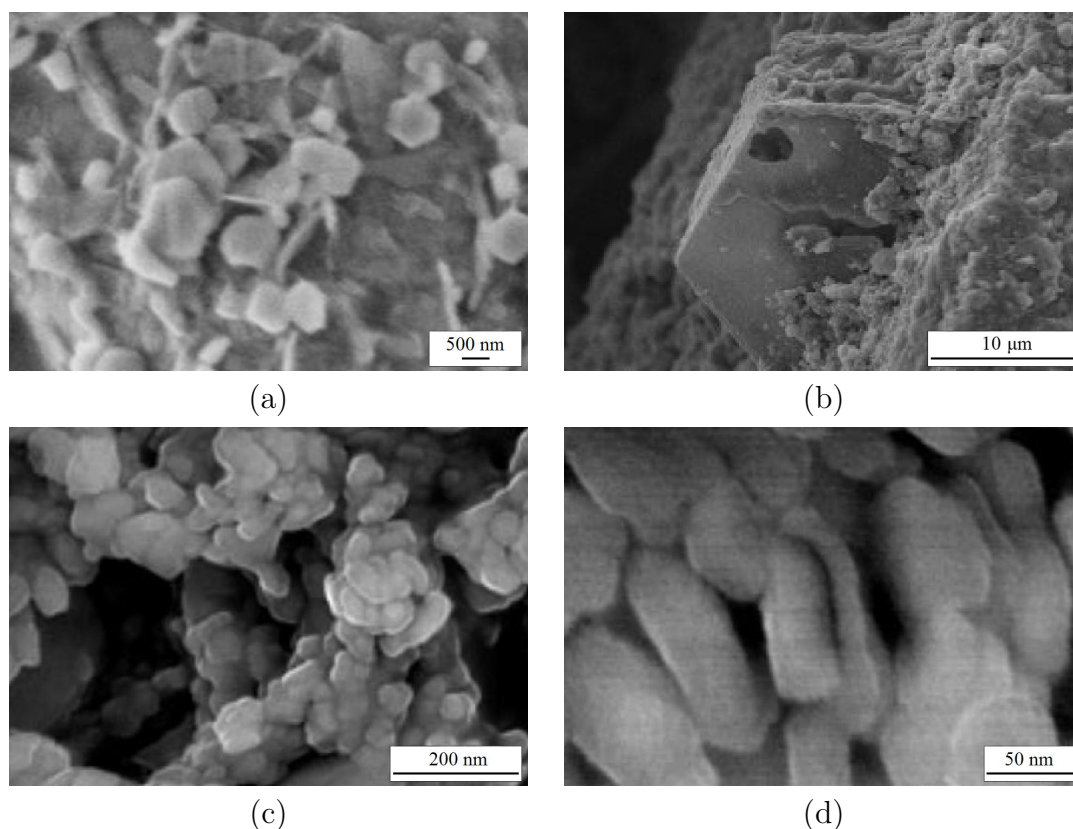


Figura 2.11: Micrografias de portlandite obtidas por SEM: ; (a) nanoplacas hexagonais [Fonte: Alizadeh]; (b) placa hexagonal [Fonte: Ecole Central Paris]; (c) aglomeração de nanopartículas em forma de placas redondas [Fonte: The Getty (2007)]; (d) pormenor das nanopartículas redondas [Fonte: The Getty (2007)].

Durante a Etapa 3, correspondente à hidratação do C_3S (ver subsecção 2.4.2), formam-se muitos destes cristais no interior dos poros capilares. Apresentam formas

e dimensões variadas dependendo da concentração em solução aquosa, da idade dos mesmos e da temperatura de hidratação [Mindess/Young/Darwin, p. 73 e Alizadeh]. Na Figura 2.11 são visíveis diferentes estruturas à micro e à nanoescala. Geralmente, os cristais assumem a forma de placas que podem ser: hexagonais (Figuras 2.11a e 2.11b), redondas (Figuras 2.11c e 2.11d), ou tabulares (Figura 2.12b).

2.5.3 Sulfoaluminato de Cálcio Hidratado (AF_t e AF_m)

Este é o produto que se encontra relativamente em menor quantidade numa pasta madura, correspondendo apenas a 10-15% do volume sólido [Mindess/Young/Darwin, 2003, p. 75], não deixando de ter grande importância a nível das suas propriedades.

São geralmente consideradas duas fases: a *etringite* e o *monosulfoaluminato*. Ambas se encontram bem dispersas por toda a pasta, existindo ao nível nanométrico uma mistura destes cristais com *C-S-H* [Mindess/Young/Darwin, 2003, p. 75].

Etringite (AF_t)

A etringite também cristaliza como cristais hexagonais, embora sob a forma de agulhas bem alongadas (razão entre comprimento/diâmetro muito maior), como pode ser visto na Tabela 2.7. A morfologia exacta vai depender do espaço disponível e fornecimento de iões para o crescimento do cristal. Na Figura 2.12 são apresentadas duas micrografias destes cristais com diferentes ampliações. Esta fase é frequentemente observada em micrografias de pastas muito jovens, aparecendo sob a forma das referidas agulhas crescendo no interior de poros capilares entre grãos de cimento ou fendas [Mindess/Young/Darwin, 2003, p. 69], como é visível na Figura 2.12b.

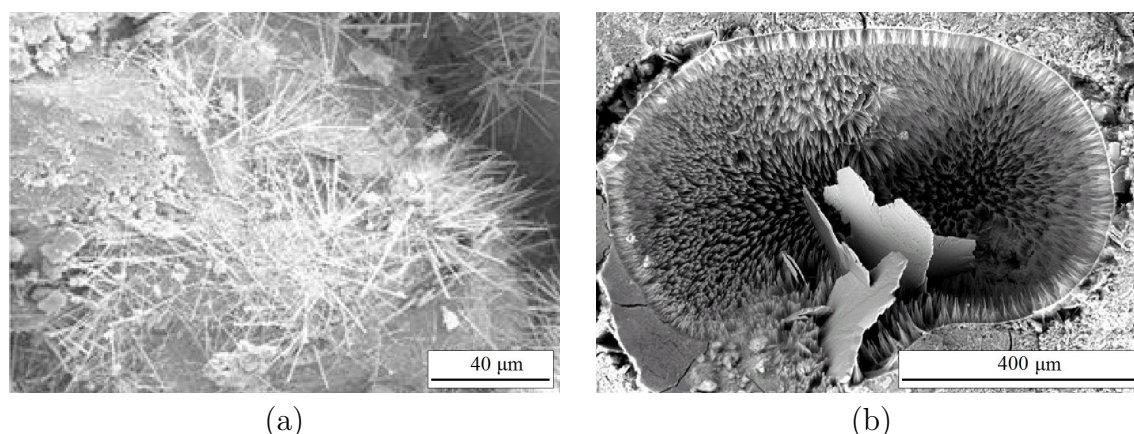


Figura 2.12: Micrografias de etringite obtidas por SEM: (a) cristais de etringite [Fonte: Armange et al. (2005)]; (b) agulhas de etringite e hidróxido de cálcio tabular crescendo no interior de um poro [Fonte: UNB].

Monosulfoaluminato (AF_m)

Os cristais de etringite dão origem à fase monosulfoaluminato (equação 2.5, subsecção 2.4.1). O monosulfoaluminato ou a sua solução sólida tende a formar placas finas hexagonais ou em forma de “rosetas” irregulares [Mindess/Young/Darwin, 2003, p. 69], como se pode ver na Figura 2.13.

Em sistemas puros, estas placas são bem cristalizadas, mas em pastas de cimento portland a incorporação de impurezas reduz o grau de cristalinidade, em certa medida [Mindess/Young/Darwin, 2003, p. 69].

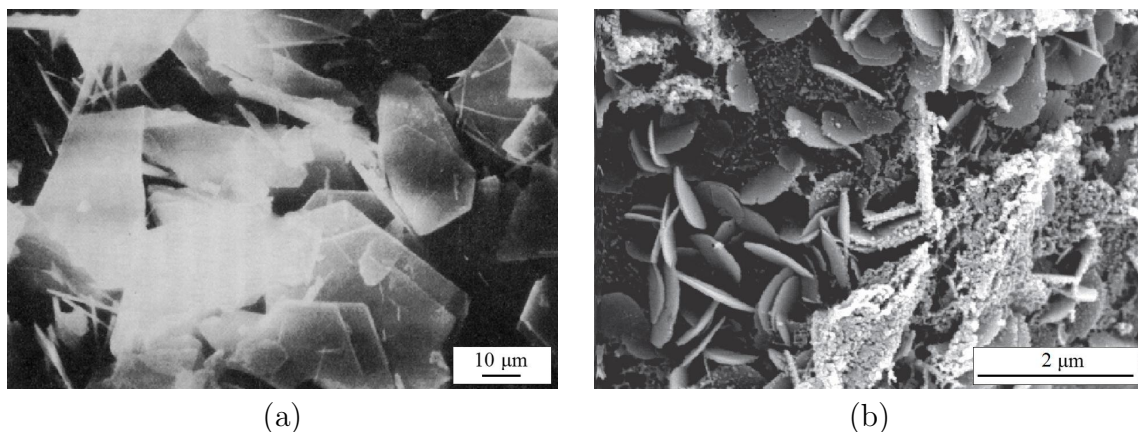


Figura 2.13: Micrografias de monosulfoaluminato obtidas por SEM: (a) placas hexagonais [Fonte: Mindess/Young/Darwin, p. 70]; (b) placas [Fonte: Cizer et al. (2008a)].

2.5.4 Resíduos de Cimento Não Hidratado

Podem persistir resíduos não hidratados de grãos de cimento (Figura 2.10b), mesmo em pastas de cimento bem hidratadas. Isto poderá dever-se ao revestimento de $C-S-H$, impedindo a hidratação completa [Mindess/Young/Darwin, 2003, pp. 73 e 75]. Na Figura 2.14 são apresentadas imagens de cristais de alite e de belite.

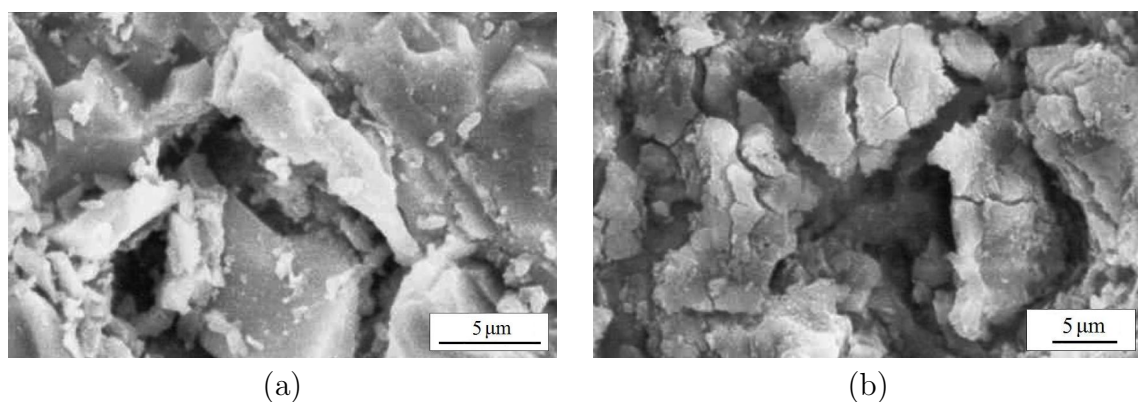


Figura 2.14: Micrografias de silicatos de cálcio anidros obtidas por SEM: (a) cristais de alite; (b) cristais de belite [Fonte: Souza/Sampaio/Tavares (2002)].

2.5.5 Calcite ($CaCO_3$)

Podem também ser visíveis vestígios de calcário sob a forma de blocos com dimensões a variar entre os 0,5 e os 2,5 μm , lisos e sem buracos, constituindo grãos individuais de calcite ($CaCO_3$). Estes apresentam-se geralmente com hábito romboédrico ou hexagonal.

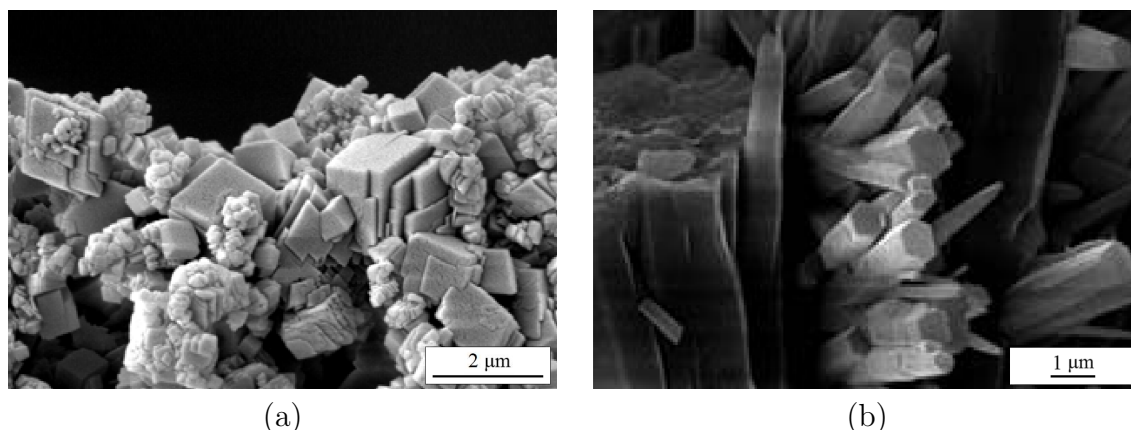
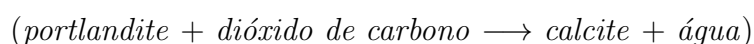
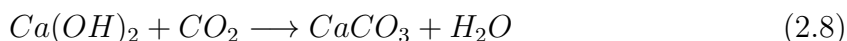


Figura 2.15: Micrografias de calcite obtidas por SEM: (a) blocos com morfologia trigonal ou romboédrica [Fonte: Cizer et al. (2008b)]; (b) prismas hexagonais [Fonte: Ariyaprayoon/Leela-Adisorn/Supsakulchai (2009)].

Durante a hidratação do cimento, forma-se calcite quando a portlandite até então formada se vai combinar com o gás carbónico do ar atmosférico (CO_2), através da equação:



O composto obtido, insolúvel em água, vai depositar-se nos poros do betão (onde, anteriormente, se instalara a portlandite), colmatando-os. A água libertada na reação pode, em condições excepcionais, não evaporar e dissolver mais hidróxido de cálcio da pasta do cimento, dando continuidade à reação. Este fenómeno químico é conhecido por *carbonatação do betão* e ocorre a partir da superfície do betão, prolongando-se por vários anos [Granato].

2.5.6 Cinza Volante

A cinza volante é um componente habitual numa pasta de cimento dadas as já referidas vantagens da sua aplicação (ver secção 2.2.4). A nível microestrutural, as cinzas podem ser facilmente identificáveis devido a apresentarem uma forma esférica. É essa forma

que lhes confere um tal efeito de rolamento (“ball-bearing”) que leva ao preenchimento de vazios e ao aumento da trabalhabilidade da mistura [ConcreteDecor].

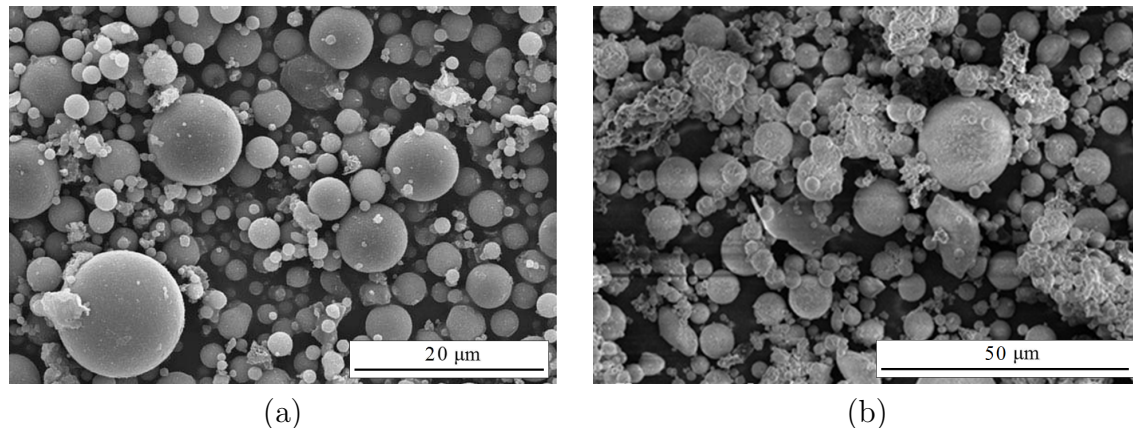


Figura 2.16: Micrografias de cinza volante obtidas por SEM: (a) [Fonte: KütahyaÇimento]; (b) [Fonte: Palomino].

2.5.7 Poros

A porosidade é uma característica importante da microestrutura. Os poros capilares ($10nm$ a $10\mu m$ de diâmetro) vão diminuindo durante a hidratação, no entanto é importante ter uma ideia da sua distribuição. Além dos poros capilares existem também os chamados poros de gel ($\leq 0,5nm$ a $10nm$). A medida e classificação do tamanho de poros é complicada devido às dificuldades experimentais e à interpretação de resultados. Para fazer medições é necessário que a pasta esteja seca, e a secagem poderá alterar a estrutura dos poros. Em micrografias obtidas via SEM podem ser visíveis poros apresentando várias formas, sendo identificados como espaços vazios com uma forma irregular [Mindess/Young/Darwin, 2003, p. 75].

2.5.8 Zona de Transição Interfacial (ITZ)

A microestrutura da pasta de cimento hidratada é muito diferente na proximidade dos materiais incorporados (agregados, fibras, e no reforço de aço). Este volume modificado é designado como “zona de transição interfacial” (*Interfacial Transition Zone*, ITZ) e, em alguns casos, pode ser facilmente identificada pela concentração de cristais de CH orientados nas proximidades da superfície externa [Mindess/Young/Darwin, 2003, p. 78].

Estudos realizados por vários investigadores mostraram que esta zona desempenha um papel importante nas propriedades do betão. Verificou-se que a ITZ é uma estrutura em camadas, possuindo menor densidade que a matriz e permitindo uma

maior penetração de fluidos e gases. Além disso, parece ser a região mais frágil quando o betão é sujeito a cargas externas [Sun/Garboczi/Shah, 2007]. A Figura 2.17 apresenta duas representações esquemáticas desta zona.

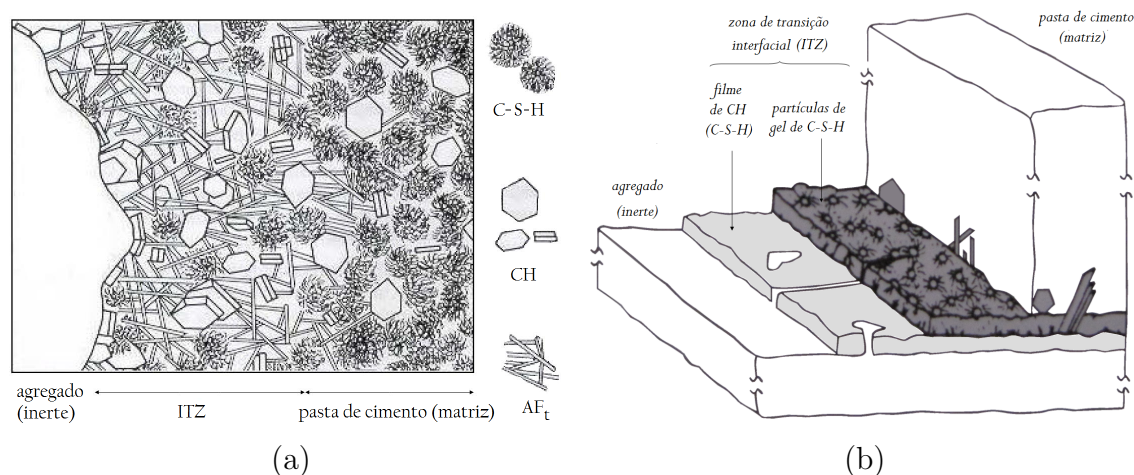


Figura 2.17: Representações esquemáticas da ITZ: (a) esquema evidenciando a morfologia das fases presentes; (b) esquema evidenciando a barreira de filme de CH e gel de C-S-H. [Fonte: adaptado de Mindess/Young/Darwin, p. 305].

A ITZ é caracterizada por possuir um elevado grau de porosidade e uma maior relação a/c devido à película de água que se forma em redor da superfície do inerte (material incorporado). Nesta película, os primeiros núcleos de cristalização que se formam são os constituintes hidratados do cimento correspondentes aos iões dotados de maior mobilidade (do sulfoaluminato de cálcio e do hidróxido de cálcio). Ocorre, portanto o crescimento de CH e AF_t [Coutinho, 1988a, p. 32]. Os cristais de CH são predominantes devido à sua capacidade para formar cristais grandes [Mindess/Young/Darwin, 2003, p. 78].

A espessura da ITZ ronda geralmente os 20 a 40 μm [Sun/Garboczi/Shah, 2007] e é uma quantidade dependente de uma série de factores, tais como: o tamanho e a forma do inerte, a sua fracção de volume e a relação a/c [Mindess/Young/Darwin, 2003, p. 78].

Com base nos fundamentos do empacotamento de partículas, é evidente que na vizinhança da superfície dos agregados deve haver, em média, uma menor fracção de partículas de cimento devido ao efeito parede. Este efeito consiste na movimentação das partículas pequenas que constituem a argamassa para junto das superfícies contínuas que delimitam o betão (como as superfícies planas dos moldes) e surge porque as partículas não se podem empacotar aleatoriamente da forma mais eficiente perto da superfície irregular dos agregados como se organizariam num espaço mais amplo.

De seguida são apresentadas duas micrografias de zonas de transição interfacial.

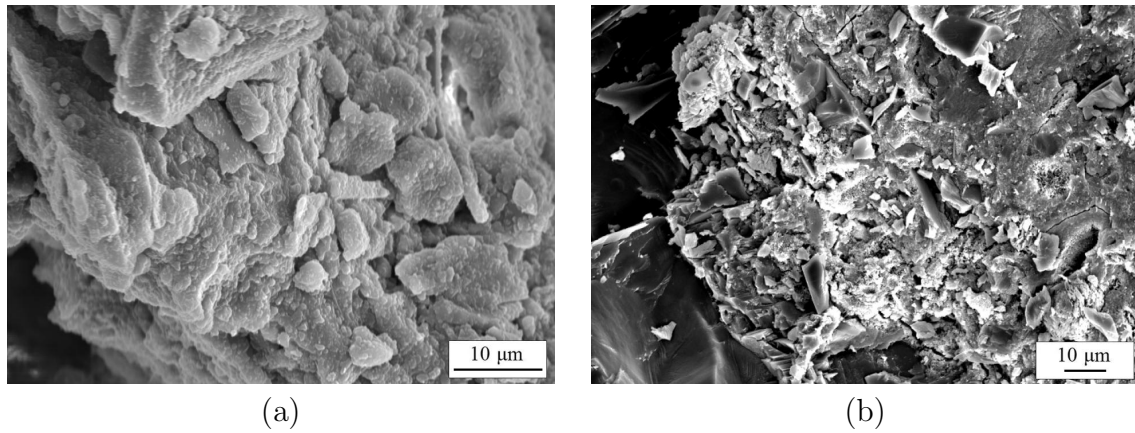


Figura 2.18: Micrografias da ITZ obtidas por SEM: (a) superfície de uma brita; (b) zona de transição interfacial. [Fonte: Pang/Balendran].

Capítulo 3

Procedimento Experimental

O procedimento experimental é extenso e complexo, pelo que se apresenta de seguida o planeamento (Tabela 3.1) e uma representação esquemática das etapas do processo (Figura 3.1). A realização deste trabalho encontra-se, portanto, dividida em 10 etapas agrupadas em cinco fases.

Tabela 3.1: Plano de trabalho.

FASES		ETAPAS	
1. ^a Fase	Introdução à actividade de fabrico de betão.	Etapa 1	Recepção, armazenamento e manuseamento de matérias-primas (cimento, agregados, adições, adjuvantes, água)
	Acompanhamento prático de cada uma das fases do processo.	Etapa 2	Processo de Fabrico de betão.
		Etapa 3	Controlo da qualidade (inspecções e ensaios às matérias-primas e ao betão, no estado fresco e endurecido.
2. ^a Fase	Estudo bibliográfico e normativo	Etapa 4	Leitura e pesquisa de material de suporte ao trabalho a desempenhar.
3. ^a Fase	Início do trabalho prático (obtenção de uma base de dados comparativa)	Etapa 5	Execução de provetes de betão e realização de ensaios de compressão e esclerometria.
		Etapa 6	Análise da pasta de cimento constituinte (FRX, DRX, DTA/TG e SEM).
4. ^a Fase	Trabalho prático principal (aquisição de dados em provetes e na estrutura)	Etapa 7	Execução de provetes e carotagem da estrutura produzida com o mesmo betão.
		Etapa 8	Ensaios: compressão de provetes cúbicos e carotes, esclerometria nos provetes cúbicos e na estrutura.
		Etapa 9	Análise da pasta de cimento constituinte (FRX, DRX, DTA/TG e SEM).
5. ^a Fase	Tratamento de dados e Conclusões.	Etapa 10	Análise de dados obtidos nos diversos ensaios e comparação entre eles. Conclusões.

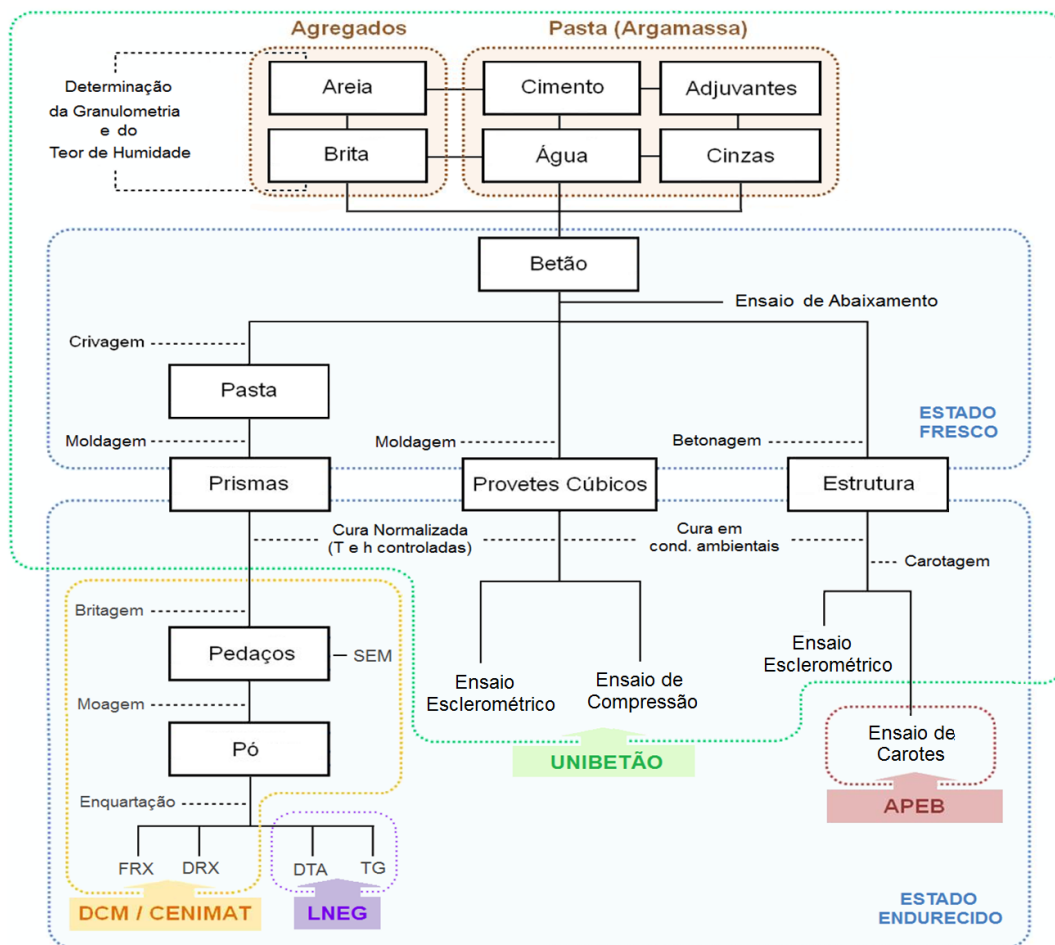


Figura 3.1: Esquema representativo do procedimento experimental.

Para a realização do presente estudo foi necessário, em primeiro lugar, obter a calibração dos esclerómetros utilizados. Para tal, foi construída uma curva de correlação entre os resultados dos ensaios esclerométricos e da resistência à compressão de provetes executados nas mesmas condições e com o mesmo tipo de betão a ser utilizado na construção da estrutura. Esta curva foi obtida através de ensaios de compressão e esclerometria de 38 amostras, para as idades de 3, 7, 28, 56, 90 dias, sendo cada amostra representada por 2 provetes cúbicos por cada idade. Para esta etapa do trabalho, com vista à obtenção de uma base de dados comparativa, foram executados e ensaiados 380 provetes cúbicos ($= 2 \text{ provetes} \times 5 \text{ diferentes idades} \times 38 \text{ diferentes colheitas}$). Produziram-se e ensaiaram-se mais 252 provetes feitos a partir de colheitas do betão utilizado para a construção da estrutura, dos quais 140 ($= 2 \text{ provetes} \times 7 \text{ diferentes idades} \times 10 \text{ diferentes colheitas}$) foram submetidos a cura em condições normalizadas e os restantes 112 ($= 2 \text{ provetes} \times 7 \text{ diferentes idades} \times 8 \text{ diferentes colheitas}$) foram submetidos a cura em condições ambientais. Aqui foram consideradas as idades de 3, 7, 14, 21, 28, 56 e 90 dias.

Estes últimos ensaios foram ainda comparados com ensaios esclerométricos à estrutura (nas idades de 7, 14, 21, 28, 56 e 90 dias) e ensaios à compressão de carotes da mesma estrutura. Foram considerados, no total, os ensaios de 69 carotes (28 das vigas de fundação, 26 dos pilares e 15 da lage) para as idades de 28 e 90 dias nas vigas e pilares e 28 e 160 dias na lage. Os resultados obtidos para carotes extraídas aos 90 dias da lage foram ignorados devido à presença de ferro da armadura.

Procurou-se também relacionar o comportamento a nível microestrutural com os resultados desses ensaios, através de ensaios de FRX, DRX, DTA/TG e SEM com vista à identificação das fases presentes ao longo da idade. A todas estas análises foram submetidas duas amostras por idade (3, 7, 28, 56 e 90 dias), uma referente à base de dados comparativa e outra à estrutura propriamente dita. No total foram, então, ensaiadas 10 amostras em cada técnica de caracterização.

De seguida, é explicado todo este processo e é de referir que todas as fotografias apresentadas neste capítulo são reais e correspondem ao trabalho prático efectuado.

3.1 Obtenção de Amostras

O betão utilizado neste estudo pertence às classes C25/30 e C30/37, com e sem adição de cinza. Após o camião betoneira efectuar a descarga de parte da amassadura (quantidade de betão fresco) procedeu-se à determinação da consistência do betão, para verificar se estava dentro dos limites da classe S3 (ver Tabela 2.3); caso contrário, o betão seria rejeitado. A amostragem foi efectuada de acordo com a norma NP EN 12350-1:2009. Foram também medidas as temperaturas ambiente e da amassadura.

Para os ensaios de resistência à compressão foram moldados provetes cúbicos a partir da amassadura no estado fresco e retiradas carotes da estrutura no estado endurecido. Para os ensaios de caracterização microestrutural foram moldados prismas de argamassa (o mesmo betão sem agregados).

3.1.1 Determinação da consistência do betão

O método utilizado para determinar a consistência ou trabalhabilidade do betão fresco é o ensaio de abaixamento (*slump*). Este ensaio obedece à norma NP EN 12350-2:2009.

Neste ensaio, o betão é compactado no interior do Cone de Abrams (um molde com a forma tronco-cónica). Este molde e uma placa, após serem humedecidos, são colocados numa superfície horizontal. O molde é cheio em três camadas, cada uma com aproximadamente um terço da altura do cone. Durante o enchimento, o molde é mantido fixo com os pés sobre as abas. Cada camada é compactada com 25 pancadas do varão de compactação uniformemente distribuídas sobre a sua secção transversal.

Depois da camada de topo ter sido compactada, é nivelada a superfície de betão com o auxílio de uma colher, de forma a retirar o excesso de betão, mas ficando o cone perfeitamente preenchido. A remoção do cone é efectuada subindo-o cuidadosamente na vertical, durante 2 a 5s, através de um movimento firme para cima sem transmitir movimentos laterais ou torsionais ao betão. Imediatamente após a remoção do cone mede-se o abaixamento, determinando a diferença entre a altura do cone e o ponto mais alto do provete que baixou. Na Figura 3.2a é ilustrado este ensaio, que deve ser efectuado sem interrupção durante cerca de 150s.

No presente trabalho foram ensaiados betões da classe S3, ou seja, em que o slump tem de apresentar valores entre os 100 e os 150 *mm* (ver tabela 2.3 do capítulo anterior). Caso contrário, o betão seria rejeitado.

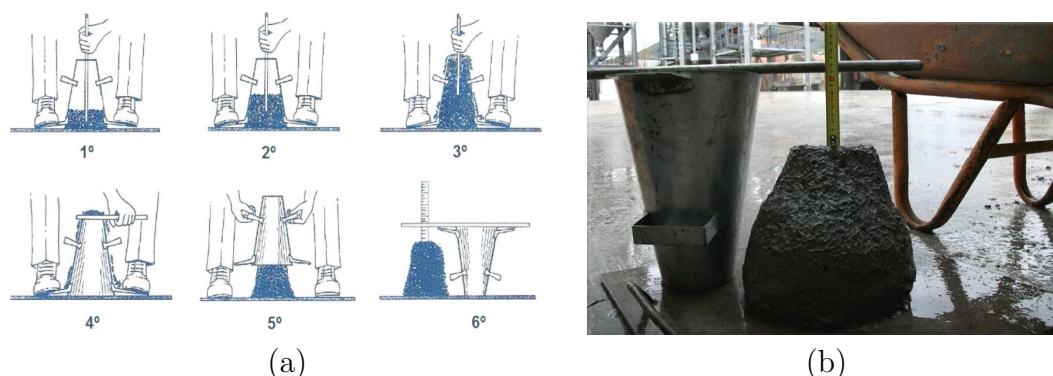


Figura 3.2: Ensaio de abaixamento: (a) esquema do procedimento [Fonte: adaptado de Agenda Secil 2010]; (b) fotografia de um ensaio de slump efectuado durante este trabalho.

3.1.2 Execução de provetes

Na Figura 3.3 apresenta-se os dois tipos de moldes utilizados neste estudo. O processo de execução ou moldagem de provetes respeita a norma NP EN 12390-2:2009.

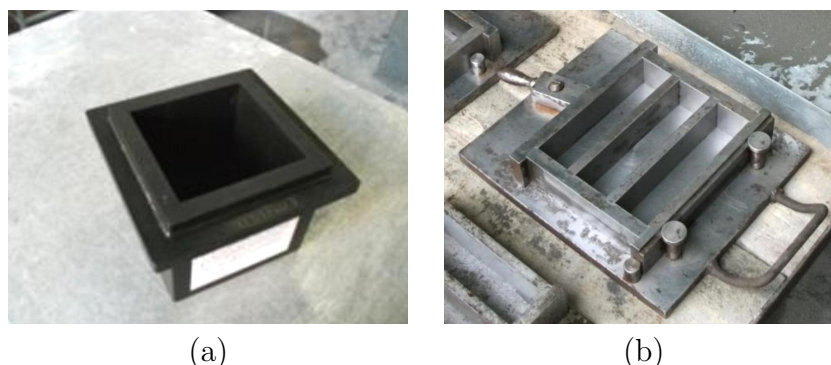


Figura 3.3: Moldes utilizados: (a) para um provete cúbico ($150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$); (b) para três prismas ($40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 160\text{mm}$).

Amostras de betão

Na execução de cada provete cúbico, o molde foi cheio em pelo menos duas camadas de amassadura, procedendo-se à agitação entre camada, de forma a que o betão se ajustasse às paredes do molde. Posteriormente, procedeu-se à vibração mecânica do betão com o auxílio de um vibrador de agulha, de forma a ficar compactado no molde. A vibração foi efectuada durante um tempo mínimo necessário para atingir a compactação completa do betão, evitando as vibrações excessivas, para não causar perda de ar introduzido no betão. Por fim, com o auxílio de uma colher é retirado o excesso de material e alisada a superfície do provete.

Amostras de pasta de cimento (argamassa)

Para os prismas de pasta de cimento, a colheita duma amostra de betão é feita da mesma forma. No entanto, a amassadura é posteriormente passada por um peneiro com uma malha de abertura de $4,75mm$, de forma a obter a dita pasta de cimento. Só foram feitas amostras provenientes da amassadura de betão da classe C25/30 (com adição de cinza). Efectuada a separação, os moldes foram cheios da mesma forma, ou seja, pelo menos em duas fases, batendo-se com o molde energicamente sobre uma superfície de forma que a pasta se acomode, preenchendo todos os espaços vazios.

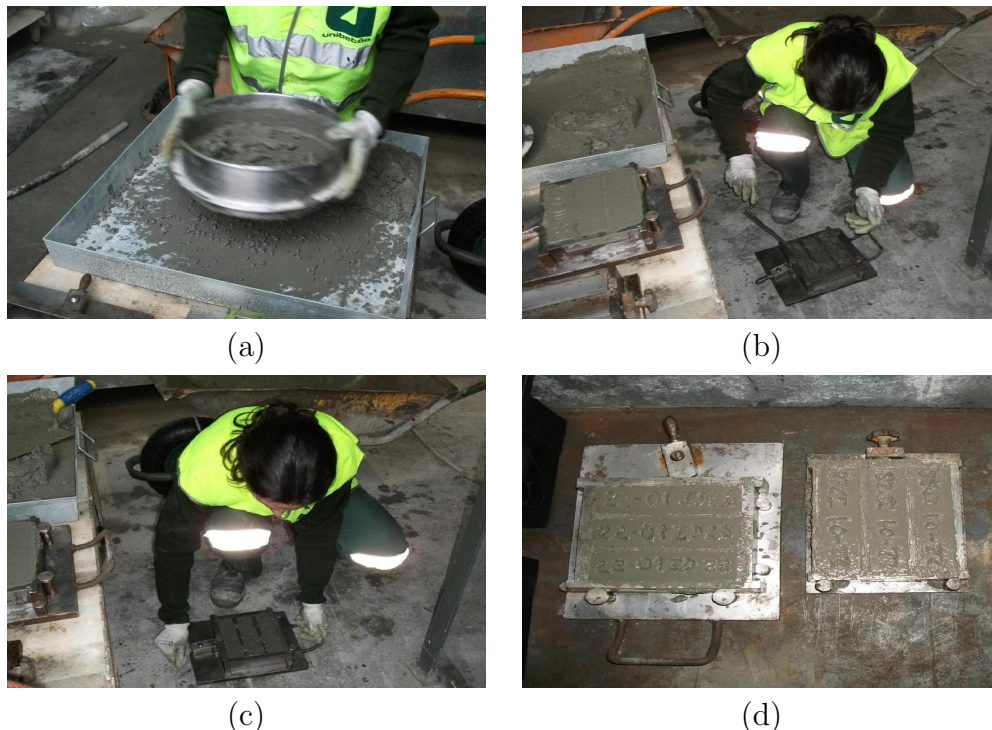


Figura 3.4: Processo de moldagem de prismas de argamassa: (a) separação da pasta de cimento por peneiração; (b) enchimento do molde; (c) agitação manual; (d) identificação dos prismas.

3.1.3 Cura de provetes

Os provetes ficaram no molde pelo menos 16 horas (mas, não mais de três dias) protegidos contra choques, vibrações e desidratação à temperatura de $20 \pm 5^\circ\text{C}$, antes de se proceder à desmoldagem.



Figura 3.5: Endurecimento dos provetes nos moldes.

Retirado do molde, cada provete cúbico e cada prisma foi introduzido num tanque com água a $20 \pm 2^\circ\text{C}$, para ser submetido à cura em condições normalizadas (NP EN 12390-2:2009). Para a cura em condições ambientais, os provetes foram simplesmente colocados no exterior. Cada provete foi devidamente identificado com o número de amostra, classe do betão e data de fabrico.



(a)



(b)

Figura 3.6: Cura dos provetes: (a) condições normalizadas; (b) em condições ambientais.

Os provetes permaneceram no tanque de cura até à idade de ensaio, sendo retirados pouco tempo (algumas horas) antes do ensaio a realizar, de forma a secarem.

3.1.4 Carotagem

A necessidade de determinar as características de resistência de betões já aplicados em obra obriga, frequentemente, à recolha de amostras desses betões para proceder a ensaios de ruptura à compressão. A forma habitual de recolha dessas amostras é a extracção de carotes. Este procedimento é efectuado com os devidos cuidados e utilizando equipamento apropriado, respeitando a norma NP EN 12504-1:2009. Esta técnica reúne condições para não alterar significativamente a estrutura em estudo. No entanto, antes de carotear é essencial que se considere cuidadosamente o objectivo do ensaio e da interpretação de resultados, tendo em conta as implicações estruturais resultantes da extracção de carotes.

O equipamento é composto por uma carotadora, que é mantida rigidamente posicionada durante a carotagem. A decisão sobre o comprimento duma carote implica ter em atenção: o diâmetro da carote, o método possível de preparação da mesma e se a comparação irá ser feita com a resistência de um provete cúbico ou cilíndrico.

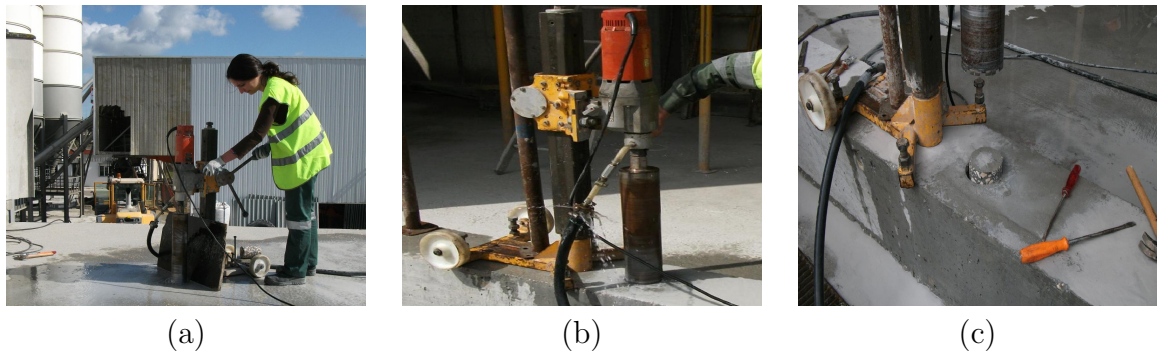


Figura 3.7: Carotagem: (a) processo; (b) carotadora; (c) carote pronta a ser removida.

Salvo especificação contrária, as carotes devem ser obtidas perpendicularmente à superfície, de forma a não serem danificadas. Para este estudo foram extraídas carotes das vigas de fundação (orientação = $\{0^\circ, 90^\circ\}$), nos pilares (orientação = 0°) e na laje (orientação = 90°); como se pode ver na Figura 3.8.

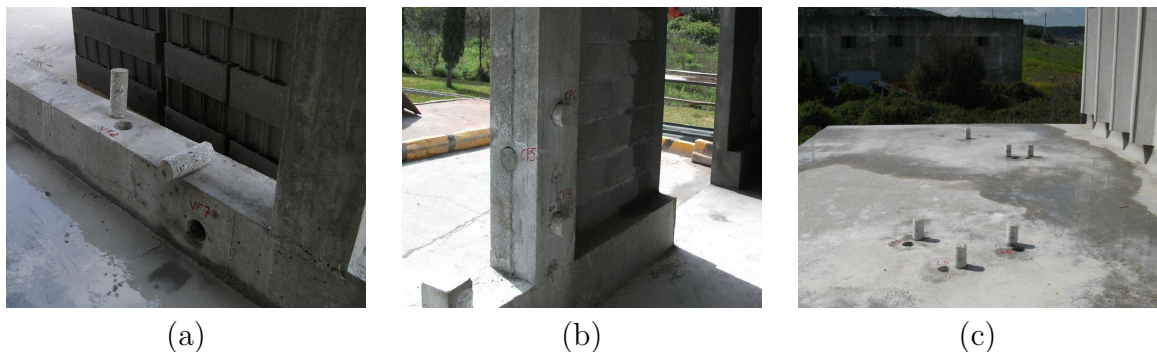


Figura 3.8: Carotes: (a) de uma viga de fundação; (b) de um pilar; (c) da laje.

Retirada uma carote, foi feita uma inspecção visual de forma a identificar possíveis anomalias (nomeadamente a presença de ferro da armadura e de vazios) e foram identificados a carote e o local da extracção.

3.2 Caracterização do Betão

A caracterização mecânica do betão foi feita ao nível da sua resistência à compressão. Foram efectuados dois tipos de ensaio aos provetes cúbicos: esclerométrico e de compressão. O primeiro a ser efectuado foi o esclerométrico visto ser um ensaio não destrutivo.

3.2.1 Ensaio Esclerométrico

O ensaio esclerométrico, segundo a norma NP EN 12504-2:2003 consiste na determinação de um valor (índice esclerométrico) que pode ser usado para avaliar a uniformidade do betão *in situ*, delinear zonas ou áreas de qualidade deficiente ou estruturas com betão deteriorado. Este método não constitui por si só uma alternativa à determinação da resistência à compressão do betão, mas com uma correlação adequada pode fornecer uma estimativa da sua resistência *in situ*. Na realidade, ao se determinar o índice esclerométrico, a grandeza avaliada é a dureza superficial, sendo o valor obtido posteriormente correlacionado empiricamente com a resistência à compressão. O maior inconveniente prende-se com o facto de apenas se avaliar o betão superficial, numa espessura de cerca de 30-50mm [Júlio/Fernandes/Veludo, 2004, p. 2 e Evangelista, p. 41].

Para a realização deste ensaio é utilizado um martelo esclerométrico, ou esclerómetro. É um equipamento leve, de fácil operação e barato [Evangelista, 2002, p. 41].

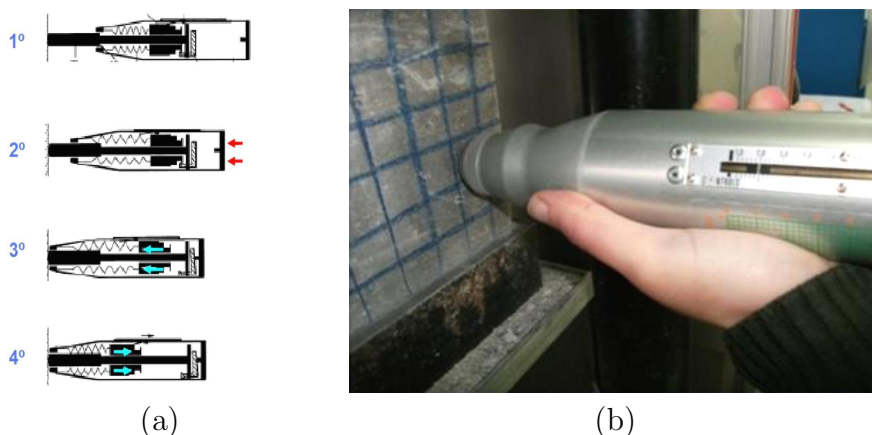


Figura 3.9: Ensaio esclerométrico: (a) esquema do funcionamento do esclerómetro (Fonte: adaptado de Thomaz, p. 1); (b) fotografia de um ensaio efectuado durante este trabalho.

O princípio do método é o seguinte: ao pressionar o êmbolo do esclerómetro contra uma superfície de betão a analisar, uma mola existente no interior do aparelho é traccionada. Assim que o êmbolo é completamente empurrado para o interior do aparelho, é libertada instantaneamente uma massa que bate na extremidade interior oposta (ver Figura 3.9a). Este choque é transmitido à superfície a ensaiar, a qual reage provocando um ressalto, que é retransmitido pelo êmbolo à massa móvel, que ao movimentar-se faz mover o ponteiro do aparelho. Antes de afastar o esclerómetro da superfície, o operador prende a massa carregando num botão para esse efeito e só depois regista o valor indicado pelo ponteiro. O resultado é, então, expresso em termos da distância repercutida por essa massa, ou seja quanto mais dura e compacta for a superfície do betão, maior será o ressalto [NP EN 12504-2:2003 e Thomaz, p. 1]. Geralmente, o ensaio é efectuado com o esclerómetro colocado na horizontal. Incorreções nos valores do índice esclerométrico, obtidos em ensaios realizados noutra posição, deve-se à influência da gravidade sobre a força da mola [Evangelista, 2002, p. 46].

Como já foi referido, foram realizados ensaios a provetes cúbicos (submetidos a diferentes tipos de cura) e à estrutura, nas diferentes idades. Os ensaios foram realizados sempre com o esclerómetro na posição horizontal (orientação = 0°), com excepção da lage em que teve de ser efectuado na vertical (orientação = 90°); ver Figura 3.11. Nos provetes, os ensaios foram efectuados numa das faces perpendiculares à face de enchimento, cuja superfície foi preparada com uma pedra abrasiva, tornando-a mais lisa, e foi feita uma marcação quadriculada. O provete foi colocado numa prensa (*FORM+TEST Prüfsysteme, ALPHA3-H (M10)*) e submetido a uma carga de aproximadamente 15% do valor da sua carga de ruptura (esperada), de forma a ficar imóvel durante a realização do ensaio.



Figura 3.10: Ensaio esclerométrico aos provetes cúbicos: (a) provetes com marcação quadriculada prontos a ensaiar e os dois esclerómetros utilizados; (b) ensaio a um provete.

Em cada ensaio foram apontados 5 valores do índice esclerométrico, referentes a posições alternadas na quadrícula. Cada valor que saísse da média (variasse mais de 5 unidades) era automaticamente desprezado e efectuada nova medição. Quando necessário, foi feito ou repetido o ensaio na face oposta do provete.

Na estrutura foram efectuados ensaios de forma análoga, embora em vez de 5 tenham sido registados 8 valores do índice esclerométrico.



Figura 3.11: Ensaio esclerométrico à estrutura: (a) num pilar (orientação = 0°); (b) na lage (orientação = 90°).

Como condições de ensaio, há a referir que os ensaios na estrutura foram realizados em dias de céu limpo com temperatura ambiente a variar entre 13 e 20 °C nas primeiras idades e entre 20 e 30 °C para idades a partir dos 28 dias, tendo estas sido registadas (Anexo H) por uma sonda colocada no exterior, perto da estrutura. Também é de referir que a estrutura não foi alvo de cura durante a sua construção, estando apenas sujeita às condições ambientais.

Foram utilizados os mesmos esclerómetros (Modelos: *N* e *N CAT C 181*; Fabricante: *Controls*) utilizados nos ensaios de provetes, também com a finalidade de comparar resultados.

3.2.2 Ensaio de Compressão

Após o ensaio esclerométrico, todos os provetes cúbicos foram submetidos ao ensaio de compressão, de acordo com a norma NP EN 12390-3:2009.

A determinação da resistência à compressão do betão consiste na utilização de uma prensa, na qual os provetes são ensaiados até à ruptura. Regista-se a carga máxima suportada pelo provete e calcula-se a resistência à compressão do betão. É, portanto, um ensaio destrutivo, já que o provete fica danificado após ruptura.

3.3. CARACTERIZAÇÃO DA PASTA DE CIMENTO

Para determinar a resistência à compressão, o provete foi colocado centrado lateralmente em relação aos pratos da prensa *MATEST SERVO UNIT* (visível na Figura 3.12), aplicando-se a carga sobre as faces perpendiculares à face de enchimento (ver Figura 2.4, secção 2.3 do capítulo anterior). A carga foi aplicada uniformemente, à velocidade de 0,6 MPa/s ou 14kN/s, até à ruptura.

No total, foram moldados e ensaiados 657 provetes cúbicos. Destes, 375 são relativos à base de dados comparativa (todos submetidos a cura em condições normalizadas) e 252 relativos à estrutura, como já referido anteriormente em pormenor.

Todo o procedimento anteriormente descrito foi efectuado nas instalações da Uni-betão (unidade industrial de Frielas).

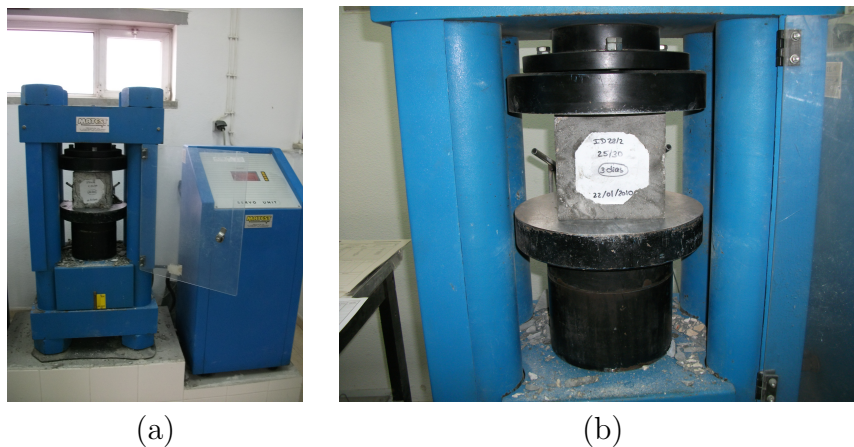


Figura 3.12: Ensaio de compressão: (a) prensa; (b) provete cúbico pronto a ensaiar.

As carotes também foram submetidas a este ensaio, no entanto este foi realizado na APEB (Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto). Foram cortadas, rectificadas por desgaste e ensaiadas de acordo com a norma NP EN 12504-1:2009. O índice de vazios foi estimado através de inspecção visual de acordo com o descrito no *Concrete core testing for strength*, Concrete Society, Technical Report N^o11, 1987; não existindo legislação nacional aplicável na determinação da potencial tensão de ruptura.

3.3 Caracterização da Pasta de Cimento

Para a realização dos ensaios de caracterização microestrutural da argamassa, as amostras de pasta de cimento tiveram de ser previamente preparadas.

3.3.1 Preparação das amostras para análise

Para as análises de FRX e DTA/TG as amostras foram reduzidas a pó, para SEM utilizaram-se pequenos pedaços dos prismas e para as análises de DRX foram uti-

lizadas amostras em forma de pedaços e em pó. Seguidamente é descrito o processo de preparação.

Britagem

Após atingirem a idade pretendida, os prismas foram retirados do tanque de cura (o mesmo dos provetes cúbicos) e foram deixados a secar por pelo menos 24 horas.

Os prismas secos foram reduzidos a pequenos pedaços com o auxílio de uma maceta (ver Figura 3.13b). Dessa redução foram reservados alguns pedaços (*bulks*) para os ensaios de SEM e DRX, e o restante foi encaminhado para a moagem.

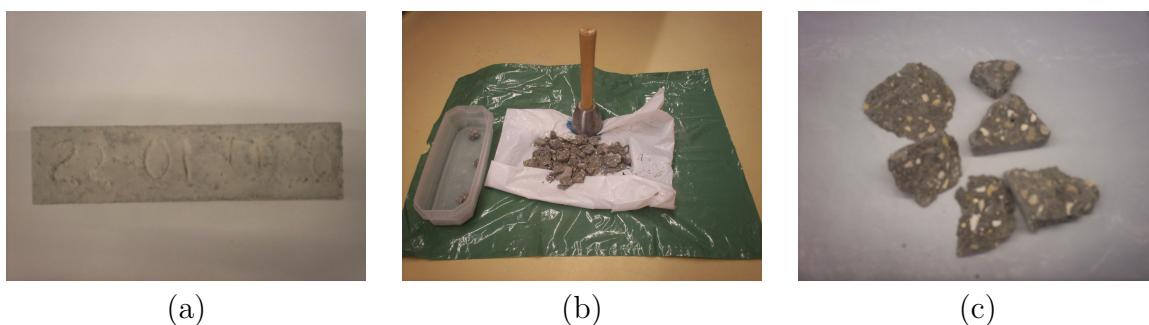


Figura 3.13: Britagem: (a) prisma seco; (b) redução do prisma; (c) pedaços.

Moagem

A moagem dos pedaços foi feita com um moinho de martelos *Retsch SK 100* usando-se um crivo de 1,5mm (existentes no CENIMAT).

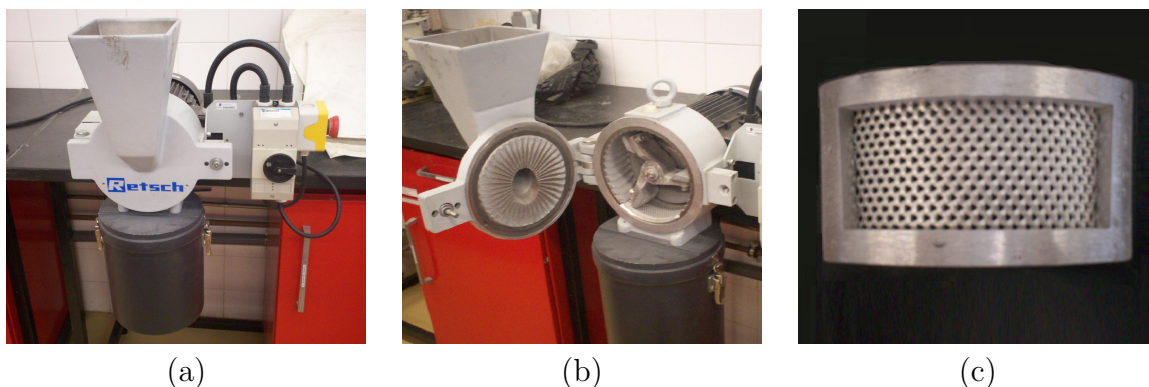


Figura 3.14: Moinho de martelos: (a) exterior; (b) interior; (c) crivo de 1,5mm.

Em primeiro lugar, abriu-se o moinho e verificou-se se este se encontrava limpo e em condições de utilização, isto é sem resíduos de outro material. Fechou-se, ligou-se o aparelho e alimentou-se a boca do moinho com o material em pedaços, em pequenas doses com o auxílio de uma colher. Assim que todo o material ficou moído, desligou-se o aparelho e voltou-se a abrir para retirar, com o auxílio de um pincel, o excesso que

3.3. CARACTERIZAÇÃO DA PASTA DE CIMENTO

ficou nas pás e em todo o seu interior. Retirou-se o balde de depósito de material e despejou-se sobre a bancada para proceder à enquartação do mesmo.



Figura 3.15: Moagem: (a) alimentação do moinho com o material; (b) remoção do excesso de material do interior do moinho; (c) pedaços e pó obtido.

Amostragem por Enquartação

Para a realização de cada análise é apenas necessário uma pequena quantidade de material, que foi obtida por enquartação (um método de amostragem muito utilizado) [Cunha, 2002]. Com o pó depositado em cima da bancada foi feito um monte em forma cônica com base radial, sendo depois progressivamente achatado e alisado com o auxílio de uma espátula. Na camada achatada de pó foram feitos dois cortes perpendiculares entre si, dividindo o material em quatro partes iguais, das quais foram removidas duas opostas. Repetiu-se este procedimento mais duas a três vezes até obter a quantidade de material desejada. A amostra obtida foi reservada e identificada, ficando pronta para análise.

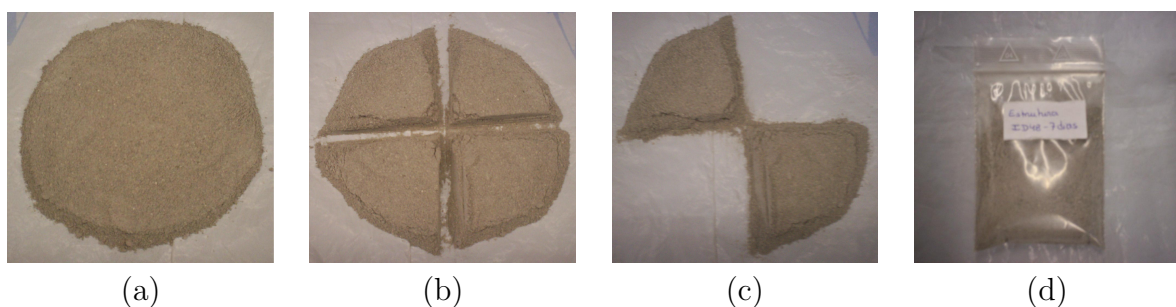


Figura 3.16: Enquartação: (a) monte achatado e alisado; (b) divisão em quatro partes iguais; (c) remoção de duas partes opostas; (d) amostra identificada pronta para análise.

3.3.2 Difracção de Raios-X

A identificação de fases minerais presentes nas diversas amostras foi realizada por recurso à Difracção de Raios-X (DRX). O princípio de funcionamento desta técnica de

caracterização encontra-se explicado no Anexo C (secção C.1).

Para a realização de tal estudo, utilizou-se um difractómetro de pós *Rigaku, modelo DMAX III-C 3KW* (existente no CENIMAT), com ampola de CuK_{α} ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$) e monocromador de grafite no percurso do feixe difractado (ver figura 3.17a). As condições de operação utilizadas foram de 30kV e 20mA, à temperatura ambiente. Foi efectuado um varrimento em 2θ entre 10° e 60° . Foram realizados ensaios para amostras de pasta de cimento em pó e em pedaços (ver figura 3.17), para as idades de 3, 7, 28, 56 e 90 dias, referentes ao betão da base de dados comparativa e referentes à estrutura.

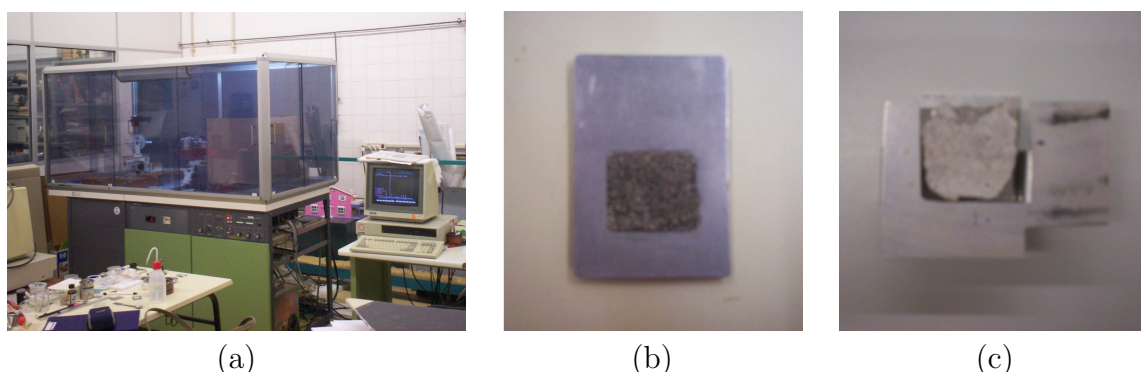


Figura 3.17: Análise de DRX: (a) difractómetro; amostras (b) em pó e (c) em pedaço.

A identificação das referidas fases foi efectuada por comparação dos difractogramas obtidos experimentalmente com várias fichas JCPDS (*Joint Committee on Powder Diffraction Standards*) pertencentes a um banco de dados internacional (ICDD – *International Centre for Diffraction Data*), que reúne praticamente todas as estruturas cristalinas orgânicas e inorgânicas conhecidas.

3.3.3 Fluorescência de Raios-X

A Fluorescência de Raios-X (FRX) é uma poderosa técnica (rápida, precisa e não destrutiva) que permite não só uma análise qualitativa (identificação dos elementos presentes numa amostra) mas também quantitativa, permitindo estabelecer a proporção em que cada elemento se encontra presente numa dada amostra (Jordan Valley e Omega Physics). O princípio de funcionamento desta técnica encontra-se explicado no Anexo C (secção C.2).

Recorreu-se a esta técnica para determinar os elementos presentes nas amostras de pasta de cimento, como auxílio à técnica de difracção (referida anteriormente), e respectiva concentração de forma a controlar variações a nível da proporção em que

cada elemento se encontra presente na constituição das diferentes amostras.

As análises químicas por FRX, foram realizadas num espectrómetro de raios-X por dispersão em comprimento de onda (*Panalcal Axios*) de 4,0kW (existente no CENIMAT). As condições de ensaio foram as seguintes: intensidade de corrente a variar entre 36 e 60mA, diferença de potencial a variar entre 60 e 100kV e foram utilizados vários cristais analisadores, consoante os elementos em análise. Como anteriormente referido, as amostras foram analisadas em pó, sendo colocadas em porta-amostras como o da Figura 3.18b. Foram realizados ensaios a amostras de pasta de cimento para as idades de 3, 7, 28, 56 e 90 dias.



Figura 3.18: Análise de FRX: (a) espectrómetro de raios-X; (b) porta-amostras.

3.3.4 Análises Térmicas

Para caracterizar termicamente as amostras de pasta de cimento recorreu-se à análise térmica diferencial e à termogravimetria.

A Análise Térmica Diferencial (DTA; do inglês *Differential Thermal Analysis*) consiste na medição da diferença de temperatura entre uma substância (amostra) e um material de referência (termicamente inerte, geralmente alumina em pó ou simplesmente uma cápsula vazia), em função da temperatura ou do tempo a que ambos os materiais são submetidos, durante um aquecimento programado e controlado por sensores de temperatura [Wendhausen, pp. 18 e 19 e Ionashiro, 2005, p. 44]. Por outro lado, a Termogravimetria (TG) baseia-se no estudo da variação de massa da amostra em função da temperatura ou do tempo, durante o programa de aquecimento controlado [Wendhausen, p. 9], tendo em vista a determinação do grau de hidratação das diversas amostras. O princípio de funcionamento e o tipo de resultados obtidos em ambas está descrito no Anexo D.

No presente estudo foram realizadas análises a amostras de pasta de cimento para tempos de hidratação de 3, 7, 28, 56 e 90 dias e também de areia, de cimento e de cinza. Os ensaios foram efectuados num equipamento Setaram TG-DTA 92-16 (LNEG), com sensibilidade de $0,025\mu V$ para DTA e 0,25% para TG, numa gama de temperaturas de aproximadamente 20 a $1000^{\circ}C$, com uma taxa de aquecimento de $10^{\circ}C/min$, numa atmosfera de árgon, usando cadinhos de alumina e alumina calcinada como referência. Foram analisadas amostras com uma massa média de $120mg$, tendo sido previamente secas em estufa a $110^{\circ}C$ durante $24h$, sendo o arrefecimento feito em exsiccador.

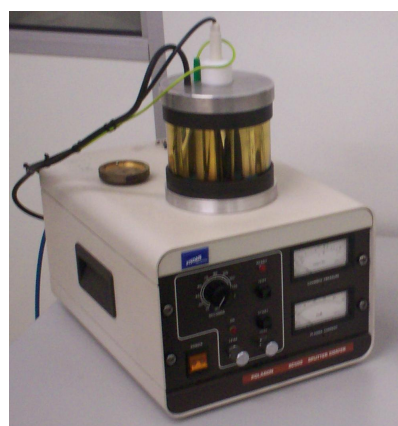
3.3.5 Microscopia Electrónica de Varrimento

A evolução da microestrutura das amostras ao longo da idade e com diferentes graus de hidratação foi estudada por microscopia electrónica de varrimento (SEM).

Foi utilizado um microscópio *Zeiss DSM 962* (Figura 3.19a), equipado com um sistema detector de radiação-X por energia dispersiva (EDS ou EDX, do inglês *Energy Dispersive X-ray Detector*), permitindo obter informações sobre a morfologia e análise química elementar semiquantitativa das amostras. Estas foram previamente secas em estufa a $60^{\circ}C$ durante vários dias (mínimo 8 dias), sendo depois colocadas num exsiccador para arrefecimento. Antes do ensaio foram, ainda, cobertas com uma fina camada de ouro utilizando um metalizador *Polaron Sputter Coater SC502* (Figura 3.19b), durante poucos segundos. O princípio de funcionamento do tipo de microscópio utilizado neste método encontra-se descrito no Anexo E. O equipamento utilizado pertence ao CENIMAT.



(a)



(b)

Figura 3.19: Equipamento para análise de SEM:(a) microscópio; (b) metalizador.

3.3. CARACTERIZAÇÃO DA PASTA DE CIMENTO

Foram obtidas imagens utilizando electrões secundários (SE – *Secondary Electrons*) e electrões retrodifundidos (BE – *Backscattered Electrons*), sendo a energia do feixe de $20kV$. Os espectros de energia dos electrões foram obtidos através da captura dos raios-X característicos, permitindo a avaliação da composição química elementar.

Capítulo 4

Apresentação e Discussão de Resultados

4.1 Caracterização do Betão

4.1.1 Obtenção de Curvas de Correlação

De forma a relacionar os valores de resistência à compressão e de dureza ou resistência superficial, obtidos nos respectivos ensaios, foram inicialmente determinadas as curvas de correlação relativas à utilização de dois esclerómetros (A e B) aparentemente iguais.

Estes resultados referem-se à base de dados comparativa e foram obtidos através de ensaios realizados em 375 provetes de diferentes classes de resistência, para as idades de 3, 7, 28, 56 e 90 *dias*, sendo apresentados nas Tabelas F.1 a F.10 (Anexo F).

De um modo geral, verificou-se o aumento quer da resistência à compressão quer da dureza superficial do material, ao longo da idade. Ocorreram, no entanto, algumas excepções como se pode ver pelos gráficos das Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, referentes aos diferentes tipos de amostras de betão estudadas.

Pelos gráficos referentes ao ensaio de resistência à compressão, verifica-se que a resistência do material aumenta ao longo da idade, com uma ou outra pequena excepção, para todos os tipos de amostra. Já no ensaio esclerométrico verificam-se alguns decréscimos, mas para diferentes idades consoante o tipo de amostra, que poderão estar relacionados com a possível presença de alguma humidade superficial. Ora, para amostras C25/30 ou C30/37 com adição de cinza essa diminuição ocorre aos 56 dias de idade, voltando a subir posteriormente. Para as amostras C25/30 ou C30/37 sem adição de cinza verifica-se o mesmo, mas mais cedo, para a idade de 28 dias. Isto mostra que a cinza influencia o processo de endurecimento do betão e, conseqüentemente, os resultados obtidos nos ensaios.

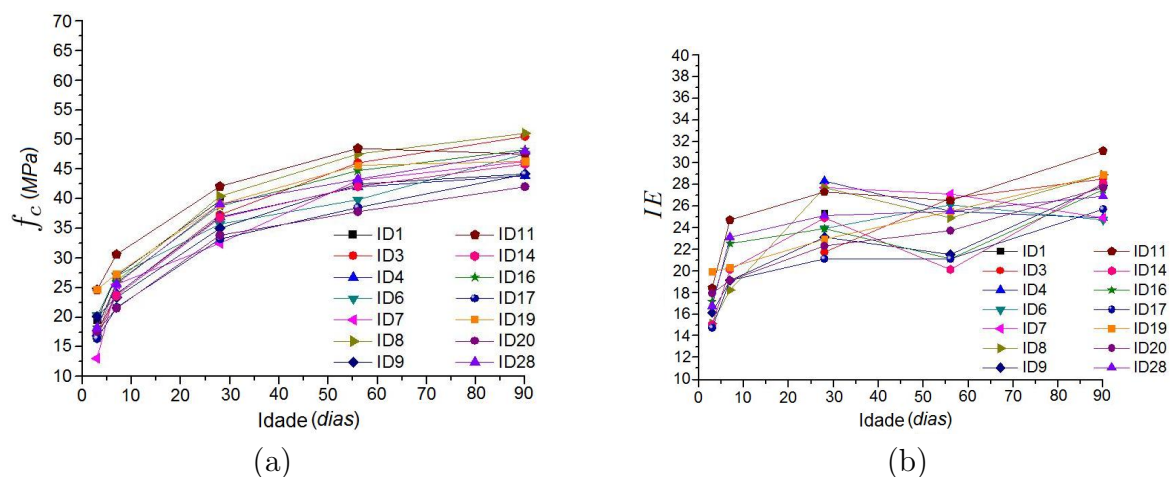


Figura 4.1: Comparação de amostras de betão C25/30 com adição de cinza:
(a) ensaio de compressão; (b) ensaio esclerométrico.

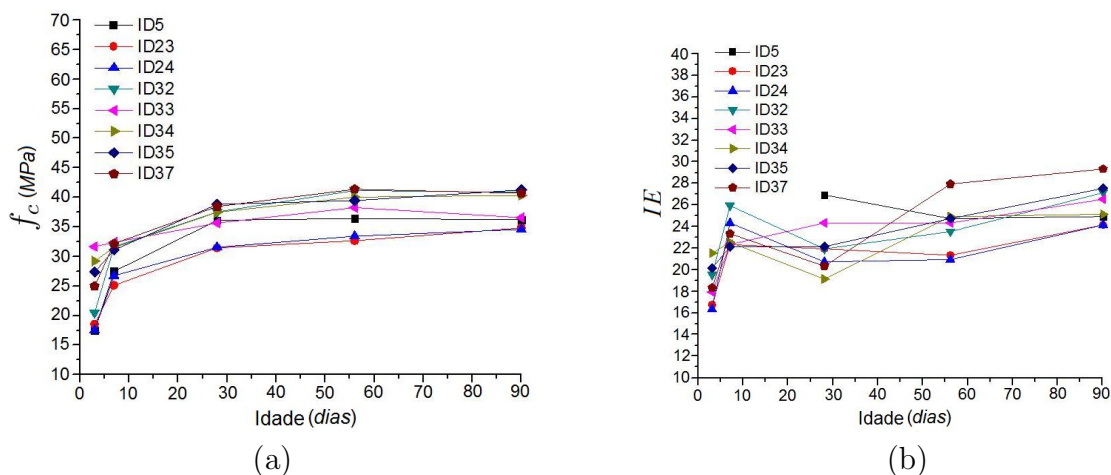


Figura 4.2: Comparação de amostras de betão C25/30 sem adição de cinza:
(a) ensaio de compressão; (b) ensaio esclerométrico.

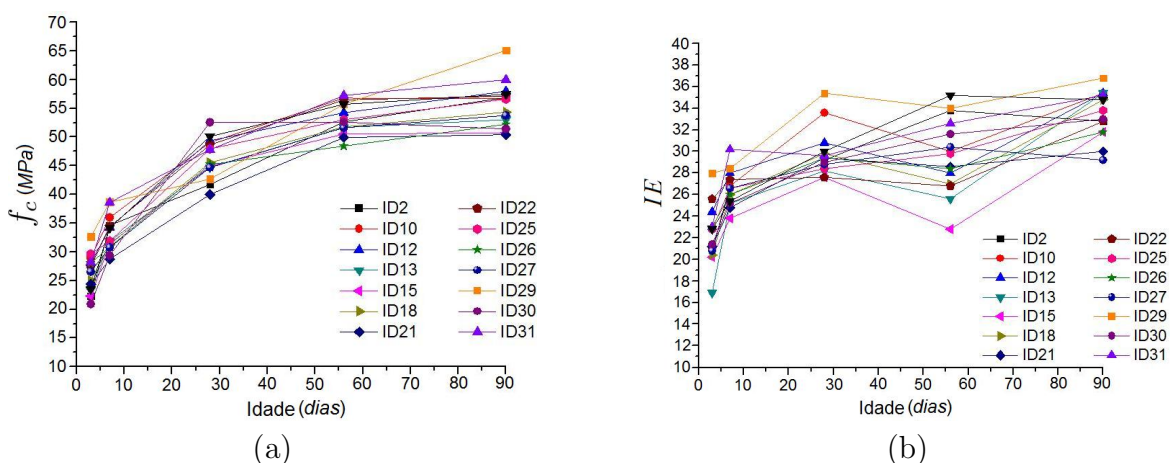


Figura 4.3: Comparação de amostras de betão C30/37 com adição de cinza:
(a) ensaio de compressão; (b) ensaio esclerométrico.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO

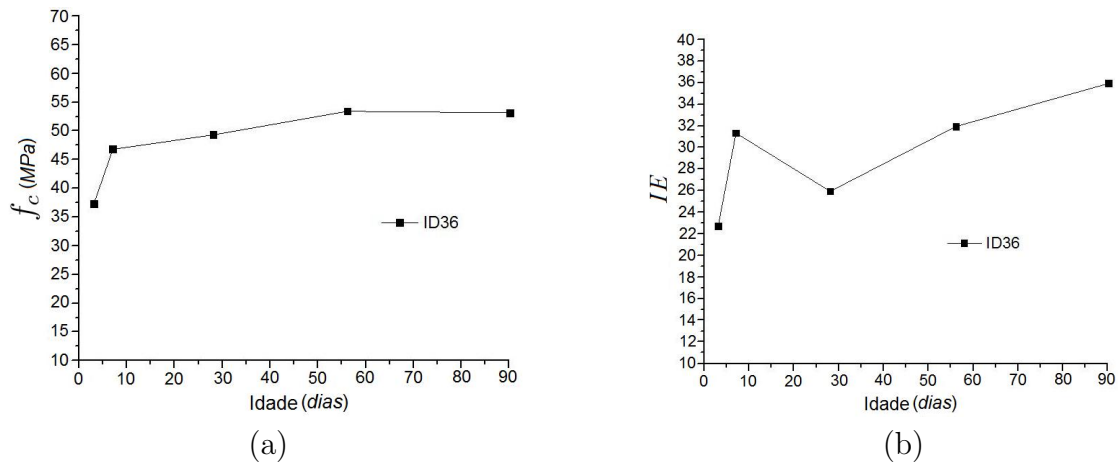


Figura 4.4: Comparação de amostras de betão C30/37 sem adição de cinza:
(a) ensaio de compressão; (b) ensaio esclerométrico.

Observando novamente os gráficos referentes ao ensaio de resistência à compressão, verifica-se resistências mais elevadas para amostras C30/37 com ou sem cinza, como era de esperar. Há, no entanto, de referir o facto de as amostras com cinza, de qualquer uma das classes de betão, apresentarem um diferente comportamento no aumento da resistência, possuindo menores valores no início e tornando-se mais resistentes ao longo da idade. No ensaio esclerométrico, este fenómeno não é tão evidente.

Na figura 4.5 são apresentadas as curvas que correlacionam a resistência obtida com os esclerómetros e a resistência obtida no ensaio de compressão, ambas obtidas através dos resultados de ensaios realizados em provetes cúbicos que foram submetidos a cura em condições normalizadas (ver Capítulo 3, subsecção 3.1.3). Estas curvas são comparadas com a curva de calibração fornecida pelo fabricante do aparelho.

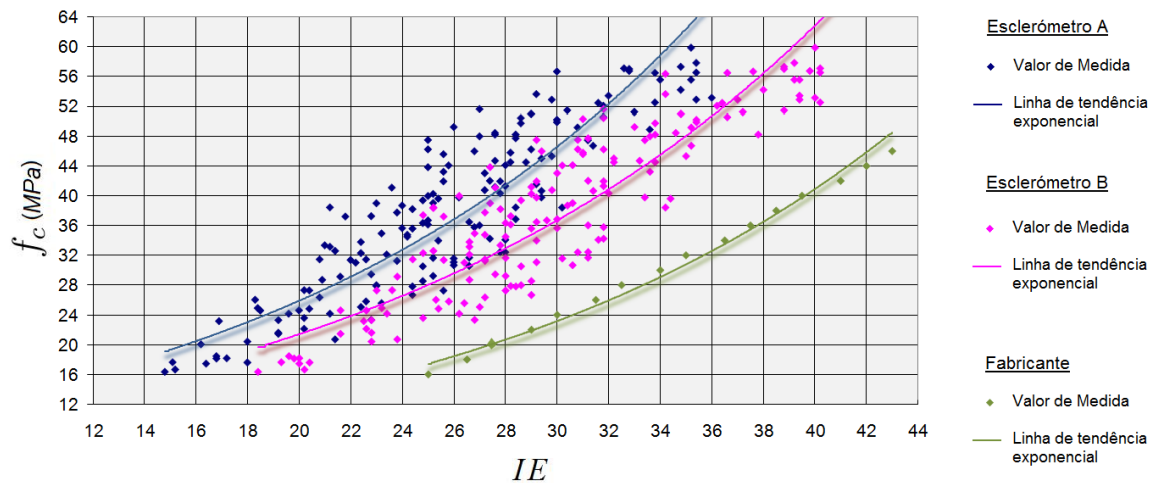


Figura 4.5: Comparação entre as curvas de correlação obtidas para os esclerómetros A e B com a curva fornecida pelo fabricante.

As curvas obtidas constituem linhas de tendência exponencial que, embora não seja definido em norma portuguesa e outros investigadores tenham adoptado outro tipo de linhas de tendência em seus trabalhos (ver secção 2.3), foram as que se mostraram mais apropriadas face aos resultados obtidos.

Verifica-se que, embora as curvas apresentem um traçado concordante, as leituras dos aparelhos A e B diferem muito das fornecidas pelo fabricante, o que se ficará a dever à particularização dos parâmetros de ensaio, como os diferentes tipos de betão utilizado e as condições de realização dos ensaios, perante o objectivo final deste estudo.

No entanto, também é notável uma diferença significativa nos valores obtidos com os dois esclerómetros (aparelhos semelhantes), utilizados em ensaios idênticos (o mesmo material a analisar e as mesmas condições de ensaio). No Anexo F são também apresentadas individualmente as curvas de correlação e respectivas equações obtidas nos ensaios realizados com cada esclerómetro. As equações obtidas para os esclerómetros A e B são então, respectivamente:

$$f_{c(A)} = 8,0658e^{0,0585.IE_{(A)}} \quad (4.1)$$

e

$$f_{c(B)} = 7,3168e^{0,0538.IE_{(B)}} \quad (4.2)$$

onde f_c representa a resistência real, ou seja a resistência do betão obtida segundo o ensaio de compressão em provetes cúbicos (valores em MPa), e IE representa o índice esclerométrico, ou seja o valor obtido no ensaio esclerométrico.

Esta diferença também é notada no estudo comparativo da resistência do betão dos provetes e da estrutura, no qual foram utilizadas como suporte as correlações representadas pelas duas equações anteriores.

4.1.2 Comparação da Resistência de Provetes e da Estrutura

Para a realização deste estudo foram efectuados ensaios esclerométricos e de resistência à compressão a 140 provetes cúbicos submetidos a cura normalizada e outros 112 submetidos a cura em condições ambientais, nas idades de 3, 7, 14, 21, 28, 56 e 90 *dias*. Foram também realizados, para as mesmas idades, ensaios esclerométricos à estrutura e ensaio de resistência à compressão de carotes nas idades de 28 e 90 *dias*.

Os índices esclerométricos obtidos nos referidos ensaios foram convertidos em valores MPa através das equações 4.1 e 4.2. Posteriormente, traçaram-se as curvas relativas aos diferentes ensaios em função da idade do betão.

A Tabela 4.1 apresenta de forma resumida e esquemática todas as comparações efectuadas dos resultados obtidos nos diversos ensaios realizados.

Tabela 4.1: Comparação dos resultados da resistência do betão considerando as diversas variáveis inerentes aos ensaios de compressão e esclerometria realizados ao longo da idade. ($\uparrow$ -aumenta; (i,j) - excepto nas idades de i, j dias; $\cdots$ - não realizado; $>$ - maior na primeira condição; $<$ - menor na primeira condição; $\times$ - cruzam entre si; $\otimes$ - próximos podendo haver sobreposições; * - incorrecção devido à diferente orientação do esclerómetro (90°).

FACTORES DE COMPARAÇÃO		AMOSTRAS										
Ensaio	Condições	ID39	ID40	ID41	ID42	ID43	ID44	ID45	ID46	ID47	ID48	
COMPRES.	Cubos em cura normalizada	↑	↑	↑ ₍₉₀₎	↑	↑	↑	↑	↑	↑ ₍₉₀₎	↑	
	Cubos em cura ambiente	↑	↑	...	...	↑	↑	↑ ₍₂₈₎	↑	↑	↑	
	Cubos em cura normal. e Cubos em cura ambiente	>	> ₍₉₀₎	...	...	>	>	> ₍₉₀₎	>	> _(28,90)	> ₍₉₀₎	
	Cubos em cura normal e Carotes	< ⊗	> ⊗	...	...	< ⊗	×	>	>	>	>	
	Cubos em cura ambiente e Carotes	<	> ⊗	...	...	<	×	<	>	>	>	
	Cubos em cura normal.	↑	↑	↑	↑ ₍₇₎	↑	↑	↑	↑	↑ ₍₅₆₎	↑	
	Cubos em cura ambiente	↑	↑	...	...	↑	↑	↑	↑	↑	↑ ₍₅₆₎	
	Cubos em cura normal. e Cubos em cura ambiente	<	< _(56,90)	...	...	<	<	<	< ₍₂₈₎	<	<	
	Cubos em cura normal. e Estrutura	<	> ₍₂₈₎	...	...	<	<	<	×	*	<	
	Cubos em cura ambiente e Estrutura	×	×	...	...	> ₍₅₆₎	< ₍₂₁₎	<	×	*	×	
ESCLEROMETRIA	Cubos em cura normalizada	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑ ₍₉₀₎	↑	↑ ₍₅₆₎	↑ ₍₉₀₎	
	Cubos em cura ambiente	↑	↑	...	...	↑	↑	↑	↑	↑	↑	
	Cubos em cura normal. e Cubos em cura ambiente	<	<	...	...	<	<	<	<	<	<	
	Cubos em cura normal. e Estrutura	< ₍₅₆₎	×	...	...	<	< ₍₂₈₎	<	*	<	*	
	Cubos em cura ambiente e Estrutura	×	×	...	...	<	×	< ₍₉₀₎	*	<	< ₍₉₀₎ *	
	Cubos em cura normalizada (comp. vs escl.)	> ₍₉₀₎	×	> ₍₉₀₎	> _(14,56)	> ₍₃₎	> ₍₅₆₎	>	×	×	×	
	Cubos em cura ambiente (comp. vs escl.)	<	< ₍₇₎	...	...	<	< ₍₁₄₎	< ₍₁₄₎	<	<	<	
	Cubos em cura normal. (comp.) e Estrutura (escl.)	<	> ₍₂₈₎	...	...	< ₍₅₆₎	<	<	*	<	*	
	Cubos em cura ambiente (comp.) e Estrutura (escl.)	<	×	...	...	<	<	<	*	<	*	
	Carotes (comp.) e Estrutura (escl.)	<	×	...	...	<	<	×	*	<	*	
COMPRESSÃO VS ESCL.	Cubos em cura normalizada (comp. vs escl.)	×	< ₍₇₎	< ₍₃₎	< _(3,90)	> _(3,90)	>	>	⊗	⊗	×	
	Cubos em cura ambiente (comp. vs escl.)	<	<	...	...	<	<	<	<	<	<	
	Cubos em cura normal. (comp.) e Estrutura (escl.)	<	< _(21,56)	...	...	<	< ₍₂₈₎	<	*	<	*	
	Cubos em cura ambiente (comp.) e Estrutura (escl.)	<	<	...	...	<	<	<	*	<	*	
	Carotes (comp.) e Estrutura (escl.)	<	<	...	...	<	<	<	*	<	*	

No Anexo G são apresentados todos os gráficos que comparam todos estes ensaios (resistência à compressão de provetes cúbicos e carotes e esclerometria a provetes cúbicos e à estrutura) considerando todos os factores intervenientes (tipo de cura e idade do betão). Nesses gráficos são apresentadas também curvas referentes à correcção do ensaio de carotes (resultados fornecidos pela APEB e obtidos com base na determinação da percentagem de vazios) e que de uma forma geral mostraram valores desajustados quando comparados com os restantes resultados. Nesse anexo é também apresentada a tabela de resultados de todos os ensaios (ver Tabela G.1).

De seguida é feita uma discussão desses mesmos resultados e são apresentados alguns gráficos a título de exemplo.

Resistência à compressão de provetes normalizados

Salvo uma ou outra excepção, verificou-se o aumento da resistência à compressão ao longo da idade tanto para os provetes submetidos a cura em condições normalizadas como para os submetidos a cura em condições ambientais. As excepções registadas são na sua maioria níveis de resistência que se mantêm principalmente para idades de 56 e 90 *dias*. Como visto anteriormente (subsecção 2.4.2), a partir destas idades o processo de endurecimento e, conseqüente, ganho de resistência são mais lentos. No entanto, qualquer valor registado abaixo do obtido para betão mais jovem poderá estar relacionado com deficiências no fabrico ou ensaio do determinado provete, quer por deficiente enchimento, vibração ou secagem. Há que referir que todos os provetes ensaiados apresentaram uma ruptura satisfatória (ver secção 2.3).

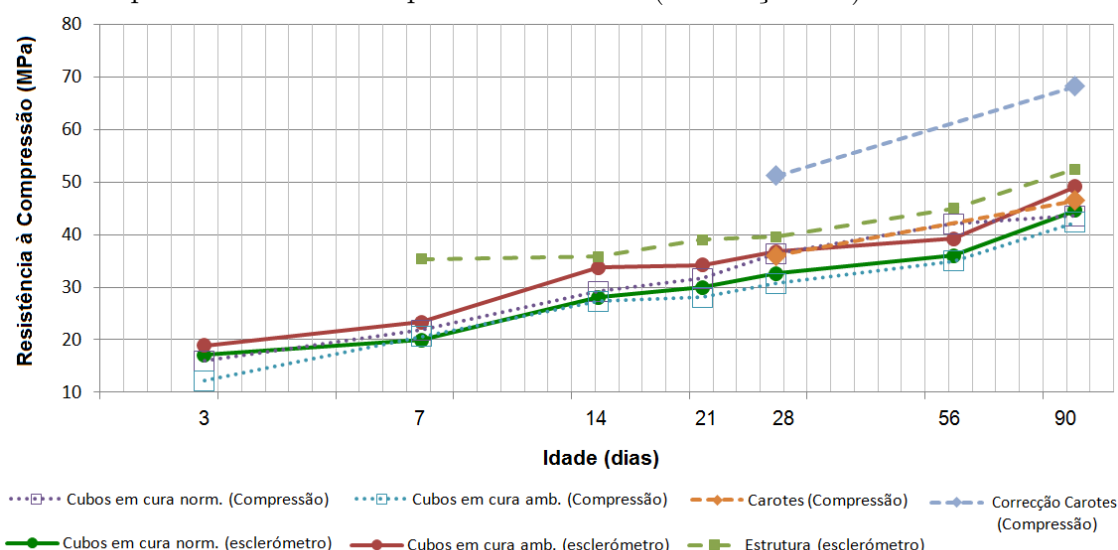


Figura 4.6: Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID43 (Pilar - C 25/30), respectivas carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro B, ao longo da idade do betão.

Comparando os ensaios de resistência à compressão em provetes submetidos às diferentes condições de cura, verifica-se que o betão curado em condições normalizadas apresenta maior nível de resistência.

Os valores obtidos para os dois tipos de cura variam entre si ao longo da idade do betão, sendo essa diferença mínima ou nula para idades de 90 *dias*, vendo-se as respectivas linhas dos gráficos a convergirem nesse ponto (ver gráfico da Figura 4.6—linhas a ponteados roxo e azul — e também a Tabela G.1).

Esclerometria em provetes normalizados

Aqui também se verificou um aumento regular do índice esclerométrico com a idade. Nestes ensaios, os provetes submetidos a cura em condições ambientais possuem maior índice esclerométrico, correspondendo a uma maior resistência após efectuada a devida conversão de valores. Esta diferença é, no entanto, mais acentuada que a do ensaio anterior, a variar entre os 2 e os 40%, como se pode ver pelas respectivas linhas (a cheio, verde e vermelha) no gráfico da Figura 4.7. Há que referir, ainda, que tais diferenças mais significativas se registaram em betões que não continham cinza volante na sua constituição. Estes ensaios variam consoante as propriedades dos constituintes do betão, sendo a substituição parcial do cimento, a correcção de granulometria do inerte fino e o retardamento do início de presa [Coutinho, 1988a, pp. 246 e 248] algumas das principais vantagens da aplicação de cinza. A referida diferença acentua-se a partir dos 21 ou 28 dias para betões sem cinza, verificando-se também alguma diferença nos outros tipos, embora para idades mais avançadas (56 ou 90 dias), podendo estar relacionado com um início de endurecimento tardio nestes últimos.

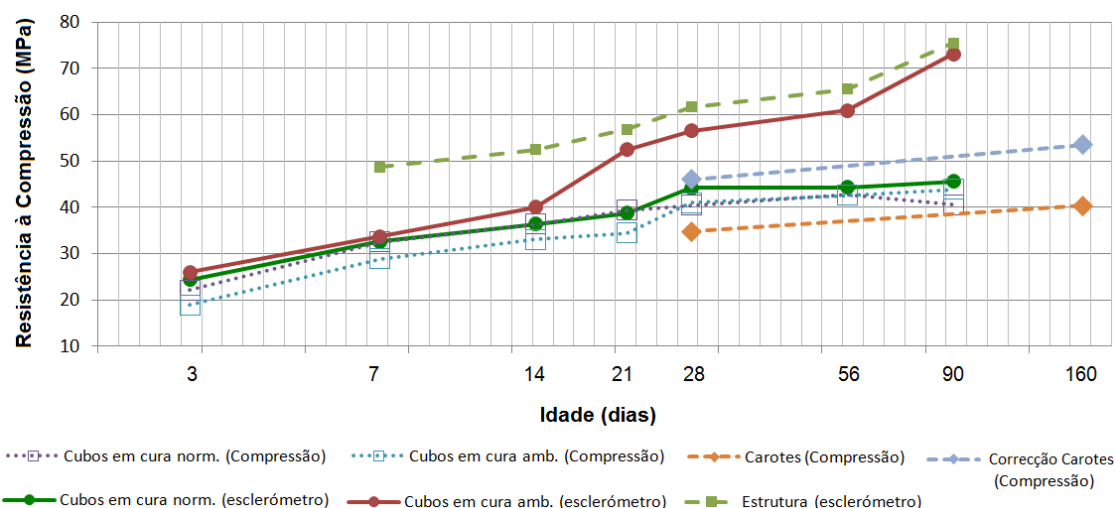


Figura 4.7: Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID47 (Lage - C 25/30 sem cinza), respectivos carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro B, ao longo da idade do betão.

Uma dureza superficial mais elevada adquirida por um betão exposto às condições ambientais, poderá estar relacionada com o diferente grau de hidratação resultante do tipo de cura a que a amostra foi submetida. Mais à frente (secção 4.2) é estudado o que acontece a nível do mecanismo de hidratação no interior e na parte superficial de amostras de pasta de cimento, de forma a tentar compreender a razão deste fenómeno.

Comparação da resistência à compressão e esclerometria em provetes

De facto, verificou-se que a dureza superficial aumentou mais em provetes submetidos a cura em condições ambientais, embora no ensaio de resistência à compressão os resultados tenham sido contrários. Ou seja, verificou-se que, ao longo da idade, o betão deixado no exterior às condições de temperatura e humidade locais apresentou uma maior dureza superficial. Ao passo que, uma maior resistência à compressão foi registada pelo betão que foi colocado no tanque de cura a uma temperatura controlada de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e aí deixado até algumas horas antes da realização do referido ensaio.

Além disso, comparando todos os valores referentes a estes dois ensaios realizados em provetes, verifica-se que para cura em condições ambientais os valores obtidos por esclerometria são geralmente mais altos que os de compressão (ver o exemplo gráfico da Figura 4.8 ou da anterior; com linha a cheio vermelha para esclerometria e linha a pontado azul para compressão). O mesmo não é tão evidente nos provetes submetidos à cura em condições normalizadas (linha a cheio verde para esclerometria e linha a pontado roxo para compressão).

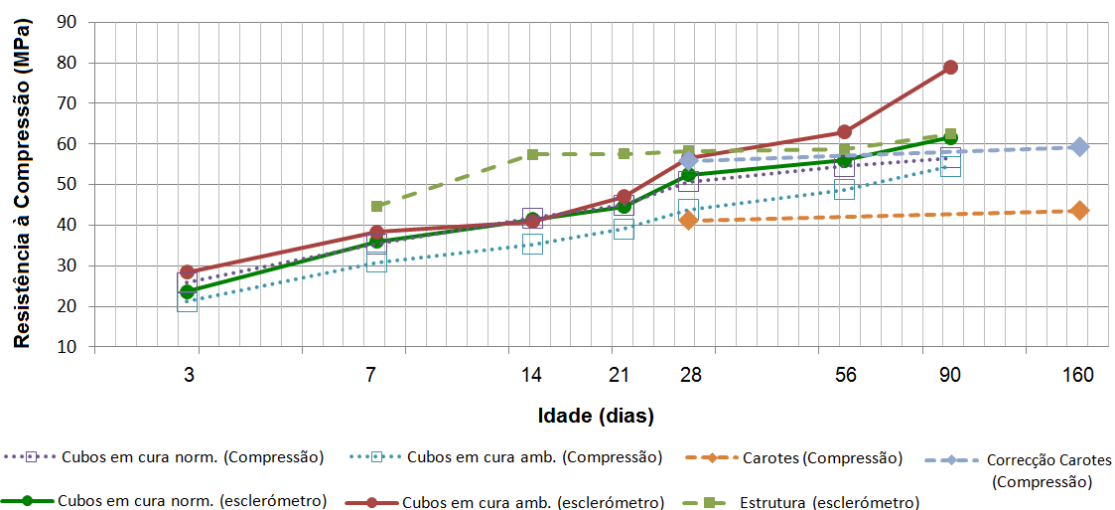


Figura 4.8: Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID46 (Lage - C 30/37), respectivas carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro B, ao longo da idade do betão.

Isto, poderá querer dizer que a resistência do betão se desenvolve mais a nível superficial que interior, quando o betão está exposto às condições ambientais. Logo, o ensaio esclerométrico poderá dar noções erradas da resistência real do betão, caso não seja feita uma devida correlação considerando a condição de cura, sendo este também considerado um factor de dependência deste ensaio assim como no de compressão (ver secção 2.3).

Comparação da esclerometria nos provetes e na estrutura

Comparando, agora, os ensaios esclerométricos efectuados nos provetes e na estrutura, verifica-se que os provetes submetidos a cura em condições ambientais apresentam valores semelhantes (embora em alguns casos com diferenças significativas) com os registados na estrutura; tal como seria de esperar visto estarem expostos às mesmas condições. Há que referir que os valores referentes ao betão da lage, obtidos na estrutura, não deverão ser considerados visto terem um erro associado por se ter utilizado o esclerómetro numa diferente posição (ver subsecção 3.2.1). Isto pode ser perfeitamente observado no gráfico da Figura 4.6, pela linha a tracejado verde identificando a estrutura, a linha a cheio vermelha para os provetes submetidos a cura em condições ambientais e a linha a cheio verde para a cura em condições normalizadas.

Comparação da resistência à compressão de provetes e de carotes e ensaio esclerométrico na estrutura

Comparando os ensaios esclerométricos efectuados na estrutura com os ensaios de compressão em provetes cúbicos e em carotes, verifica-se que a esclerometria dá sempre valores mais altos que a compressão, independentemente de serem provetes cúbicos ou carotes e do tipo de cura. Facto facilmente visível também pela Figura 4.6. E uma vez mais, aqui deverão ser excluídos os valores referentes aos ensaios da lage. É também de referir que, embora se tenha efectuado a correcção de vazios às carotes (ver subsecção 3.2.2), esses valores também são ignorados dada a não adequação dos mesmos face aos restantes resultados obtidos (como se pode ver na mesma figura, pela linha a tracejado lilás). No entanto, é de notar uma relação próxima entre os valores referentes aos ensaios de esclerometria na estrutura e de resistência à compressão de carotes (apesar dos poucos dados referentes a este último ensaio).

Comparação de esclerómetros utilizados

Embora as figuras anteriores, apresentadas como exemplo, sejam referentes a ensaios realizados com o esclerómetro B, tudo o que foi dito anteriormente é válido para ambos.

No entanto, e como já referido, obtiveram-se diferenças a nível de índices esclerométricos utilizando os dois esclerómetros, registando-se maiores índices com a utilização do esclerómetro B. Esta constatação mantém-se mesmo após a conversão destes índices em valores MPa , através das respectivas correlações, embora não seja logo perceptível nos gráficos referentes ao estudo comparativo. Por observação dos gráficos referentes ao betão colocado no pavimento da estrutura, para os quais só foram realizados ensaios de esclerometria e compressão aos provetes (submetidos apenas a cura em condições normalizadas), é perfeitamente visível essa diferença. Observando a figura seguinte, verifica-se que a linha (verde) correspondente ao ensaio esclerométrico se encontra sempre abaixo dos valores do ensaio de compressão no gráfico referente ao esclerómetro A (com a excepção dos 90 dias), e sempre acima no gráfico referente ao esclerómetro B.

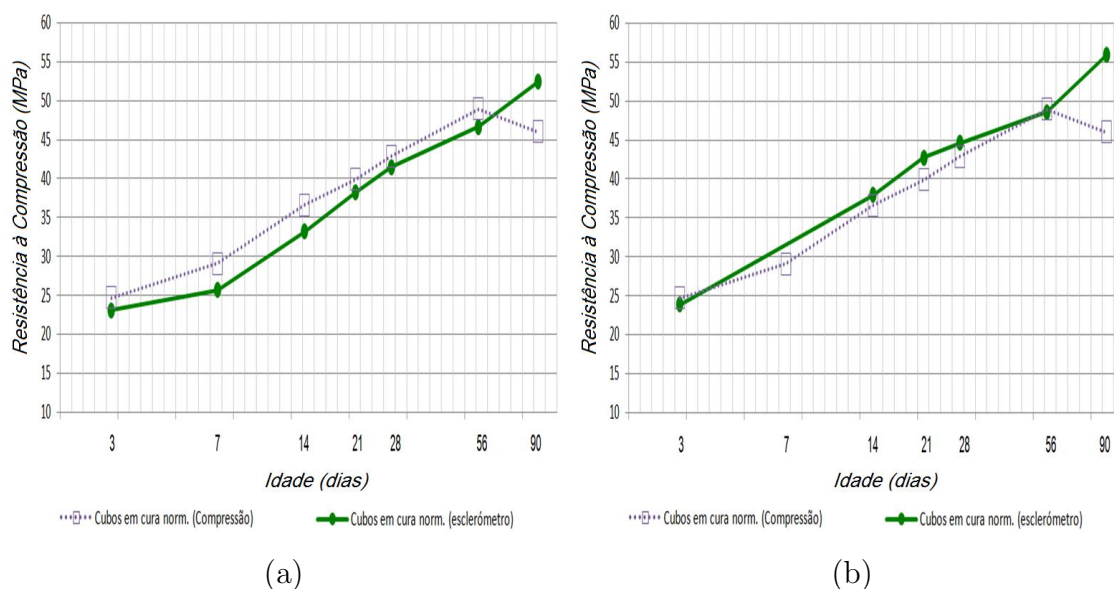


Figura 4.9: Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes ID41 (Pavimento - C 30/37) e de esclerometria, realizados ao longo da idade: (a) com o esclerómetro A; (b) com o esclerómetro B.

Isto sugere que cada esclerómetro, embora semelhante e possuindo a mesma curva de calibração (fornecida pelo fabricante), deverá possuir uma curva própria que correlacione estes valores, visto não serem iguais para ensaios realizados nas mesmas condições com diferentes aparelhos. Ou seja, a curva de correlação obtida com um esclerómetro não deverá ser utilizada noutro aparelho, mesmo que seja semelhante.

Comparação da resistência à compressão de provetes e de carotes

Por fim, comparando provetes e carotes, verifica-se que os valores de resistência à compressão obtidos em provetes submetidos a cura em condições normalizadas são,

em geral, mais parecidos com os valores obtidos nos ensaios das carotes. Há que considerar o facto de terem sido retiradas carotes nos sentidos vertical (sentido da betonagem) e horizontal (perpendicular à betonagem), representando um factor que afecta os resultados (ver Figura 2.4, Capítulo 2). Na lage apenas foram retiradas na vertical, sendo neste caso verificadas as excepções a este nível (ver secção 2.3). Isto pode ser visto pela comparação das Figuras 4.7 e 4.8 com a 4.6.

4.2 Caracterização da Pasta de Cimento

4.2.1 Caracterização Mineralógica

Como anteriormente apontado (subsecção 3.3.2), a identificação das fases minerais presentes nas amostras de pasta de cimento foi feita através da comparação dos difractogramas obtidos experimentalmente para as diversas amostras, quer em pó (Figuras 4.10a e 4.11a) quer em pedaços (Figuras 4.10b e 4.11b), com várias fichas JCPDS/ICDD.

As figuras mostram os difractogramas obtidos para cada amostra e as respectivas atribuições dos picos principais. Como se pode ver pelas mesmas figuras, só foi possível identificar quatro fases minerais, sendo elas:

- óxido de silício (quartzo, SiO_2), consistindo num dos principais componentes das pastas (como se pode ver de seguida, por fluorescência de raios-X). É identificável através de cerca de seis picos, sendo o de maior intensidade em $2\theta = 26,6^\circ$. Nas figuras encontram-se identificados com a letra “S”, respeitando a notação abreviada aplicada na química do cimento (ver Tabela 2.2, secção 2.2.1);
- algum hidróxido de cálcio (portlandite, $Ca(OH)_2$) apenas identificável nos difractogramas das amostras em pó, através de dois picos, sendo o de maior intensidade em $2\theta = 34,1^\circ$ e o segundo maior em $2\theta = 18,0^\circ$, estando identificados como “CH”. Sendo este o principal produto de hidratação identificado, não se registou no entanto grandes diferenças a nível de intensidade de pico consoante o nível de hidratação;
- uma pequena quantidade de carbonato de cálcio (calcite, $CaCO_3$) resultante da combinação de portlandite formada durante a hidratação com dióxido de carbono proveniente da atmosfera (ver equação 2.8, subsecção 2.5.5). É identificável por cerca de oito picos, sendo o de maior intensidade em $2\theta = 29,4^\circ$. Encontram-se identificados como “C $\bar{C}$ ”;
- e, possivelmente, algum sulfato de cálcio (anidrite, $CaSO_4$), identificável apenas por um pico, o de maior intensidade, identificado como “C $\bar{S}$ ” em $2\theta = 25,4^\circ$.

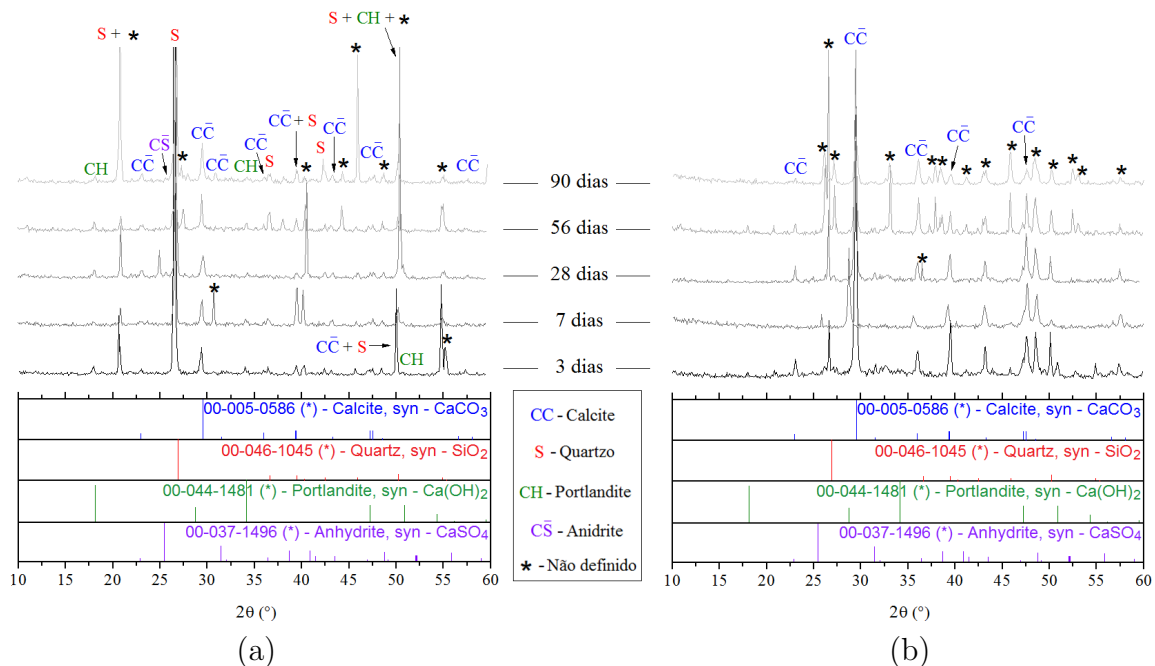


Figura 4.10: Comparação dos difractogramas obtidos para as amostras ID28 (base de dados comparativa) com diferentes graus de hidratação:(a) em pó; (b) em pedaço.

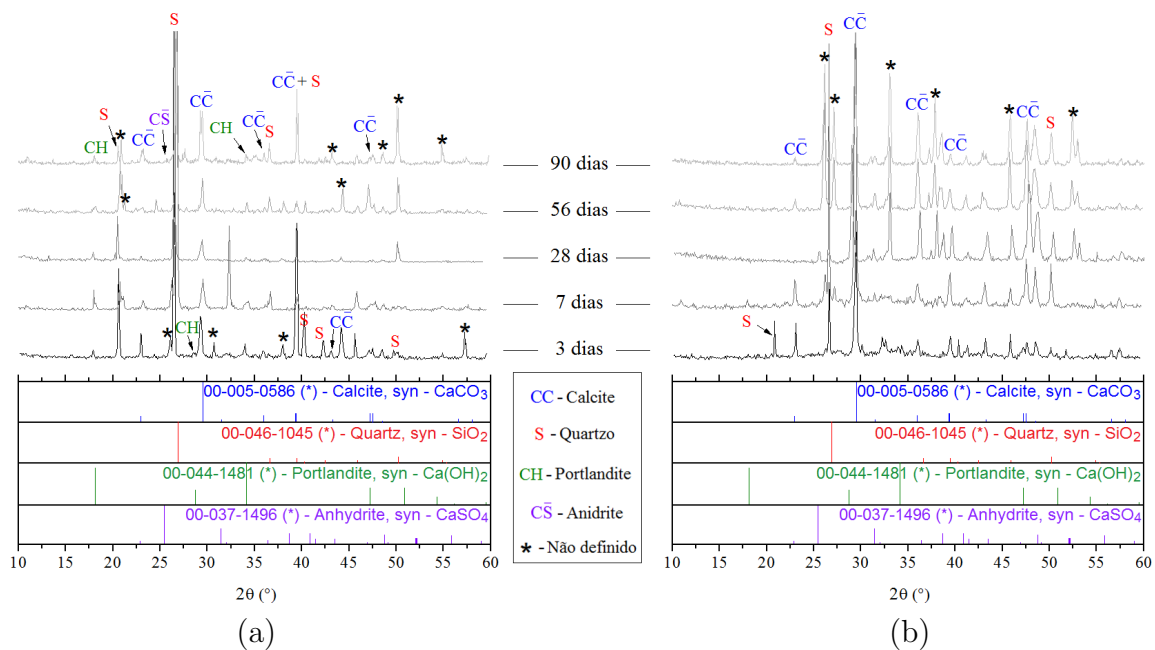


Figura 4.11: Comparação dos difractogramas obtidos para as amostras ID48 (estrutura) com diferentes graus de hidratação:(a) em pó; (b) em pedaço.

Sendo o cimento Portland constituído por vários componentes com composição química similar, uma pasta torna-se um sistema multicomponente e complexo, cujo difractograma pode apresentar sobreposição de picos difractados, dificultando a identificação de fases presentes em reduzidas quantidades.

Ao contrário de vários estudos publicados por outros autores [Trezza/Scian (2003), GiraldoM./Tobón (2006), Lopez/Cerri/de Araújo (2006), de Sousa Almeida/Sichieri (2006), Skripkiūnas et al. (2007) e Tavares (2010)], aqui não foi possível identificar fases como C-S-H e Af_m ou C_2S e C_3S por este método. No entanto, em algumas pastas, são visíveis picos (identificados com um asterisco (“*”) nos respectivos difractogramas) para os quais não foi possível identificar uma fase.

4.2.2 Caracterização Química

Nas seguintes tabelas são apresentadas as composições químicas, em termos de óxidos presentes, das principais matérias-primas (Tabela 4.2) e das amostras de pasta de cimento (Tabela 4.3).

As referidas composições foram obtidas por fluorescência de raios-X. Esta técnica de caracterização foi utilizada no sentido de complementar os dados fornecidos pela técnica anterior, dando uma noção da percentagem e tipo de óxidos presentes e disponíveis para formar determinados compostos, facilitando a identificação da formação de possíveis fases e eliminando ou menosprezando outras.

Tabela 4.2: Composição química das matérias-primas obtida por FRX.

ÓXIDOS		AMOSTRAS			
		Areia	Calcário	Cimento	Cinza
COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%) (% em peso)	<i>CaO</i>	0,4	99	70	4
	<i>SiO₂</i>	87	0,7	18	59
	<i>Al₂O₃</i>	8	0,2	4	23
	<i>Fe₂O₃</i>	0,5	—	4	9
	<i>SO₃</i>	—	—	3	0,5
	<i>K₂O</i>	3	0,01	0,5	2
	<i>Na₂O</i>	0,2	—	—	0,3
	<i>MgO</i>	0,04	0,1	0,7	0,3
	<i>Cl</i>	—	—	0,04	—
	<i>TiO₂</i>	0,2	0,03	0,3	2

Tabela 4.3: Composição química das pastas de cimento obtida por FRX.

ÓXIDOS		AMOSTRAS									
		ID28 (Base de dados)					ID48 (Estrutura)				
		3 d	7 d	28 d	56 d	90 d	3 d	7 d	28 d	56 d	90 d
COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% em peso)	CaO	42	38	38	38	38	47	43	44	43	42
	SiO_2	44	49	48	49	49	40	45	43	46	46
	Al_2O_3	5	5	6	5	5	5	5	5	4	4
	Fe_2O_3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	SO_3	2	1	1	1	1	1	1	0,8	0,8	0,9
	K_2O	1	2	2	2	2	1	1	1	1	1
	Na_2O	—	—	0,3	0,1	0,1	0,5	—	0,2	—	0,1
	MgO	0,3	0,3	0,4	0,3	0,2	0,4	0,4	0,2	0,2	0,3
	Cl	0,09	0,1	0,07	0,1	0,1	0,05	0,08	0,1	0,1	0,2
	TiO_2	0,5	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

Portanto, a análise química das amostras revelou que estas são essencialmente constituídas por óxido de cálcio (cerca de 40 a 45% de CaO) e óxido de silício (cerca de 40 a 45% de SiO_2), correspondendo os restantes 10 a 20% principalmente a óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de ferro III (Fe_2O_3), trióxido de enxofre (SO_3) e óxido de potássio (K_2O); havendo, no entanto, outras impurezas como se pode ver pela tabela acima apresentada.

4.2.3 Caracterização Térmica

Foram realizadas análises térmicas às amostras referentes à base de dados comparativa e à estrutura para as idades de 3, 7, 28, 56 e 90 dias.

De seguida são apresentadas as curvas DTA e TG (Figuras 4.12, 4.13 e 4.14) e as curvas DTG (Figuras 4.15) referentes aos ensaios realizados à pasta de cimento proveniente de betão "companheiro" do da estrutura (ou seja, proveniente duma colheita do mesmo betão que foi utilizado em obra), para as idades de 3, 28 e 90 dias. No Anexo I é apresentado, para cada amostra ensaiada, um gráfico contendo as três curvas.

Basicamente, as curvas DTA permitem a identificação de mudanças de fase como: desidratações, decomposições, dissociações, oxidações, etc. As curvas TG dão uma perspectiva da perda de massa de determinado composto dando origem a outro; e as curvas DTG servem para auxiliar o entendimento das anteriores, uma vez que dão a indicação da gama de temperatura para a qual ocorre uma perda de massa.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DA PASTA DE CIMENTO

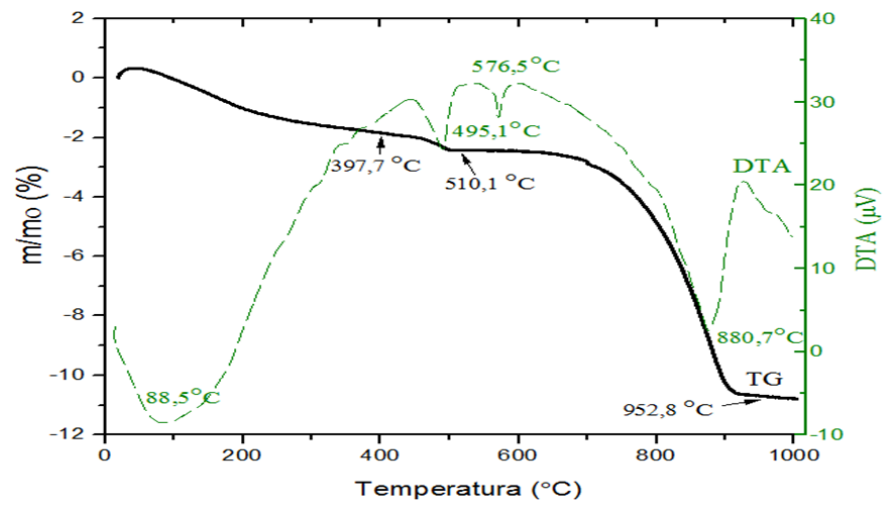


Figura 4.12: Análises DTA e TG da amostra ID48 com 3 dias de hidratação.

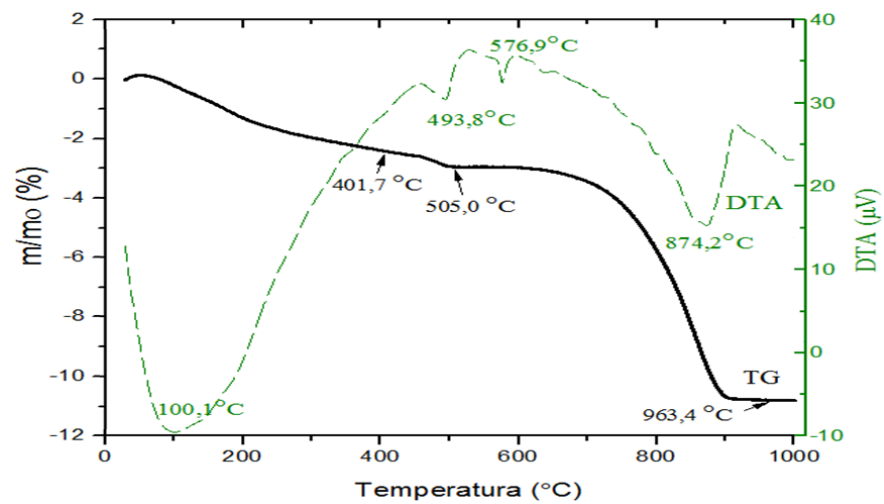


Figura 4.13: Análises DTA e TG da amostra ID48 com 28 dias de hidratação.

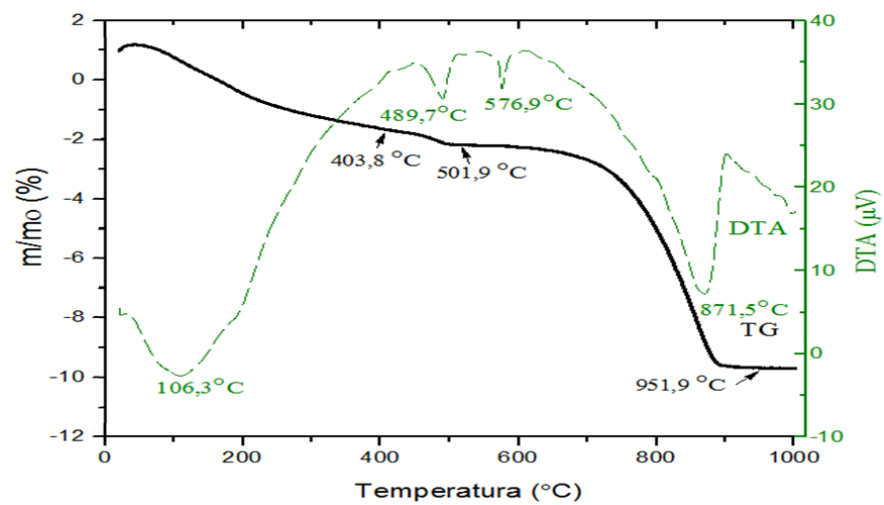
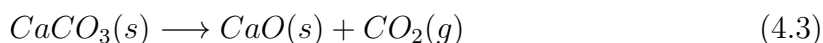


Figura 4.14: Análises DTA e TG da amostra ID48 com 90 dias de hidratação.

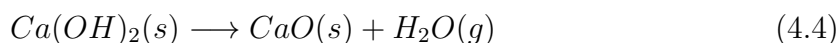
Observando os gráficos das figuras anteriores, verifica-se que o andamento das curvas DTA é semelhante para as várias amostras, havendo uma pequena alteração no primeiro pico referente à amostra ID48 (com 28 dias de hidratação), facto que poderá ser ignorado visto não se verificar o mesmo para a amostra ID28 correspondente nem para qualquer outra, podendo estar associado a um erro experimental ou de leitura do aparelho. É de referir que os ensaios efectuados às amostras ID28 (pasta de cimento correspondente à base de dados comparativa), servem para corroborar os resultados obtidos

São visíveis quatro picos descendentes, correspondendo portanto a reacções endotérmicas. O primeiro encontra-se numa faixa de temperatura de $50 - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, podendo em alguns casos ser perfeitamente visível mais de um pico neste intervalo como no caso da amostra ID28 com 28 dias de hidratação (ver Figura I.3, Anexo I). O segundo e terceiro pico são visíveis na faixa de $400 - 600\text{ }^{\circ}\text{C}$. O quarto e último é visível na faixa dos $800 - 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na Tabela 4.4 estão indicadas as temperaturas dos picos identificados em cada amostra.

Para determinar a variação de massa com o aquecimento foram traçadas as curvas TG. Estas variações de massa (perda ou ganho) são indicativos da ocorrência de determinadas reacções que ocorrem durante o aquecimento das amostras (ver secção D.2, Anexo D). Na Tabela 4.4 encontram-se as perdas de massa determinadas para cada amostra. É verificada uma maior perda de massa ($6,0 - 9,0\%$) para temperaturas entre os $800 - 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, correspondendo à libertação de dióxido de carbono pela calcite, descrita pela reacção inversa da apresentada anteriormente pela equação 2.8 (ver subsecção 2.5.5, Capítulo 2):



As outras duas variações de massa também correspondem a perdas da ordem dos ($2,0 - 3,0\%$) no caso da decomposição do *C-S-H*, da etringite e do monosulfoaluminato (a $50 - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$) e de ($0,5 - 1,0\%$) no caso da libertação de água pela portlandite (a $400 - 600\text{ }^{\circ}\text{C}$), através da equação:



Na Figura 4.15, correspondente às curvas DTG, são perfeitamente identificáveis por picos descendentes os três desníveis presentes nas curvas TG e que correspondem aos três efeitos endotérmicos encontrados.

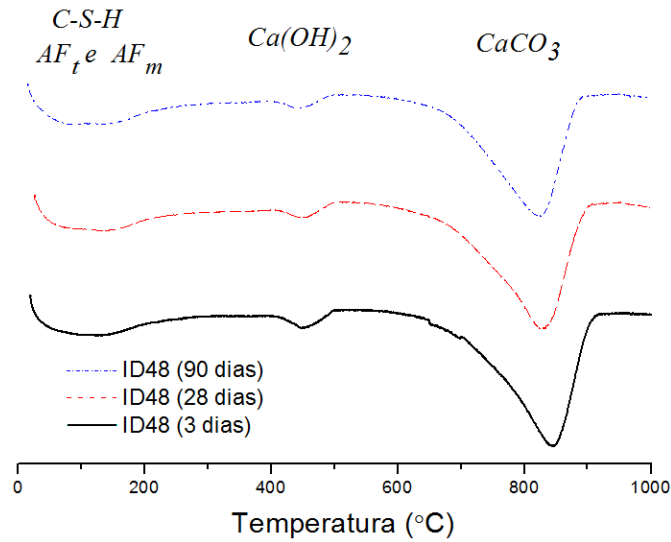


Figura 4.15: Derivada Termogravimétrica (DTG) das amostras ID48 com 3, 28 e 90 dias de hidratação.

Estes ensaios permitiram, portanto, ter uma ideia da existência de produtos como o $C-S-H$, a etringite, o monosulfoaluminato e a portlandite em todas as amostras. Facto que não foi possível com as técnicas de difracção e fluorescência de raios-X.

Foram ainda realizadas análises térmicas às matérias-primas individualmente (areia, calcário, cimento, e cinza). Os resultados são apresentados na Figuras 4.16, 4.17 e 4.18.

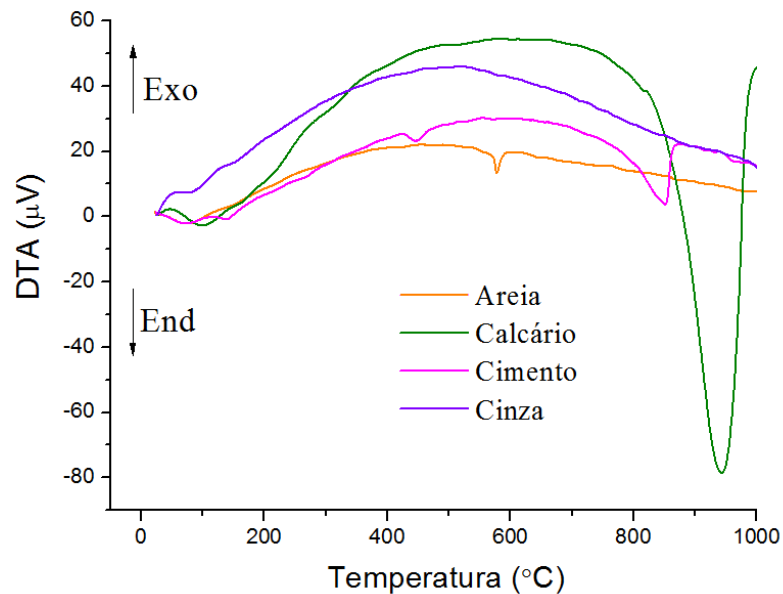


Figura 4.16: Análise Térmica Diferencial (DTA) efectuada às matérias-primas.

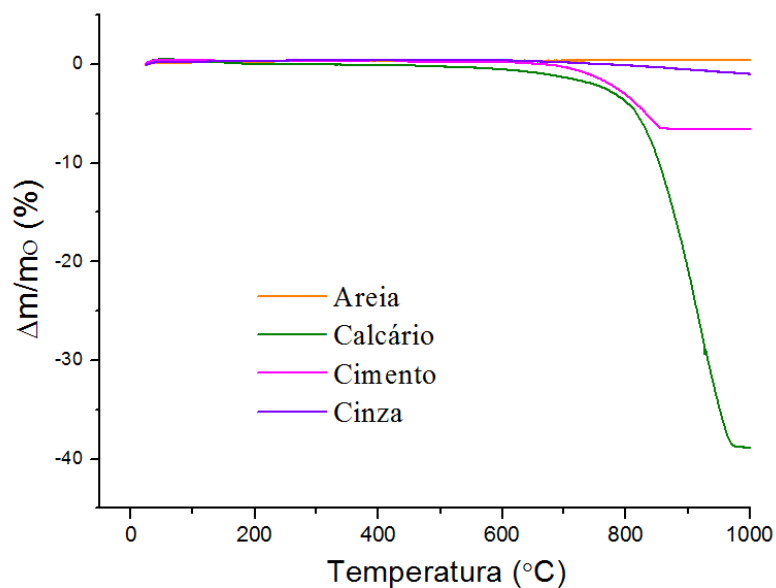


Figura 4.17: Análise Termogravimétrica (TG) efectuada às matérias-primas.

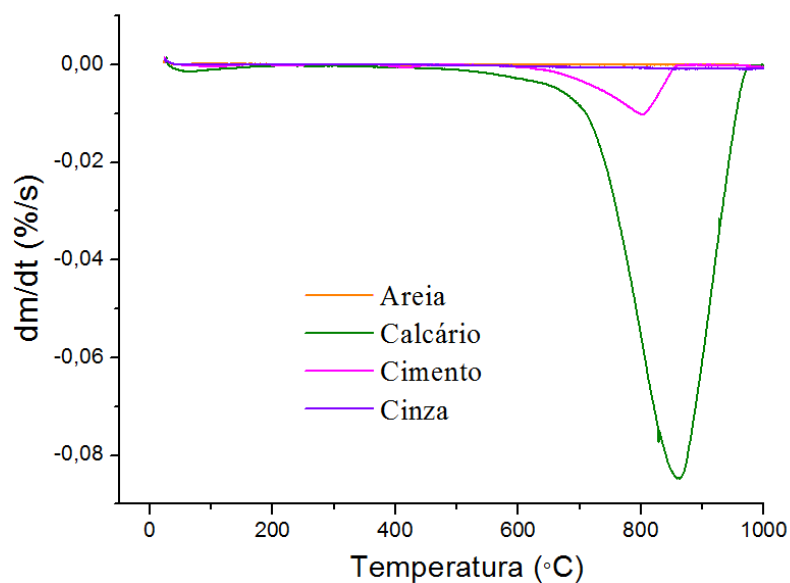


Figura 4.18: Derivada Termogravimétrica (DTG) efectuada para as matérias-primas.

Verifica-se a existência de reacção na faixa de temperatura de $800 - 1000^{\circ}\text{C}$, quer no cimento quer no calcário, evidenciando a reacção de descarbonatação da calcite. No cimento também é visível um pico na faixa dos $400 - 600^{\circ}\text{C}$, correspondendo à desidroxilação da portlandite e dois picos na faixa dos $50 - 200^{\circ}\text{C}$ correspondendo à decomposição do *C-S-H*, da etringite e do monosulfoaluminato.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DA PASTA DE CIMENTO

Tabela 4.4: Valores obtidos nas análises térmicas realizadas para as amostras referentes à estrutura (ID48).

		TEMPERATURA ($^{\circ}C$)		REACÇÃO ENDOTÉRMICA	PERDA DE MASSA (%)	
		Gama de Temperat.	Picos DTA		$\Delta m/m_o$ e $\Delta m/m_o(TOTAL)$	
			ID48	TÍPICA	ID48	
TEMPO DE HIDRATAÇÃO (dias)	3	40 – 400	89	Decomposição de $C-S-H$, AF_m e AF_t	2,0	11,0
			—			
		400 – 600	495	Desidroxilação CH	1,0	
			577	Desidrat. Quartzo		
		600 – 1000	881	Descarbonatação da calcite	8,0	
			—			
	7	40 – 400	87	Decomposição de $C-S-H$, AF_m e AF_t	2,0	11,5
			—			
		400 – 600	492	Desidroxilação CH	0,5	
			577	Desidrat. Quartzo		
		600 – 1000	881	Descarbonatação da calcite	9,0	
			—			
	28	40 – 400	—	Decomposição de $C-S-H$, AF_m e AF_t	2,5	11,0
			100			
		400 – 600	494	Desidroxilação CH	0,5	
			577	Desidrat. Quartzo		
		600 – 1000	874	Descarbonatação da calcite	8,0	
			—			
	56	40 – 400	99	Decomposição de $C-S-H$, AF_m e AF_t	3,0	11,5
			—			
		400 – 600	491	Desidroxilação CH	0,5	
			575	Desidrat. Quartzo		
		600 – 1000	872	Descarbonatação da calcite	8,0	
			—			
90	40 – 400	—	Decomposição de $C-S-H$, AF_m e AF_t	3,0	11,0	
		106				
	400 – 600	490	Desidroxilação CH	0,5		
		577	Desidrat. Quartzo			
	600 – 1000	872	Descarbonatação da calcite	7,5		
		—				

4.2.4 Caracterização Morfológica

Para estudar a morfologia da pasta de cimento, as amostras ID28 (base de dados comparativa) e ID48 (estrutura), com tempos de hidratação de 3, 28 e 90 dias, foram observadas e analisadas utilizando o sistema SEM-EDX (ver Anexo E). De seguida são apresentadas as imagens SE obtidas com identificação dos vários produtos de hidratação. No Anexo J são apresentadas as imagens BE e respectiva análise EDX.

Com 3 dias de hidratação (Figura 4.19), é identificada a presença de *C-S-H*, etringite (AF_t), monosulfoaluminato (AF_m) e calcite.

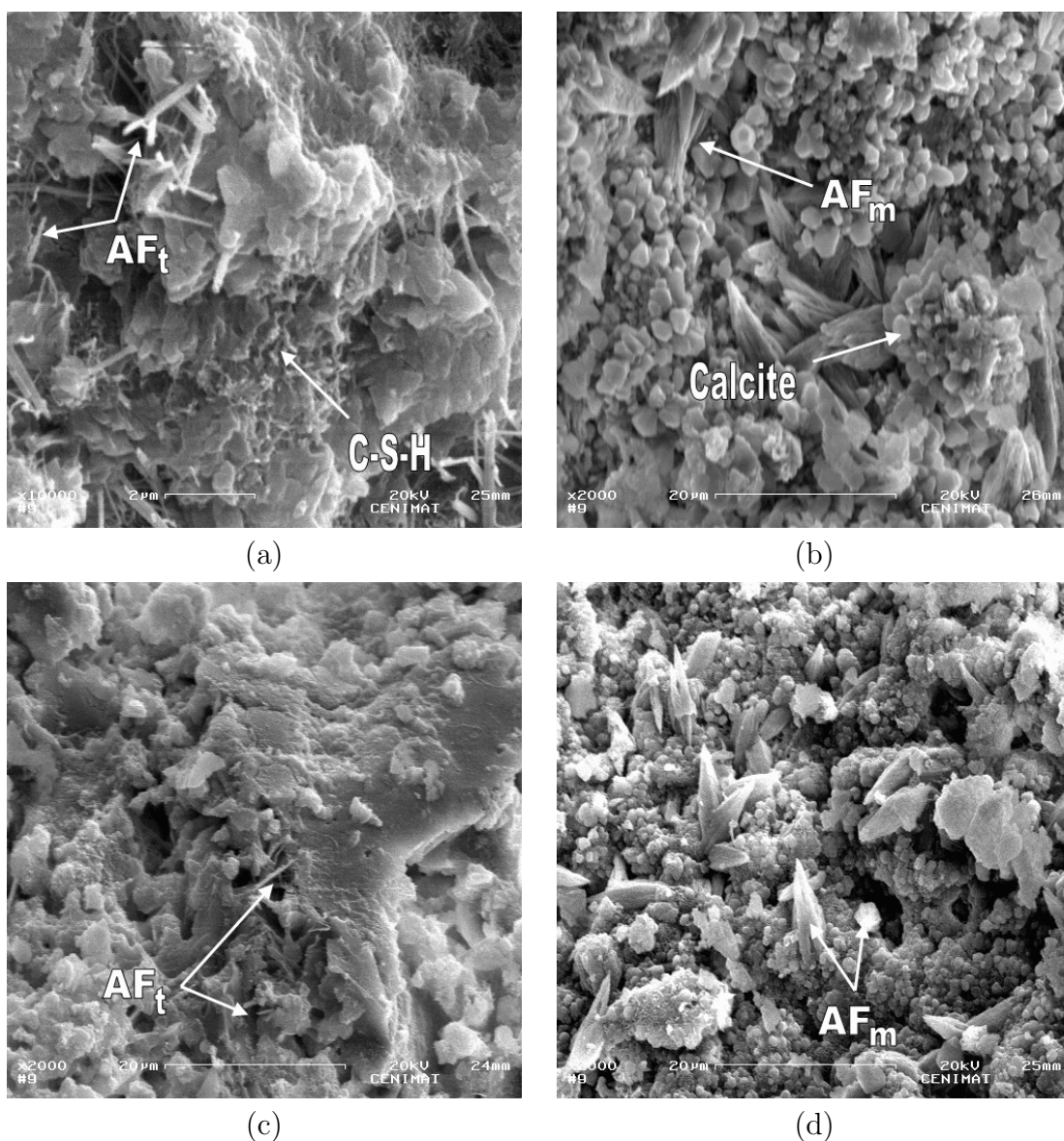


Figura 4.19: Micrografias da pasta de cimento com 3 dias de hidratação: (a) parte interior da amostra ID28; (b) parte exterior da amostra ID28; (c) parte interior da amostra ID48; (d) parte exterior da amostra ID48.

Na Figura 4.20, referente às amostras com 28 dias de hidratação, é perfeitamente identificável a presença de agulhas de etringite (Figura 4.20a), grãos hexagonais de portlandite (CH - Figuras 4.20a e 4.20c), gel C-S-H com uma morfologia em espinhas ou escamas (Figuras 4.20b e 4.20c) e finas placas de monosulfoaluminato (Figura 4.20d) formando rosetas irregulares [Mindess/Young/Darwin, p. 66] como resultado da reacção entre o C_3A e a AF_t .

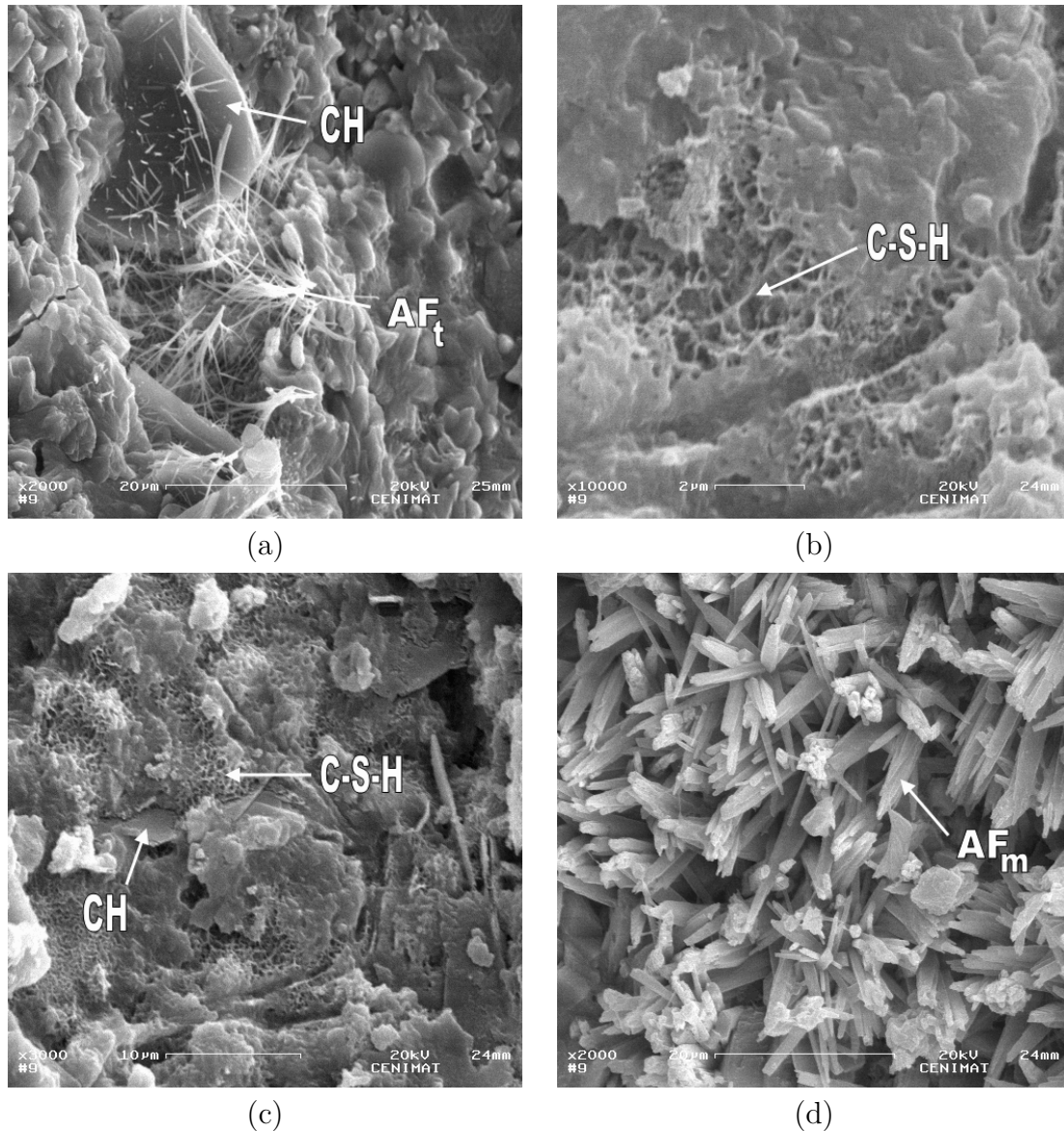


Figura 4.20: Micrografias da pasta de cimento com 28 dias de hidratação: (a) parte interior da amostra ID28; (b) parte interior da amostra ID48; (c) parte interior da amostra ID48 (estrutura); (d) parte exterior da amostra ID48.

Nas amostras com 90 dias de hidratação, é visível a presença de grãos de cinza em forma de pequenas esferas (Figuras 4.21a e 4.21b), agulhas de etringite (Figura 4.21b), rosetas de finas placas de monosulfoaluminato (Figuras 4.21a, 4.21b e 4.21c) e grãos de calcite (Figuras 4.21d e 4.21c)

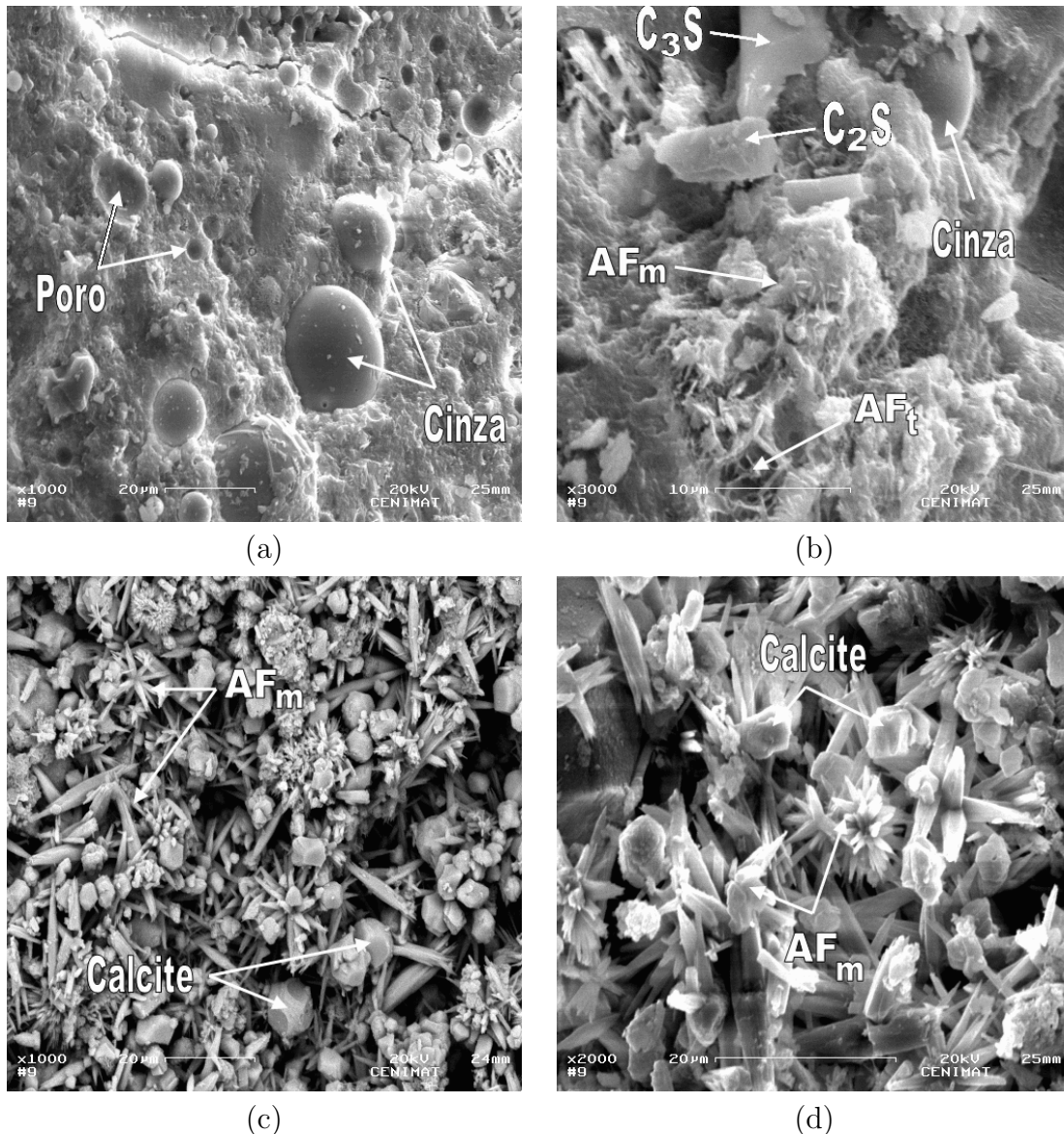


Figura 4.21: Micrografias da pasta de cimento com 90 dias de hidratação: (a) parte interior da amostra ID28; (b) parte interior da amostra ID28; (c) parte exterior da amostra ID28; (d) parte exterior da amostra ID28.

A presença de cristais de alite ou belite, correspondendo a resíduos de cimento não hidratado, indicam que a hidratação não se deu de forma completa, como o esperado.

Na parte exterior de cada amostra é perfeitamente visível, para qualquer idade, um maior crescimento dos cristais do que na parte interior, facto que será devido ao maior contacto do material com a água.

Capítulo 5

Conclusões e Perspectivas Futuras

5.1 Conclusões

É de grande interesse para o meio técnico e industrial, a realização de pesquisas para melhorar as actividades relativas à inspeção e avaliação de estruturas acabadas, sem que estas sejam danificadas e por processos economicamente viáveis. Por esse motivo, são realizados estudos a nível de ensaios não destrutivos "in situ", como neste caso específico: a esclerometria.

O principal objectivo do presente trabalho consistiu no estudo do ensaio esclerométrico e na forma como este produz resultados fiáveis para avaliação de determinada estrutura. Foram obtidas curvas de correlação para dois esclerómetros: $f_{c(A)} = 8,0658e^{0,0585.IE_{(A)}}$ e $f_{c(B)} = 7,3168e^{0,0538.IE_{(B)}}$, com coeficientes de correlação (R^2) de 0,8006 e de 0,7935, respectivamente. Sendo de referir, que cada esclerómetro deverá possuir uma curva de correlação/calibração própria e adaptada. Embora seja semelhante e possua a mesma curva de calibração (fornecida pelo fabricante), cada esclerómetro deverá possuir uma curva própria que correlacione os resultados com os valores de resistência à compressão, visto não serem iguais para ensaios realizados nas mesmas condições com diferentes aparelhos. Ou seja, a curva de correlação obtida com um esclerómetro não deverá ser utilizada noutro aparelho, mesmo que seja semelhante.

Tendo por base as curvas de correlação obtidas, foram analisados os vários resultados obtidos em ensaios esclerométricos efectuados na estrutura e em provetes cúbicos feitos da mesma colheita de betão. Esses resultados foram, também, comparados com valores obtidos em ensaios de resistência à compressão desses mesmos provetes cúbicos e em carotes extraídos da estrutura. Da análise conjunta de todos os resultados obtidos

e das diversas relações entre eles podem-se inferir as seguintes conclusões:

- ⇒ a resistência à compressão dos provetes cúbicos aumenta ao longo da idade, independentemente do tipo de cura a que foram submetidos;
- ⇒ a dureza superficial também aumenta ao longo da idade, ocorrendo no entanto alguns decréscimos em idades intermédias;
- ⇒ a adição de cinza influenciou o processo de endurecimento do betão e o seu comportamento face às solicitações externas a que é submetido, apresentando valores mais elevados de resistência à compressão e de dureza superficial;
- ⇒ os provetes curados em condições normalizadas apresentam maiores níveis de resistência à compressão ao longo da idade que os provetes curados em condições ambientais, no entanto apresentam menores valores de dureza superficial. Logo, estes ensaios são afectados pelas condições de cura;
- ⇒ os provetes curados em condições ambientais apresentam maiores valores de dureza superficial, comparando com a resistência à compressão. Isto mostra que, possivelmente, a resistência do betão se desenvolve mais a nível superficial que internamente;
- ⇒ os provetes curados em condições ambientais apresentam valores de dureza superficial mais parecidos com os obtidos para a estrutura, talvez por esta também não ter sido alvo de qualquer tipo de cura (água, membrana, etc.) encontrando-se apenas sujeita às condições ambientais;
- ⇒ independentemente de serem provetes cúbicos ou carotes e do tipo de cura, o ensaio esclerométrico dá sempre valores mais altos que o ensaio de resistência à compressão. Ao comparar os resultados de dureza superficial obtidos na estrutura com os resultados dos ensaios de resistência à compressão de carotes, isso foi verificado embora não sendo tão evidente como no caso dos provetes cúbicos;
- ⇒ o ensaio esclerométrico poderá dar noções erradas da resistência real do betão, caso não seja feita uma devida correlação considerando a condição de cura.

Desta forma, isto mostra que o ensaio de esclerometria é um ensaio válido para a caracterização do betão *in situ*, fornecendo valores que, após uma conversão adequada, são representativos da resistência à compressão do mesmo.

O presente trabalho incidiu também no estudo da evolução da microestrutura do material, durante o processo de hidratação. Com vista à identificação das fases presentes, este estudo incluiu a identificação e análise de parâmetros como: temperaturas de início e final das reacções provenientes da hidratação e morfologia apresentada pelo material. Como resultado das análises térmicas, foi verificado que a degradação do material ocorreu em três etapas:

- ⇒ na primeira compreendida entre $40 - 400^{\circ}\text{C}$, correspondendo à decomposição das fases *C-S-H*, etringite e monosulfoaluminato, registou-se uma pequena perda de massa na ordem dos $2,0 - 3,0\%$, sendo maior a perda para idades mais avançadas.
- ⇒ a segunda encontra-se compreendida entre $400 - 600^{\circ}\text{C}$, está relacionada com a degradação térmica da portlandite, correspondendo uma perda de massa na ordem dos $0,5 - 1,0\%$, verificando-se uma diminuição ao longo da idade.
- ⇒ a terceira, e última, compreendida entre $600 - 1000^{\circ}\text{C}$, corresponde à descarbonatação da calcite e foi onde se registou uma maior perda de massa, na ordem dos $6,0 - 9,0\%$, sendo variável ao longo da idade.

Pela análise morfológica das várias amostras, verificou-se que ocorreu um maior crescimento de cristais na parte exterior do material, ou seja a que está em contacto directo com a água (no caso da cura em condições normalizadas). Isto revela um maior desenvolvimento microestrutural a nível superficial, que poderá estar relacionado com a obtenção de uma maior resistência superficial face ao interior.

5.2 Perspectivas Futuras

A esclerometria é um ensaio largamente utilizado, embora não haja grande clarificação quanto aos resultados obtidos e à fiabilidade dos mesmos. Daí, ser alvo de vários estudos e tema central deste trabalho, cujos resultados mostraram que de uma forma genérica a aplicação do método pode ser considerada fiável.

Foram encontradas algumas limitações na realização deste estudo, tais como a informação proveniente dos ensaios de resistência à compressão das carotes se mostrar insuficiente na caracterização do betão da estrutura, uma vez que foram obtidas em número reduzido, devido ao facto da sua extracção poder provocar instabilidade da mesma; e a complexidade dos diversos resultados obtidos.

No interesse e possibilidade de continuação do presente estudo experimental, são sugeridas algumas linhas para pesquisas e realização de futuros trabalhos:

- ensaios de compressão a prismas de pasta de cimento de forma a ter mais um ponto de comparação de resultados;
- extracção de carotes de um bloco de dimensão razoável do mesmo betão de que é feita a estrutura ou extracção de testemunhos de pequeno diâmetro com o intuito de possibilitar a obtenção de um maior número de testemunhos sem colocar em causa a segurança da estrutura, embora possam existir problemas de fiabilidade de resultados face ao diâmetro escolhido (pois a relação entre a máxima dimensão do agregado do betão e o diâmetro da carote influencia significativamente a resistência medida quando aquela relação é maior do que cerca de 1 : 3 [NP EN 12504-1:2009]);
- observar, a nível interior e exterior, a morfologia de provetes de betão submetido a diferentes tipos de cura com vista à justificação da obtenção de uma dureza superficial mais elevada quando comparada com a resistência à compressão obtida em provetes submetidos a cura em condições ambientais;
- observar por microescopia electrónica a microestrutura da ITZ;
- efectuar o estudo da cinética de reacções térmicas.

Bibliografia

Alarcon-Ruiz, Lucia et al. – *The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste*. Cement and Concrete Research, 35 2005, pp. 609–613

Alizadeh, Rouhollah – *Cement Lab - Cement and Art*. <URL: <http://www.cementlab.com/cement-art.htm>> – Visitado em Agosto de 2010

Ariyaprayoon, Jeerawat; **Leela-Adisorn**, Uraiwan; **Supsakulchai**, Anchali – *Crystal Habit of CaCO₃ Under Different Carbonation Methods*. Journal of Metals, Materials and Minerals, Vol.19 N.2, 2009, pp. 67–72

Armange, L. C. et al. – *Utilização de Areia de Fundação Residual para uso em Argamassa*. Revista Matéria, v. 10, n. 1, 2005, pp. 51–62

Ashraf, M. et al. – *Physico-chemical, morphological and thermal analysis for the combined pozzolanic activities of minerals additives*. Construction and Building Materials, 3, 2009, pp. 2207–2213

Bentz, Dale P. – *Three-Dimensional Computer Simulation of Portland Cement Hydration and Microstructure Development*. J.Am.Ceram. Soc. 80 [1] 1997, pp. 3–21

Brouwers, H.J.H. – *The work of Powers and Brownyard revisited: Part 2*. Cement and Concrete Research, N.35, 2005, pp. 1922–1936

Brozovsky, Jiri – *Analysis of Compressive Strengths of Concrete Determined by Different Types of Sclerometers*. Article No.3, Intersections/Intersecții, Vol.6, No.3, (ISSN 1582-3024), 2009

Castro, A. L. De/**Pandolfelli**, V. C. – *Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil*. Cerâmica 55, 2009, pp. 18–32

Castro, Elisângela de – *Estudo da resistência à compressão do concreto por meio de testemunhos de pequeno diâmetro e esclerometria*. Dissertação de Mestrado em

Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 2009

Cizer, O. et al. – *Blended lime-cement mortars for conservation purposes: Microstructure and strength development*. Structural Analysis of Historic Construction – D’Ayala & Fodde (eds), Taylor & Francis Group, London, 2008a, pp.965–972

—— *Crystal morphology of precipitated calcite crystals from accelerated carbonation of lime binders*. Proc. ACEME08, 2nd International Conference on Accelerated Carbonation for Environmental and Materials Engineering, Rome, Italy, 1-3 October, 2008b, pp.149–158

ConcreteDecor – *Fly Ash, Concrete Admixtures. Concrete Decor Archives*. <URL: http://www.concretedecor.net/All_Access/601/CD601-Fly_Ash.cfm> – Visitado em Maio de 2011

Coutinho, A. De Sousa – *Fabrico e Propriedades do Betão*. Volume I. 2^a edição. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1988a

—— *Fabrico e Propriedades do Betão*. Volume II. 2^a edição. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1988b

Coutinho, Joana Sousa – *Hidratação e Microestrutura (Aula 5), FEUP, Dep. Eng. Civil (cadeira: Materiais de Construção 2)*. 2003 <URL: <http://civil.fe.up.pt/pub/apoio/ano3/mc2/Aulas/Aula5.pdf>> – Visitado em Agosto de 2010

Cunha, Maria Lucelinda – *Acetatos da disciplina de Fisica Química de Processos, Departamento de Ciências dos Materiais, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa*, 2002

Diamond, Sidney – *The microstructure of cement paste and concrete – a visual primer*. Cement & Concrete Composites, 26 2004, pp.919–933

Dweck, J.; **Pinto**, Carolina A.; **Büchler**, P. M. – *Study of a brazilian catalyst as cement aggregate by thermal and mechanical analysis*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, vol. 92, n. 1 2008, pp.121–127

Ecole Central Paris, LMSSMat – *Etude des phénomènes de dégradation des monuments anciens. Matériaux et techniques de réhabilitation*. <URL: <http://www.mssmat.ecp.fr/Axe-de-recherche,1529>> – Visitado em Agosto de 2010

Evangelista, Ana C. J. – *Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Brasil, 2002

GiraldoM., Manuel Alejandro/**Tobón**, Jorge Iván – *Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación*. Dyna rev.fac.nac.minas, vol.73, no.148 Medellín Jan./Apr. 2006

Gonçalves, Jardel Pereira; **Filho**, Romildo Dias Toledo; **Fairbairn**, Eduardo De Moraes Rego – *Estudo da hidratação de pastas de cimento Portland contendo resíduo cerâmico por meio de análise térmica*. Ambiente Construído, Porto Alegre, vol. 6, n. 4 2006, pp. 83–94

Granato, José Eduardo – *Patologia na Impermeabilização*. EMPEK - Impermeabilização. <URL: <http://www.empek.com.br/artigo2.htm>> – Visitado em Maio de 2011

Hewlett, Peter C. – *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. 4th ed., Oxford: Butterworth Heinemannl, 1998

Ionashiro, M. – *Giolito: Fundamentos da Termogravimetria e Análise Térmica Diferencial e Calorimetria Exploratória Diferencial*. Giz Editorial: São Paulo, 2005. ISBN85–8843–413–X

ISU, Iowa State University – *Cement Hydration: The Basics*. National Concrete Pavement Technology Center. Center for Transportation Research and Education. 2007 <URL: http://www.cptechcenter.org/publications/imcp/tech_summaries/4a\%20Hydration\%20Basics.pdf> – Visitado em Agosto de 2010

— *Hard core: The secret inner life of concrete*. GO! - exploring the world of transportation. 2008 <URL: <http://www.go-explore-trans.org/2008/apr-may/concrete-basics.cfm>> – Visitado em Agosto de 2010

Júlio, E. N .B. S.; **Fernandes**, P. A.; **Veludo**, J. P. – *Observação de estruturas de betão de elevados desempenhos através de ensaios “in situ” não-destrutivos*. 2004 <URL: http://www.estg.ipleiria.pt/files/346361_BE2004-00_4429571617271.pdf> – Visitado em Agosto de 2010

Jordan Valley, AR Inc. – *LearnXRF.com*. <URL: <http://www.learnxrf.com/index.htm>> – Visitado em Agosto de 2010

KütahyaÇimento – *Pulverized Fly Ash. Kütahya Cement Industry*. <URL: <http://www.kutahyacimento.com/en/pulverized-fly-ash>> – Visitado em Maio de 2011

Lopez, Rafael Holdorf; **Cerri**, José Alberto; **Araújo**, Márcia Silva de – *Análise da evolução das fases presentes na pasta de cimento portland com adição de cinza de xisto*. 17^oCBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 15 a 19 de Novembro 2006

Machado, Maurício Domellas – *Curvas de correlação para caracterizar concretos usados no Rio de Janeiro por meio de ensaios não destrutivos*. Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Brasil, 2005

Microlab, Laboratório de Microscopia – *Microscópio Eletrônico de Varredura*. Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil <URL: <http://www.degeo.ufop.br/laboratorios/microlab/mev.htm>> – Visitado em Agosto de 2010

Middendorf, B. et al. – *Investigative methods for the characterisation of historic mortars - Part 1: Mineralogical characterisation*. Materials and Structures, 38, October, 2005, pp. 761–769

Mindess, Sidney; **Young**, J.Francis; **Darwin**, David – *Concrete*. 2nd edition. Prentice Hall. Pearson Education, Inc. - Upper Saddle River, New Jersey, 2003. ISBN: 0-13-064632-6

NP EN 12350-1:2009 – *Ensaaios do betão fresco. Parte 1: Amostragem*. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal

NP EN 12350-2:2009 – *Ensaaios do betão fresco. Parte 2: Ensaio de abaixamento*. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal

NP EN 12390-2:2009 – *Ensaaios do betão endurecido. Parte 2: Execução e cura de provetes para ensaios de resistência mecânica*. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal

NP EN 12390-3:2009 – *Ensaaios do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio*. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal

NP EN 12504-1:2009 – *Ensaaios do betão nas estruturas. Parte 1: Carotes. Extração, exame e ensaio à compressão*. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal

NP EN 12504-2:2003 – *Ensaaios do betão nas estruturas. Parte 2: Ensaio não destrutivo. Determinação do índice esclerométrico*. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal

NP EN 12620:2004 – *Agregados para Betão*. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal

NP EN 206-1:2007 – *Betão. Parte1: Especificação, desempenho, produção e conformidade*. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal

NP EN 933-1:2000 – *Ensaaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica, Método de Peneiração*. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal

NP EN 956:1973 – *Agregados para Argamassas e Betões. Determinação dos Teores em água Total e água Superficial*. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal

Odelson, Joshua B.; **Kerr**, Elizabeth A.; **Vichit-Vadakan**, Wilasa – *Young's modulus of cement paste at elevated temperatures*. Cement and Concrete Research, 37 2007, pp. 258–263

Omega Physics, XRF Laboratory – *Elemental analysis using the XRF technique*. http://omega.physics.uoi.gr/xrf/english/the_xrf_technique.htm – Visitado em Agosto de 2010

Palomino, Angel – *Engineered Soils Research Group. Department of Civil and Environmental Engineering. Pennsylvania State University*. <http://www.engr.psu.edu/ce/divisions/geo/palomino/index.htm> – Visitado em Maio de 2011

Pang, H./**Balendran**, R.V. – *The Proposed Dotted-Edge Model of Interfacial Transition Zone in Concrete*. Department of Building and Construction, City University of Hong Kong <http://www.sgs.cityu.edu.hk/download/studentwork/bc-phw.pdf> – Visitado em Agosto de 2010

Pires, Kironi Oliveira – *Investigação do potencial reativo álcali-agregado residual - Um estudo de caso*. Dissertação de Mestrado em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2009

Polito, Giulliano – *Avaliação da introdução de cal hidratada nas argamassas aplicadas sobre blocos cerâmicos e sua influência no desempenho e morfologia*. Dissertação de

Mestrado em Construção Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2008

Skripkiūnas, G. et al. – *Peculiarities of hydration of cement paste with addition of hydrosodalite*. Materials Science-Poland, vol. 25, n. 3 2007, pp. 627–635

Smith, William F. – *Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais*. 2^a edição. McGraw-Hill, tradução e revisão técnica: Maria Emília Rosa, Manuel Amaral Fortes, Luís Guerra-Rosa, Maria de Fátima Vaz, Portugal, 1998. ISBN: 972-8298-68-4

Sousa Almeida, Alessandra Etuko Feuzicana de/**Sichieri**, Eduvaldo Paulo – *Thermogravimetric Analyses and Mineralogical Study of Polymer Modified Mortar with Silica Fume*. Materials Research, vol. 9, n. 3 2006, pp. 321–326

Souza, Vlândia Cristina Gonçalves; **Sampaio**, Carlos Hoffmann; **Tavares**, Luis Marcelo Marques – *Estudo da influência da microestrutura do clínquer sobre a moagem na fabricação de cimento: microscopia eletrônica de varredura*. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 55(3), 2002, pp. 209–213

Stepkowska, Ewa T. et al. – *Gradual Transformation of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ into CaCO_3 on Cement Hydration. XRD Study*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, vol. 8, 1 2007, pp. 189–198

Sun, Zhihui; **Garboczi**, Edward. J.; **Shah**, Surendra P. – *Modeling the elastic properties of concrete composites: Experiment, differential effective medium theory, and numerical simulation*. Cement & Concrete Composites, 29, 2007, pp. 22–38

Tavares, Andrea Macleybiane Gois – *Síntese e caracterização de pastas de cimento aditivadas com resinas epóxi - Análises cinéticas, termodinâmicas e calorimétricas*. Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristovão (SE), Brasil, 2010

The Getty, Conservation Institute – *Lime Mortars and Plasters*. 2007 <URL: <http://www.getty.edu/conservation/science/mortars/index.html>> – Visitado em Agosto de 2010

Thomaz, Eduardo C.S. – *Esclerómetro - Notas da aula*. <URL: <http://www.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/esclerometro.pdf>> – Visitado em Agosto de 2010

Trezza, Mónica Adriana/**Scian**, Alberto Néstor – *Estudio Comparativo de Clinkers Producidos con Diferentes Reemplazos de Combustibles Residuales*. Materials Research, vol. 6, n. 2 2003, pp. 295–303

UFRJ, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – *Concreto Simples. Instituto de Tecnologia. Departamento de Arquitetura e Urbanismo*. [⟨URL: http://www.ufrrj.br/institutos/it/dau/profs/edmundo/Concreto_Simples.pdf⟩](http://www.ufrrj.br/institutos/it/dau/profs/edmundo/Concreto_Simples.pdf) – Visitado em Agosto de 2010

Ukrainczyk, Neven et al. – *XRD and TGA investigation of hardened cement paste degradation*. 11th Conference on Materials, Processes, Friction and Wear, MATTRIB'06, Vela Luka, 22-24 June 2006

UNB, Civil Engineering – *Structures of Cement Paste*. [⟨URL: http://www.unb.ca/civil/thomas/documents/structuresofcementpaste.pdf⟩](http://www.unb.ca/civil/thomas/documents/structuresofcementpaste.pdf) – Visitado em Agosto de 2010

Wapedia, Mobile Encyclopedia – *Wiki: Microscópio eletrônico de varredura*. [⟨URL: http://wapedia.mobi/pt/Microsc%C3%B3pio_eletr%C3%B4nico_de_varredura⟩](http://wapedia.mobi/pt/Microsc%C3%B3pio_eletr%C3%B4nico_de_varredura) – Visitado em Agosto de 2010

Wendhausen, Paulo A. P. – *Análises Térmicas*. (Apostila), Elaborado por Guilherme V. Rodrigues e Otávio Marchetto, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina

Winter, Nicholas Bruce – *Cement Hydration. Understanding Cement. Cement science made easier*. 2010 [⟨URL: http://www.understanding-cement.com/hydration.html⟩](http://www.understanding-cement.com/hydration.html) – Visitado em Agosto de 2010

Anexos

Anexo A

Processo de Fabrico de Betão



Figura A.1: Vista da unidade industrial de Frielas com identificação dos departamentos que a constituem.

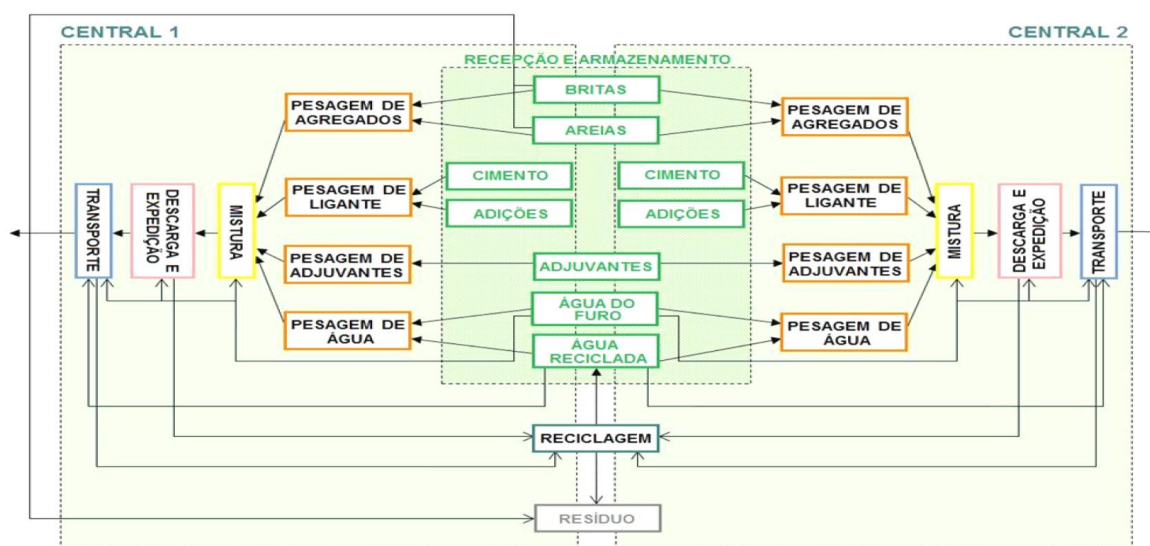


Figura A.2: Esquema representativo do funcionamento das duas centrais de Frielas.

Anexo B

Determinação do teor de humidade dos agregados

O teor de humidade dos agregados é constantemente aferido para correcção da dosagem de água a adicionar ao betão e compensação dos agregados. A humidade pode ser corrigida automaticamente através de sondas existentes na central, mas é periodicamente validada com ensaios laboratoriais. Existem vários métodos de determinar o teor de humidade dos agregados. Na Unibetão é determinado o teor de humidade das areias pelo método Speedy, enquanto que o método clássico se aplica a todos os agregados (areias e britas).

B.1 Método Clássico

A determinação da humidade é feita de acordo com a norma NP EN 956:1973 por processo de secagem do material. Os resultados são expressos em percentagem de água total referida à massa do inerte seco.

B.2 Método Speedy

Este é um processo expedito para a determinação do teor de água dos agregados, por utilização de um humidímetro de carbureto (o “Speedy”) no qual é colocado um pó absorvente à base de carbureto ou carbeto de cálcio (CaC_2), que vem acondicionado em latas.



Figura B.1: Speedy.

Anexo C

Difracção e Fluorescência de Raios-X

C.1 Difracção de Raios-X

Considerando-se dois ou mais planos atômicos da estrutura de um dado sólido cristalino, a ocorrência de difracção de raios-X vai depender da diferença de caminho percorrido pelos raios-X e o comprimento de onda da radiação incidente, através da lei de Bragg:

$$n\lambda = 2d\sin(\theta) \quad (\text{C.1})$$

onde λ corresponde ao comprimento de onda da radiação incidente, n é a ordem de difracção (número inteiro), d é a distância interplanar para o conjunto de planos cristalográficos paralelos de índices de Miller (hkl) e θ é o ângulo de incidência dos raios-X, medido entre o feixe incidente e esses planos cristalinos. Para este ângulo θ , os raios reflectidos estão em fase e reforçam-se uns aos outros, ocorrendo a chamada interferência construtiva (Smith, 1998, pp. 105 e 106).

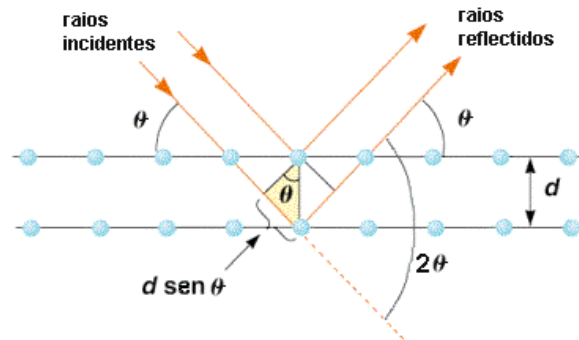


Figura C.1: Esquema exemplificativo do princípio de funcionamento do DRX.

É comum utilizar-se uma amostra em pó para que exista uma orientação aleatória dos vários cristais, assegurando que algumas dessas partículas estejam orientadas em relação ao feixe de raios-X, de modo a satisfazer as condições da lei de Bragg.

Para este estudo é utilizado um difractómetro de raios-X possuindo um contador de radiação para detectar o ângulo e a intensidade do feixe difractado. Esse contador move-se através de um goniómetro circular (medidor de ângulos) que está sincronizado com a amostra, e um registador vai representando automaticamente a intensidade do feixe difractado, numa gama de valores 2θ [Smith, 1998, p. 107].

C.2 Fluorescência de Raios-X

O seu princípio de funcionamento baseia-se no facto dos elementos químicos emitirem radiação característica quando sujeitos a excitação apropriada, provocada por uma fonte de radiação (ampola de raios-X). A intensidade das linhas espectrais emitidas por cada elemento constituinte duma amostra, ao ser submetido à radiação proveniente da ampola, dá uma medida da sua concentração na amostra, visto que cada elemento emite linhas espectrais com diferentes comprimentos de onda [Pires, 2009, p. 63].

Como a intensidade dos raios-X fluorescentes é proporcional à concentração de cada um desses elementos, estes podem ser quantificados.

O equipamento a ser utilizado é dotado de um sistema de analisador com cristais monocromadores, cujo princípio de funcionamento é a difracção de raios-X, aplicando novamente a lei de Bragg (equação C.1).

Anexo D

Análises Térmicas

As seguintes análises são essencialmente métodos empíricos, dependentes de inúmeros parâmetros experimentais relacionados com o equipamento utilizado (exemplos: razão de aquecimento e atmosfera do forno, geometria do suporte de amostras, natureza dos termopares e material de referência utilizado) e com determinadas características da amostra (tamanho de partículas, quantidade, natureza e compactação), pelo que as curvas obtidas para amostra de um mesmo material em diferentes aparelhos podem apresentar diferenças significativas [Ionashiro, 2005, pp. 15 e 58].

D.1 Análise Térmica Diferencial

Ao longo de um programa de aquecimento, a temperatura da amostra e da referência mantêm-se iguais até que ocorra alguma alteração física ou química na amostra em estudo. Essas alterações são visíveis através de um gráfico denominado *curva DTA*, a qual é registada tendo a temperatura ou o tempo como abcissa e a diferença de temperatura entre amostra e referência como ordenada. Esta diferença de temperaturas é dada em microvolts (μV) devido ao uso de termopares como sensores de temperatura. Se a reação for exotérmica (ou seja, com libertação de energia), a amostra irá libertar calor, ficando por um curto período de tempo, com uma temperatura superior à da referência. Esta alteração é visível na curva DTA através de um pico no sentido ascendente. Do mesmo modo, se a reação for endotérmica (ou seja, com consumo de energia) a temperatura da amostra será temporariamente menor que a da referência, sendo visível um pico no sentido descendente [Wendhausen, p. 19].

Através desta técnica é então possível acompanhar os efeitos do calor associados por exemplo a: transições de fase (fusão, ebulição, sublimação, congelação, inversões de estruturas cristalinas) ou reacções de desidratação, de dissociação, de decomposição e

de óxido-redução. Geralmente as transições de fase, desidratações e certas reacções de decomposição produzem efeitos endotérmicos, enquanto que cristalizações e oxidações produzem efeitos exotérmicos [Ionashiro, 2005, p. 44].

D.2 Termogravimetria

Neste método é obtido um gráfico denominado *curva TG*, onde a abcissa é a temperatura ou o tempo de aquecimento e a ordenada é a massa da amostra em percentagem, em vez da massa total, facilitando assim a comparação entre várias curvas numa base normalizada [Wendhausen, p.9]. Os desníveis em relação ao eixo das ordenadas, encontrados nestas curvas, correspondem às variações de massa sofridas pela amostra (perda por remoção de substâncias adsorvidas, libertação de grupos hidróxidos ou de substâncias voláteis devido a reacções de decomposição por efeito da temperatura ou ganho atribuído a um processo de oxidação), permitindo obter dados que podem ser utilizados com finalidades quantitativas [Ionashiro, 2005, p. 25].

Efectuando a primeira derivada da curva TG em função do tempo obtém-se a chamada derivada termogravimétrica (DTG). Uma curva DTG também pode ser traçada em função da temperatura ou do tempo de aquecimento. Nesta curva os degraus ou desníveis observáveis na curva TG são substituídos por picos que delimitam áreas proporcionais às alterações de massa sofridas pela amostra [Ionashiro, 2005, p. 25]. Através das temperaturas inicial e final desses picos é, então, possível fazer uma estimativa da respectiva perda de massa [de Sousa Almeida/Sichieri, 2006].

Anexo E

Microscopia Electrónica de Varrimento

O princípio de funcionamento do microscópio electrónico de varrimento baseia-se na emissão de feixes de electrões por um filamento capilar de tungstênio (eléctrodo negativo), mediante a aplicação de uma diferença de potencial que pode variar de 0,5 a 30 kV, permitindo a variação da aceleração dos electrões e o consequente aquecimento do filamento. A parte positiva em relação ao filamento do microscópio (eléctrodo positivo) atrai fortemente os electrões gerados, resultando numa aceleração em direcção ao eléctrodo positivo. A correção do percurso dos feixes é realizada pelas lentes condensadoras que alinham os feixes em direcção à abertura da objectiva, a qual ajusta o foco dos feixes de electrões antes destes atingirem a amostra analisada [Microlab].

O EDX é um acessório essencial na caracterização microscópica de materiais. O princípio de funcionamento do sistema SEM-EDX baseia-se no facto de que quando o feixe de electrões incide sobre um mineral, os electrões mais externos dos átomos e os iões constituintes são excitados, mudando de níveis energéticos. Ao voltarem à sua posição inicial, libertam a energia adquirida a qual é emitida em comprimento de onda no espectro de raios-X. O detector (instalado na câmara de vácuo do microscópio) mede essa energia. Como os electrões de um determinado átomo possuem energias distintas, é possível, no ponto de incidência do feixe, determinar quais os elementos químicos presentes num dado ponto ou zona da amostra, de uma forma rápida [Microlab]. Ou seja, com o sistema SEM-EDX é possível determinar a composição química pontual das fases minerais que compõem o material em estudo, consistindo numa ferramenta indispensável na caracterização e distribuição espacial de elementos químicos.

Enquanto o SEM proporciona imagens nítidas (embora virtuais, pois o que se vê no monitor do computador é a transcodificação da energia emitida pelas partículas, e

não a radiação emitida pela luz, ao qual estamos habitualmente acostumados), o EDX permite uma identificação imediata dos elementos presentes. Além da identificação mineral, o equipamento ainda permite o mapeamento da distribuição de elementos químicos por minerais, gerando mapas composicionais de elementos desejados [Micro-lab].

As amostras devem ser cobertas por uma camada ultrafina de material electricamente condutor (geralmente, ouro) que serve para prevenir a acumulação de campos eléctrico-estáticos na amostra (não condutora) devido à irradiação eléctrica durante a produção da imagem e, também, para obtenção de um maior contraste [Wapedia].

Anexo F

Calibração dos Esclerómetros

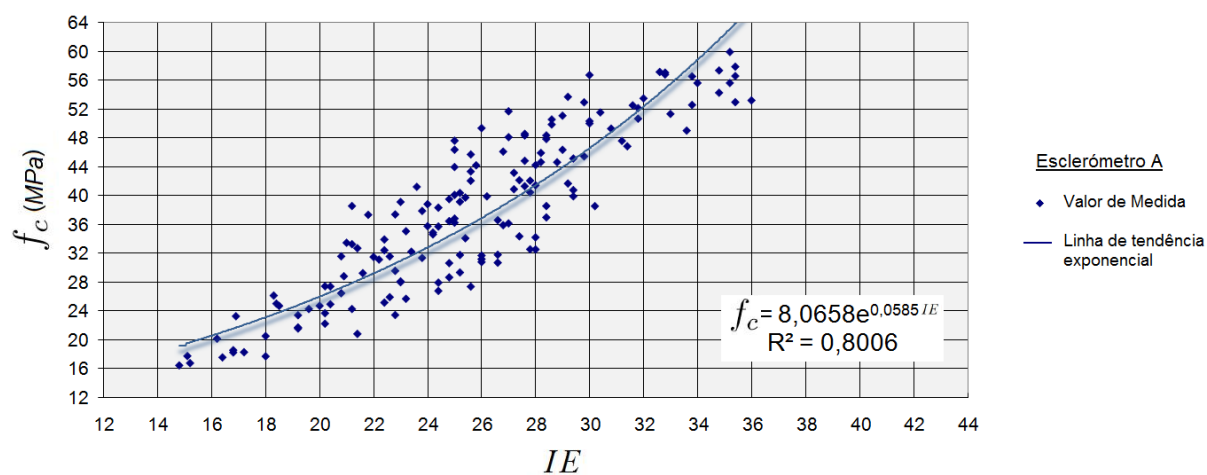


Figura F.1: Curva de calibração esclerométrica referente ao esclerómetro A.

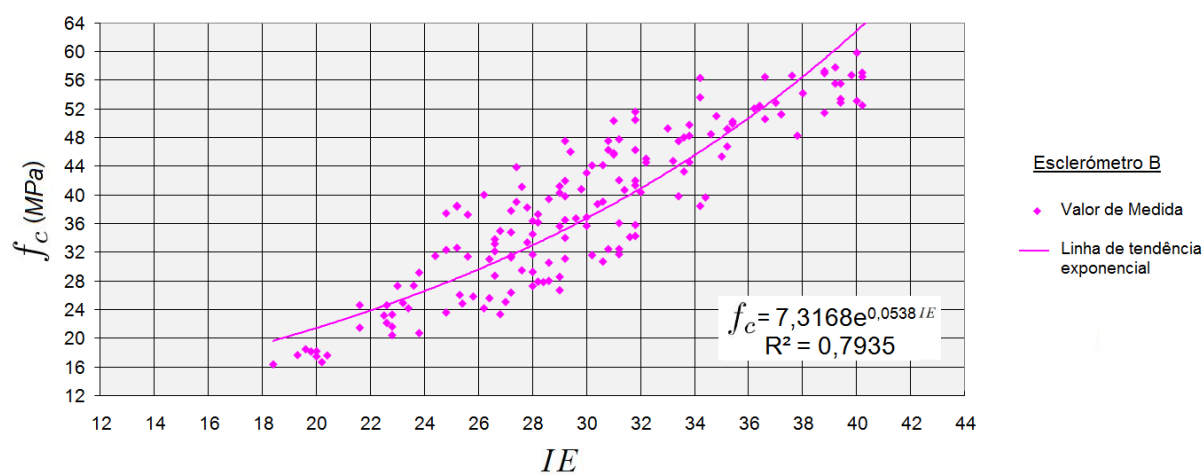


Figura F.2: Curva de calibração esclerométrica referente ao esclerómetro B.

ANEXO F. CALIBRAÇÃO DOS ESCLERÓMETROS

Tabela F.1: Resultados dos ensaios referentes à base de dados comparativa (amostras ID1 a ID4).

Amostra	Classe de Resist.	Idade	R. Comp. (Mpa)		Índice Esclerométrico													
			Ensaio	Média	Esclerómetro A							Esclerómetro B						
Nº					1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média
ID1	1	C25/30	3	19,6	19,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	2			19,6		—	—	—	—	—		—	—	—	—	—		
	3		7	27,0	27,0	—	—	—	—	—	25	—	—	—	—	—	—	—
	4		28	40,6	39,7	24	25	28	24	25		—	—	—	—	—	—	—
	5			38,8		24	24	26	26	28		38	34	30	36	34	34	34
	—		—	—	—	—	—	—	—	—		—	—	—	—	—	—	—
	—		—	—	—	—	—	—	—	—		—	—	—	—	—	—	—
	—		—	—	—	—	—	—	—	—		—	—	—	—	—	—	—
	—		—	—	—	—	—	—	—	—		—	—	—	—	—	—	—
	—		—	—	—	—	—	—	—	—		—	—	—	—	—	—	—
Nº	Classe	Idade	Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média
ID2	1	C30/37	3	22,1	22,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	2			22,3		—	—	—	—	—		—	—	—	—	—		
	3		7	34,6	34,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	4			34,4		—	—	—	—	—		—	—	—	—	—		
	5		28	47,0	41,6	32	32	24	30	35	31	41	40	38	37	38	39	38
	6			36,2		30	30	32	30	32		33	38	40	34	42	37	
	7		56	50,7	52,5	36	34	34	32	34	34	44	44	42	40	38	42	40
	8			54,3		34	36	34	32	32		42	40	38	38	36	39	
	9		90	56,7	56,8	32	32	34	32	32	34	40	42	44	40	38	41	40
	10			56,8		32	32	34	34	34		38	38	40	38	40	39	
Nº	Classe	Idade	Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média
ID3	1	C25/30	3	17,1	16,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	2			16,2		—	—	—	—	—		—	—	—	—	—		
	3		7	22,7	23,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	4			25,1		—	—	—	—	—		—	—	—	—	—		
	5		28	37,0	37,3	18	16	24	18	19	19	20	20	22	21	20	21	26
	6			37,6		22	24	24	27	26		28	32	32	33	28	31	
	7		56	44,7	46,1	26	28	24	26	28	26	28	30	28	28	28	28	29
	8			47,4		28	24	30	26	28		30	32	30	28	32	30	
	9		90	49,8	50,5	28	28	30	30	28	29	32	34	30	28	30	31	32
	10			51,3		28	30	26	28	30		32	34	36	32	30	33	
Nº	Classe	Idade	Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média
ID4	1	C25/30	3	17,3	17,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	2			17,4		—	—	—	—	—		—	—	—	—	—		
	3		7	24,7	24,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	4			23,2		—	—	—	—	—		—	—	—	—	—		
	5		28	37,6	36,9	28	30	32	30	30	30	28	30	30	30	28	29	30
	6			36,2		26	28	26	26	28		28	34	34	30	28	31	
	7		56	43,2	42,0	28	26	24	26	26	26	32	32	28	34	32	32	29
	8			40,9		24	28	24	26	24		28	28	24	26	28	27	
	9		90	44,2	43,9	24	24	26	26	22	24	28	26	32	26	28	28	27
	10			43,6		28	28	26	24	22		26	28	26	28	26	27	

ANEXO F. CALIBRAÇÃO DOS ESCLERÓMETROS

Tabela F.2: Resultados dos ensaios referentes à base de dados comparativa (amostras ID5 a ID8).

Amostra	Classe de	Idade	R. Comp.		Índice Esclerométrico													
			(Mpa)		Esclerómetro A							Esclerómetro B						
Nº	Classe		Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média
ID5	1	C25/30 sem cinza	3	17,4	17,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	2		3	17,6		—	—	—	—	—		—	—	—	—	—		
	3		7	26,5	27,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	4		7	28,5		—	—	—	—	—		—	—	—	—	—		
	5		28	37,3	36,1	24	28	26	26	28	26	27	30	32	32	34	28	31
	6		28	34,9		28	26	26	28	30	28		28	32	34	30	32	31
	7		56	36,9	36,4	24	26	24	26	24	25	25	28	26	30	30	28	28
	8		56	35,9		26	24	22	24	28	25		26	26	26	30	30	28
	9		90	36,9	36,2	22	22	28	26	24	24	25	28	28	26	28	28	28
	10		90	35,6		24	26	28	26	24	26		26	28	32	28	30	29
Nº	Classe	Idade	Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média
ID6	1	C25/30	3	20,7	20,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	2		3	19,9		—	—	—	—	—		—	—	—	—	—		
	3		7	28,0	27,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	4		7	25,9		—	—	—	—	—		—	—	—	—	—		
	5		28	36,2	35,7	20	24	24	24	24	23	24	30	30	30	32	30	30
	6		28	35,2		22	24	26	26	26	25		30	30	28	30	30	30
	7		56	39,8	39,8	26	28	26	24	26	26	26	26	30	30	30	28	29
	8		56	39,9		26	28	26	26	26	26		28	30	30	32	28	30
	9		90	47,4	47,6	24	26	24	26	24	25	25	32	34	30	28	32	31
	10		90	47,8		24	24	28	26	22	25		28	28	30	34	32	30
Nº	Classe	Idade	Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média
ID7	1	C25/30	3	12,9	13,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	2		3	13,2		—	—	—	—	—		—	—	—	—	—		
	3		7	26,3	25,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	4		7	24,9		—	—	—	—	—		—	—	—	—	—		
	5		28	31,5	32,5	32	28	28	28	26	28	28	32	34	30	30	30	31
	6		28	33,5		28	26	28	26	28	27		32	30	32	32	30	31
	7		56	43,1	43,1	26	28	26	28	26	27	27	28	30	32	30	28	30
	8		56	43,2		28	26	28	28	28	28		30	32	30	32	28	30
	9		90	46,0	46,3	22	26	22	26	24	24	25	30	28	32	30	32	30
	10		90	46,7		28	26	24	28	24	26		30	32	34	32	28	31
Nº	Classe	Idade	Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média
ID8	1	C25/30	3	16,6	16,7	16	16	14	15	14	15	15	24	20	22	18	19	21
	2		3	16,8		13	16	16	16	16	15		22	21	20	18	18	20
	3		7	26,8	26,1	19	19	20	18	21	19	18	24	24	26	28	24	25
	4		7	25,4		15	17	18	17	19	17		24	24	27	24	28	25
	5		28	38,8	40,4	26	26	28	26	28	27	28	28	30	32	32	30	30
	6		28	42,0		30	28	28	30	28	29		34	32	34	36	32	34
	7		56	47,4	47,6	26	26	24	26	24	25	25	28	30	28	30	28	29
	8		56	47,8		26	24	26	26	22	25		30	30	32	28	28	30
	9		90	53,3	51,0	30	28	28	26	30	28	29	38	38	36	34	38	37
	10		90	48,8		28	28	32	32	28	30		32	32	34	34	32	33

ANEXO F. CALIBRAÇÃO DOS ESCLERÓMETROS

Tabela F.3: Resultados dos ensaios referentes à base de dados comparativa (amostras ID9 a ID12).

Amostra	Classe de	Idade	R. Comp.		Índice Esclerométrico													
			(Mpa)		Esclerómetro A							Esclerómetro B						
Nº	Classe		Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média
ID9	1	C25/30	20,1	20,1	17	14	18	15	16	16	16	17	19	22	18	20	19	18
	2		20,2		16	16	17	18	15	16		16	15	14	16	18	16	
	3		23,3	23,4	20	18	18	18	18	18	19	22	24	22	24	24	23	23
	4		23,4		18	20	22	20	20	20		22	24	22	20	24	22	
	5		35,4	35,0	22	24	24	22	22	23	23	26	28	28	28	26	27	27
	6		34,6		22	22	24	26	24	24		26	28	24	26	28	26	
	7		41,5	42,5	22	22	20	20	18	20	22	28	24	28	26	24	26	26
	8		43,5		22	22	22	24	24	23		24	24	26	28	26	26	
	9		43,2	44,2	28	26	28	28	26	27	28	28	30	28	30	26	28	31
	10		45,2		28	30	26	30	30	29		32	34	32	34	32	33	
Nº	Classe	Idade	Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média
ID10	1	C30/37	25,7	28,8	22	22	18	20	22	21	21	28	23	26	27	27	26	27
	2		31,8		23	20	20	21	21	21		26	28	28	24	29	27	
	3		37,1	35,9	26	28	24	26	28	26	27	30	32	30	30	32	31	32
	4		34,6		28	26	28	26	28	27		32	34	32	32	34	33	
	5		48,8	49,0	34	32	32	36	32	33	34	38	40	40	38	40	39	40
	6		49,2		34	36	32	34	34	34		42	40	38	40	42	40	
	7		58,7	56,7	30	28	30	32	34	31	30	38	38	40	36	38	38	38
	8		54,7		28	30	30	28	30	29		38	36	36	38	38	37	
	9		58,4	56,5	34	36	34	36	36	35	35	40	40	42	42	40	41	40
	10		54,7		34	36	38	36	34	36		38	40	38	42	40	40	
Nº	Classe	Idade	Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média
ID11	1	C25/30	25,9	24,7	19	18	19	18	18	18	19	23	20	21	25	21	22	23
	2		23,5		16	22	18	17	20	19		16	24	25	24	27	23	
	3		30,3	30,6	26	24	26	24	26	25	25	30	28	28	28	30	29	29
	4		30,9		22	24	26	26	24	24		28	30	28	28	28	28	
	5		41,2	42,1	30	30	26	28	26	28	27	32	34	32	30	30	32	31
	6		42,9		26	26	26	28	28	27		30	32	34	28	30	31	
	7		50,0	48,5	26	28	26	26	26	26	27	—	—	—	—	—	—	—
	8		47,1		26	28	26	28	26	27		—	—	—	—	—	—	
	9		42,9	47,5	30	30	32	32	30	31	31	34	32	30	32	32	32	33
	10		52,2		30	32	34	32	30	32		36	34	36	34	34	35	
Nº	Classe	Idade	Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média
ID12	1	C30/37	29,0	27,9	26	25	24	25	24	25	24	29	30	26	29	28	28	28
	2		26,8		24	25	23	24	24	24		27	27	29	30	29	28	
	3		34,6	34,2	30	28	30	28	28	29	28	32	34	32	34	32	33	32
	4		33,8		28	28	26	26	28	27		32	30	30	30	30	30	
	5		50,3	49,3	30	30	28	32	28	30	31	34	36	32	32	34	34	35
	6		48,2		32	34	30	34	30	32		36	36	36	38	38	37	
	7		53,1	54,1	28	30	30	28	28	29	28	—	—	—	—	—	—	—
	8		55,1		30	28	26	26	26	27		—	—	—	—	—	—	
	9		60,6	57,8	34	36	34	36	36	35	35	38	40	38	40	38	39	39
	10		55,0		36	34	34	38	36	36		38	40	42	38	40	40	

ANEXO F. CALIBRAÇÃO DOS ESCLERÓMETROS

Tabela F.4: Resultados dos ensaios referentes à base de dados comparativa (amostras ID13 a ID16).

Amostra	Classe de	Idade	R. Comp.		Índice Esclerométrico													
			(Mpa)		Esclerómetro A							Esclerómetro B						
Nº	Classe		Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média
ID13	C30/37	3	23,4	23,2	16	18	14	14	16	16	17	22	24	26	23	22	23	23
			23,1		19	19	17	18	18	18		20	20	24	22	22	22	
		7	32,8	31,7	28	24	24	24	24	25	25	30	28	26	28	26	28	28
			30,7		26	26	28	24	24	26		28	28	28	30	28	28	
		28	44,1	44,6	28	28	30	30	28	29	28	34	34	36	36	34	35	34
			45,1		26	28	28	28	28	28		30	34	32	34	34	33	
		56	51,5	51,6	22	24	26	28	26	25	26	28	30	28	28	28	28	28
			51,6		28	26	26	26	24	26		28	26	28	28	24	27	
		90	49,0	52,9	34	34	38	36	34	35	35	40	42	38	38	40	40	39
			56,8		38	36	34	36	34	36		38	40	38	42	38	39	
Nº	Classe	Idade	Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média
ID14	C25/30	3	17,5	17,7	15	15	14	16	14	15	15	19	18	19	17	21	19	19
			17,9		16	16	16	15	14	15		18	20	18	21	22	20	
		7	23,6	23,7	24	24	22	22	24	23	20	26	26	24	24	26	25	25
			23,7		18	20	16	16	16	17		26	24	24	24	24	24	
		28	36,2	36,8	24	26	26	26	26	26	25	30	30	28	28	30	29	30
			37,4		24	24	24	26	24	24		30	30	30	30	30	30	
		56	41,7	42,1	22	20	18	16	18	19	20	22	22	24	26	24	24	24
			42,6		22	20	22	24	20	22		26	24	26	26	24	25	
		90	45,1	45,9	28	26	30	32	28	29	28	32	34	32	32	32	32	31
			46,7		28	28	26	30	26	28		28	30	30	32	28	30	
Nº	Classe	Idade	Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média
ID15	C30/37	3	21,4	22,2	18	20	22	18	20	20	20	20	22	18	24	24	22	23
			23,0		22	20	22	20	20	21		24	24	24	24	22	24	
		7	30,9	31,3	24	24	22	24	24	24	24	26	26	28	28	26	27	27
			31,7		24	24	24	24	24	24		28	26	28	28	28	28	
		28	44,6	44,8	30	30	28	28	28	29	28	38	36	34	32	32	34	33
			45,0		28	24	24	28	28	26		34	30	32	34	30	32	
		56	50,2	50,4	22	20	24	22	22	22	23	30	32	34	32	32	32	31
			50,6		24	22	24	24	24	24		28	30	32	30	30	30	
		90	54,8	50,6	30	32	34	32	30	32	32	36	34	36	40	36	36	37
			46,4		32	34	32	30	32	32		36	34	38	40	36	37	
Nº	Classe	Idade	Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média
ID16	C25/30	3	18,5	18,2	18	16	18	16	18	17	17	20	20	20	20	20	20	20
			18,0		18	18	16	18	16	17		18	22	20	20	20	20	
		7	25,6	25,9	22	22	22	22	22	22	23	26	26	28	26	24	26	26
			26,1		22	24	22	24	24	23		26	28	24	26	24	26	
		28	38,5	38,8	26	24	24	24	22	24	24	34	32	32	32	30	32	30
			39,0		24	24	22	26	24	24		28	28	30	30	28	29	
		56	44,4	44,8	20	22	22	20	22	21	21	24	26	28	26	28	26	26
			45,1		20	22	22	22	20	21		26	28	28	26	24	26	
		90	48,6	48,3	26	28	28	26	26	27	28	28	30	34	34	30	31	34
			48,0		26	28	30	30	28	28		36	34	38	38	36	36	

ANEXO F. CALIBRAÇÃO DOS ESCLERÓMETROS

Tabela F.5: Resultados dos ensaios referentes à base de dados comparativa (amostras ID17 a ID20).

Amostra		Classe de	Idade	R. Comp. (Mpa)		Índice Esclerométrico													
Nº		Classe		Ensaio	Média	Esclerómetro A						Esclerómetro B							
						1	2	3	4	5	1ªMédia	2ªMédia	1	2	3	4	5	1ªMédia	2ªMédia
ID17	1	C25/30	3	15,9	16,4	14	14	14	12	12	13	15	20	20	18	16	16	18	18
	2			16,9		16	16	18	16	16	16		20	18	20	18	18	19	
	3		7	21,0	21,7	18	18	18	18	20	18	19	22	22	22	20	20	21	23
	4			22,4		22	18	20	20	20	20		24	26	24	24	24	24	
	5		28	36,1	33,2	22	20	24	22	22	22	21	26	30	26	26	28	27	27
	6			30,4		20	22	22	18	20	20		24	24	26	28	28	26	
	7		56	37,3	38,5	22	20	20	18	20	20	21	24	24	22	26	26	24	25
	8			39,7		22	24	22	22	22	22		26	26	28	24	26	26	
	9		90	44,8	44,2	26	26	26	24	26	26	26	28	30	30	28	30	29	30
	10			43,5		26	24	26	28	26	26		28	32	34	32	30	31	
Nº		Classe	Idade	Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ªMédia	2ªMédia	1	2	3	4	5	1ªMédia	2ªMédia
ID18	1	C30/37	3	25,1	24,9	20	20	20	18	18	19	20	26	26	24	26	24	25	25
	2			24,7		22	22	22	20	22	22		28	24	26	26	24	26	
	3		7	31,4	31,2	24	24	30	28	26	26	26	30	30	30	28	28	29	29
	4			31,0		26	24	26	26	26	26		30	28	28	30	30	29	
	5		28	48,1	45,4	30	30	28	30	32	30	30	36	34	36	32	34	34	35
	6			42,8		28	30	28	32	30	30		36	38	34	34	36	36	
	7		56	53,5	51,6	24	24	28	24	28	26	27	30	32	28	30	30	30	32
	8			49,8		28	28	28	30	28	28		34	34	34	32	34	34	
	9		90	55,0	54,2	32	34	34	38	32	34	35	36	38	38	40	38	38	38
	10			53,4		36	38	34	36	34	36		38	40	38	36	38	38	
Nº		Classe	Idade	Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ªMédia	2ªMédia	1	2	3	4	5	1ªMédia	2ªMédia
ID19	1	C25/30	3	24,2	24,7	22	22	22	24	22	22	20	24	24	24	26	24	24	22
	2			25,1		18	16	20	18	16	18		18	20	18	18	20	19	
	3		7	27,6	27,4	18	22	20	20	18	20	20	20	22	20	20	20	20	23
	4			27,1		22	22	20	22	20	21		28	26	24	26	24	26	
	5		28	38,5	39,1	24	26	22	24	22	24	23	28	28	30	28	26	28	27
	6			39,6		22	22	24	22	22	22		30	28	26	26	24	27	
	7		56	44,5	45,7	24	26	26	26	24	25	26	30	32	30	30	32	31	31
	8			46,9		26	26	24	28	26	26		30	30	32	34	30	31	
	9		90	43,8	46,3	28	30	32	28	30	30	29	32	32	32	34	34	33	32
	10			48,8		28	30	28	28	28	28		28	32	32	30	32	31	
Nº		Classe	Idade	Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ªMédia	2ªMédia	1	2	3	4	5	1ªMédia	2ªMédia
ID20	1	C25/30	3	17,4	17,7	18	18	16	18	18	18	18	22	20	22	22	20	21	20
	2			17,9		18	16	20	18	20	18		20	18	18	22	20	20	
	3		7	21,2	21,5	18	18	20	18	20	19	19	22	22	20	22	20	21	22
	4			21,9		18	18	22	20	20	20		20	22	24	22	22	22	
	5		28	34,9	33,9	22	20	22	24	22	22	22	28	26	24	26	26	26	27
	6			32,8		22	22	24	22	24	23		28	28	26	26	28	27	
	7		56	37,9	37,8	22	24	24	22	24	23	24	26	26	28	26	28	27	27
	8			37,8		26	24	26	22	24	24		26	26	28	28	30	28	
	9		90	41,6	42,0	28	28	26	30	28	28	28	32	34	32	32	32	32	32
	10			42,5		26	28	26	30	28	28		30	30	32	32	32	31	

ANEXO F. CALIBRAÇÃO DOS ESCLERÓMETROS

Tabela F.6: Resultados dos ensaios referentes à base de dados comparativa (amostras ID21 a ID24).

Amostra	Classe de	Idade	R. Comp.		Índice Esclerométrico													
			(Mpa)		Esclerómetro A							Esclerómetro B						
Nº	Classe		Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média
ID21	C30/37	1	24,3	24,2	22	24	22	24	22	23	21	28	24	26	24	26	26	26
		2	24,1		22	20	20	18	18	20		28	28	26	28	24	27	
		3	28,1	28,6	24	24	24	24	24	24	25	30	28	30	28	28	29	29
		4	29,1		26	26	26	26	24	26		30	28	30	28	30	29	
		5	42,4	39,9	32	32	30	32	28	31	29	34	36	36	32	32	34	33
		6	37,3		28	28	30	26	28	28		30	34	36	32	32	33	
		7	50,4	49,8	30	28	26	30	28	28	29	30	32	34	36	34	33	34
		8	49,2		28	26	30	30	30	29		34	34	36	34	34	34	
		9	51,0	50,3	26	28	28	32	30	29	30	32	34	36	34	32	34	35
		10	49,6		32	32	30	32	30	31		36	36	38	38	38	37	
Nº	Classe	Idade	Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média
ID22	C30/37	1	26,2	27,3	26	24	26	28	26	26	26	28	30	28	28	28	28	28
		2	28,5		24	26	24	26	26	25		30	26	28	28	26	28	
		3	33,7	34,3	28	28	26	30	30	28	27	36	30	32	30	34	32	32
		4	34,9		30	26	24	26	26	26		30	32	30	32	32	31	
		5	49,2	48,5	28	26	30	32	28	29	28	36	36	36	36	36	36	35
		6	47,8		26	24	24	28	30	26		32	32	34	34	34	33	
		7	56,7	56,4	30	24	26	26	30	27	27	34	34	32	36	30	33	34
		8	56,0		26	26	24	30	26	26		34	34	36	38	34	35	
		9	56,1	57,0	32	34	32	30	34	32	33	36	38	38	40	38	38	39
		10	58,0		32	34	34	34	32	33		38	40	40	42	38	40	
Nº	Classe	Idade	Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média
ID23	C25/30	1	18,4	18,5	16	18	14	16	18	16	17	22	22	20	20	22	21	20
		2	18,7		18	16	18	18	16	17		18	18	18	18	18	18	
		3	25,7	25,1	24	22	22	22	20	22	22	28	28	24	24	26	26	27
		4	24,5		22	24	24	22	22	23		30	28	30	26	26	28	
		5	33,2	31,5	20	18	22	20	22	20	22	24	26	28	22	24	25	26
		6	29,7		22	24	24	22	26	24		28	28	26	26	24	26	
		7	35,7	32,7	22	20	22	24	24	22	21	26	24	24	26	28	26	25
		8	29,6		22	20	22	18	20	20		26	28	24	22	24	25	
		9	35,1	34,8	24	24	26	26	26	25	24	28	28	28	26	28	28	27
		10	34,5		24	24	22	22	24	23		26	26	28	28	26	27	
Nº	Classe	Idade	Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média
ID24	C25/30	1	17,6	17,5	16	14	14	14	14	14	16	20	22	18	18	18	19	20
		2	17,5		18	18	18	18	20	18		20	18	22	22	22	21	
		3	27,3	26,7	24	24	24	24	26	24	24	28	28	30	30	30	29	29
		4	26,2		24	24	24	24	26	24		28	28	30	28	30	29	
		5	31,2	31,5	22	20	22	18	20	20	21	24	28	26	24	24	25	24
		6	31,9		18	20	22	24	22	21		22	24	24	24	24	24	
		7	34,2	33,4	20	20	18	24	20	20	21	26	28	30	28	30	28	28
		8	32,7		20	24	24	20	20	22		26	28	30	26	26	27	
		9	34,1	34,6	22	24	26	26	24	24	24	26	28	28	30	26	28	28
		10	35,1		22	24	26	24	24	24		26	28	30	28	30	28	

ANEXO F. CALIBRAÇÃO DOS ESCLERÓMETROS

Tabela F.7: Resultados dos ensaios referentes à base de dados comparativa (amostras ID25 a ID28).

Amostra	Classe de	Idade	R. Comp.		Índice Esclerométrico													
			(Mpa)		Esclerómetro A							Esclerómetro B						
Nº	Classe		Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média
ID25	1	C30/37	30,2	29,5	24	24	22	22	22	23	23	28	28	26	28	28	28	28
	2		28,9		22	24	22	22	24	23		26	28	26	28	30	28	
	3		32,3	31,8	30	28	26	26	28	28	27	32	32	32	30	30	31	31
	4		31,2		24	24	26	28	26	26		30	32	30	32	32	31	
	5		49,2	47,8	30	30	30	28	26	29	28	32	34	32	32	30	32	31
	6		46,4		26	28	28	30	28	28		30	30	30	32	30	30	
	7		52,1	52,9	28	30	30	32	30	30	30	36	38	36	38	34	36	37
	8		53,7		30	32	28	30	28	30		38	36	40	38	36	38	
	9		56,5	56,5	30	34	36	36	34	34	34	36	36	38	38	34	36	37
	10		56,5		32	32	34	36	34	34		34	38	38	36	38	37	
Nº	Classe	Idade	Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média
ID26	1	C30/37	27,5	27,9	26	24	22	22	24	24	23	28	28	28	28	30	28	28
	2		28,4		24	22	22	22	22	22		26	28	30	28	28	28	
	3		30,6	30,8	26	26	26	28	26	26	26	32	32	32	32	32	32	31
	4		30,9		26	28	26	24	24	26		28	30	30	28	30	29	
	5		44,8	45,1	32	30	28	30	28	30	29	34	34	30	32	30	32	32
	6		45,4		28	28	30	30	30	29		32	30	32	34	34	32	
	7		50,5	48,3	26	28	30	28	28	28	28	38	38	38	36	38	38	38
	8		46,2		28	30	28	30	28	29		38	36	38	40	38	38	
	9		50,1	52,1	32	34	32	32	32	32	32	36	38	36	38	36	37	36
	10		54,0		30	32	32	30	32	31		34	34	36	38	36	36	
Nº	Classe	Idade	Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média
ID27	1	C30/37	26,3	26,4	22	20	22	20	22	21	21	24	26	26	28	28	26	27
	2		26,5		20	20	22	20	20	20		26	28	28	28	30	28	
	3		29,8	30,7	28	28	28	26	28	28	27	34	32	34	32	32	33	32
	4		31,6		26	26	24	26	26	26		30	30	32	34	32	32	
	5		43,3	44,6	28	30	32	28	30	30	29	32	34	36	34	36	34	32
	6		45,9		28	28	26	30	28	28		32	32	30	34	22	30	
	7		51,9	51,5	28	30	32	32	30	30	30	38	40	38	36	38	38	39
	8		51,0		30	28	32	32	30	30		38	40	38	42	40	40	
	9		52,7	53,6	28	26	30	28	30	28	29	32	34	32	32	32	32	34
	10		54,6		30	30	28	32	30	30		34	36	34	38	38	36	
Nº	Classe	Idade	Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média
ID28	1	C25/30	18,5	18,2	18	16	16	18	16	17	17	20	20	20	20	18	20	20
	2		18,0		18	18	16	16	16	17		20	20	20	20	20	20	
	3		25,9	25,7	24	22	24	22	22	23	23	26	26	28	26	28	27	26
	4		25,4		22	22	24	26	24	24		26	28	22	26	28	26	
	5		39,9	39,1	26	26	24	22	26	25	25	32	32	30	28	32	31	31
	6		38,4		26	26	28	24	24	26		32	34	28	28	30	30	
	7		41,0	43,3	24	26	26	26	26	26	26	32	34	34	36	32	34	34
	8		45,6		26	24	28	26	24	26		32	34	32	34	36	34	
	9		47,1	48,1	26	26	26	28	28	27	27	32	34	32	34	34	33	34
	10		49,0		26	28	28	26	28	27		32	34	34	36	34	34	

ANEXO F. CALIBRAÇÃO DOS ESCLERÓMETROS

Tabela F.8: Resultados dos ensaios referentes à base de dados comparativa (amostras ID29 a ID32).

Amostra	Classe de	Idade	R. Comp.		Índice Esclerométrico													
			(Mpa)		Esclerómetro A							Esclerómetro B						
Nº	Classe		Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média
ID29	C30/37	3	33,7	32,5	30	28	26	28	30	28	28	32	32	30	30	32	31	31
		2	31,3		28	26	30	28	26	28		30	30	30	32	30	30	
		7	36,6	38,5	30	28	26	28	30	28	28	36	36	38	38	36	37	35
		4	40,4		28	28	28	30	28	28		32	34	36	36	32	34	
		28	43,2	42,6	34	34	36	36	34	35	35	—	—	—	—	—	—	—
		6	42,0		36	36	38	36	34	36		—	—	—	—	—	—	
		56	60,5	55,6	34	34	32	34	34	34	34	38	40	42	38	38	39	39
		8	50,6		32	34	34	36	36	34		38	42	40	38	40	40	
		90	69,1	65,0	38	36	36	38	36	37	37	40	42	42	40	42	41	42
		10	60,9		36	38	38	36	36	37		42	42	40	44	42	42	
Nº	Classe	Idade	Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média
ID30	C30/37	3	18,8	20,8	24	20	20	22	20	21	21	24	26	24	24	22	24	24
		2	22,8		22	20	22	22	22	22		24	22	26	24	22	24	
		7	28,5	29,3	22	24	26	26	24	24	25	30	30	28	28	26	28	28
		4	30,1		26	26	26	28	24	26		26	28	28	28	28	28	
		28	54,2	52,4	28	28	30	30	26	28	29	—	—	—	—	—	—	—
		6	50,7		30	32	28	30	28	30		—	—	—	—	—	—	
		56	53,5	52,5	34	34	32	34	32	33	32	36	38	40	36	36	37	36
		8	51,5		30	30	32	28	30	30		34	36	34	38	36	36	
		90	54,0	51,3	32	32	34	34	32	33	33	36	38	38	36	38	37	37
		10	48,6		34	32	32	34	34	33		36	38	38	36	38	37	
Nº	Classe	Idade	Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média
ID31	C30/37	3	28,5	28,1	22	22	22	24	24	23	23	28	28	28	30	28	28	29
		2	27,6		24	24	22	22	24	23		30	28	28	30	28	29	
		7	37,8	38,5	32	30	28	30	30	30	30	38	34	36	34	34	35	34
		4	39,2		30	30	28	32	32	30		32	32	34	34	34	33	
		28	45,5	47,7	32	32	30	28	30	30	30	—	—	—	—	—	—	—
		6	49,9		28	28	30	28	30	29		—	—	—	—	—	—	
		56	56,8	57,1	32	32	32	34	32	32	33	40	42	40	38	42	40	40
		8	57,4		32	32	34	34	32	33		38	40	42	40	40	40	
		90	60,9	59,9	36	36	34	34	34	35	35	40	38	40	42	42	40	40
		10	58,9		36	38	34	36	34	36		38	42	40	38	40	40	
Nº	Classe	Idade	Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média
ID32	C25/30	3	24,2	24,2	18	18	20	20	22	20	20	22	24	22	22	22	22	23
		2	24,3		22	20	18	18	20	20		24	26	26	22	24	24	
		7	32,8	31,7	30	28	26	26	24	27	26	30	30	30	32	30	30	30
		4	30,5		26	26	24	26	24	25		30	32	30	30	28	30	
		28	38,1	37,5	22	22	24	22	22	22	22	—	—	—	—	—	—	—
		6	37,0		22	22	20	20	24	22		—	—	—	—	—	—	
		56	41,1	41,2	22	24	24	22	24	23	24	26	28	32	28	26	28	28
		8	41,3		24	26	24	22	24	24		26	28	28	24	30	27	
		90	40,8	40,8	30	26	28	28	26	28	27	30	30	32	28	30	30	30
		10	40,9		26	28	28	26	26	27		28	30	32	30	28	30	

ANEXO F. CALIBRAÇÃO DOS ESCLERÓMETROS

Tabela F.9: Resultados dos ensaios referentes à base de dados comparativa (amostras ID33 a ID36).

Amostra	Classe de	Idade	R. Comp.		Índice Esclerométrico													
			(Mpa)		Esclerómetro A							Esclerómetro B						
Nº	Classe		Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média
ID33	1	3	20,8	20,5	20	18	20	16	20	19	18	22	24	22	26	22	23	23
	2		20,1		18	18	16	18	16	17		22	24	22	22	22	22	
	3	7	32,4	32,4	22	24	22	22	22	22	22	24	24	26	22	24	24	25
	4		32,4		22	24	20	24	22	22		26	26	26	24	26	26	
	5	28	38,1	35,7	24	24	24	24	24	24	24	28	28	28	28	28	28	29
	6		33,2		24	24	26	24	26	25		30	30	32	28	30	30	
	7	56	38,3	38,3	26	24	26	24	24	25	24	28	30	30	26	28	28	28
	8		38,2		24	26	22	24	24	24		26	28	28	26	28	27	
	9	90	36,6	36,6	28	24	28	26	28	27	27	28	28	30	30	28	29	29
	10		36,5		26	26	24	28	28	26		28	30	28	32	30	30	
Nº	Classe	Idade	Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média
ID34	1	3	29,9	29,2	24	22	20	20	22	22	22	22	24	26	22	24	24	24
	2		28,6		22	22	22	20	22	22		26	24	24	22	24	24	
	3	7	31,9	31,5	24	22	22	24	22	23	23	28	28	26	28	26	27	27
	4		31,2		22	24	22	22	22	22		28	26	28	30	24	27	
	5	28	35,4	37,5	20	20	18	16	18	18	19	26	24	26	26	26	26	25
	6		39,6		20	18	20	20	22	20		26	24	24	24	22	24	
	7	56	42,2	40,1	26	24	26	22	26	25	25	26	28	24	26	26	26	26
	8		37,9		22	26	24	28	26	25		26	28	26	28	24	26	
	9	90	40,3	40,3	22	24	24	26	24	24	25	26	28	28	30	26	28	29
	10		40,4		28	26	24	26	28	26		32	32	28	30	30	30	
Nº	Classe	Idade	Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média
ID35	1	3	27,6	27,4	20	18	20	18	20	19	20	20	20	22	24	24	22	24
	2		27,2		22	22	20	22	20	21		26	28	24	26	22	25	
	3	7	30,7	31,1	22	22	22	24	22	22	22	26	24	28	24	24	25	26
	4		31,4		22	22	22	24	20	22		28	28	26	28	28	28	
	5	28	38,1	38,8	22	22	20	22	20	21	22	—	—	—	—	—	—	—
	6		39,6		24	22	24	24	22	23		—	—	—	—	—	—	
	7	56	38,9	39,5	24	26	28	22	24	25	25	30	32	26	28	30	29	29
	8		40,0		22	24	28	26	24	25		30	26	28	30	26	28	
	9	90	40,2	41,3	26	28	26	28	28	27	28	28	30	28	32	28	29	29
	10		42,3		28	28	26	28	30	28		28	30	28	30	28	29	
Nº	Classe	Idade	Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média	1	2	3	4	5	1ª Média	2ª Média
ID36	1	3	38,4	37,3	24	22	20	24	24	23	23	26	28	26	30	26	27	28
	2		36,3		22	24	24	22	22	23		30	32	30	28	26	29	
	3	7	47,6	46,8	30	30	32	28	34	31	31	30	32	34	36	36	34	35
	4		46,0		30	30	36	32	32	32		38	38	38	34	36	37	
	5	28	48,9	49,3	28	28	26	26	26	27	26	30	32	36	34	32	33	33
	6		49,7		28	28	24	22	24	25		30	34	32	34	36	33	
	7	56	54,8	53,4	30	32	32	30	32	31	32	38	38	40	40	38	39	39
	8		52,1		34	34	32	30	34	33		40	40	38	42	40	40	
	9	90	53,0	53,2	34	36	38	36	36	36	36	38	40	38	42	40	40	40
	10		53,4		34	36	36	38	36	36		42	44	38	40	38	40	

ANEXO F. CALIBRAÇÃO DOS ESCLERÓMETROS

Tabela F.10: Resultados dos ensaios referentes à base de dados comparativa (amostras ID37 e ID38).

Amostra		Classe de	Idade	R. Comp. (Mpa)		Índice Esclerométrico														
						Esclerómetro A							Esclerómetro B							
Nº		Classe		Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ªMédia	2ªMédia	1	2	3	4	5	1ªMédia	2ªMédia	
ID37	1	C25/30	3	25,3	25,0	18	20	18	18	16	18	18	24	24	24	22	22	23	23	
	2			24,7		20	18	18	20	18	19		24	24	24	22	22	23		
	3		7	31,7	32,2	24	24	24	24	24	24	24	23	26	26	26	28	28	27	27
	4			32,7		22	20	22	24	26	23	28		28	26	24	26	26		
	5		28	37,3	38,4	18	18	20	20	22	20	20	24	26	24	26	26	25	25	
	6			39,5		22	22	20	22	20	21		28	24	24	24	26	25		
	7		56	40,6	41,4	28	28	30	26	28	28	28	32	32	32	30	32	32	32	
	8			42,2		28	26	28	30	28	28		32	30	34	32	32	32		
	9		90	41,7	40,7	30	32	28	30	28	30	29	32	34	36	32	32	33	31	
	10			39,7		28	30	28	30	30	29		30	30	28	32	28	30		
Nº		Classe	Idade	Ensaio	Média	1	2	3	4	5	1ªMédia	2ªMédia	1	2	3	4	5	1ªMédia	2ªMédia	
ID38	1	C30/37	3	23,5	23,4	22	22	24	24	22	23	23	26	26	28	24	28	26	27	
	2			23,3		22	22	22	24	24	23		26	28	28	26	28	27		
	3		7	34,7	34,1	26	26	24	24	24	25	25	28	28	30	30	28	29	29	
	4			33,4		26	26	24	28	26	26		28	28	30	32	30	30		
	5		28	50,0	50,0	30	28	30	30	32	30	30	34	34	32	34	36	34	35	
	6			50,0		30	30	28	30	32	30		38	36	34	38	38	37		
	7		56	55,0	55,6	34	34	38	36	36	36	35	38	40	38	40	38	39	39	
	8			56,1		34	34	36	34	36	35		38	40	42	38	40	40		
	9		90	58,6	57,3	32	34	36	36	32	34	35	38	40	38	40	38	39	39	
	10			56,1		34	36	36	38	34	36		38	38	40	40	38	39		

Anexo G

Compressão e Esclerometria

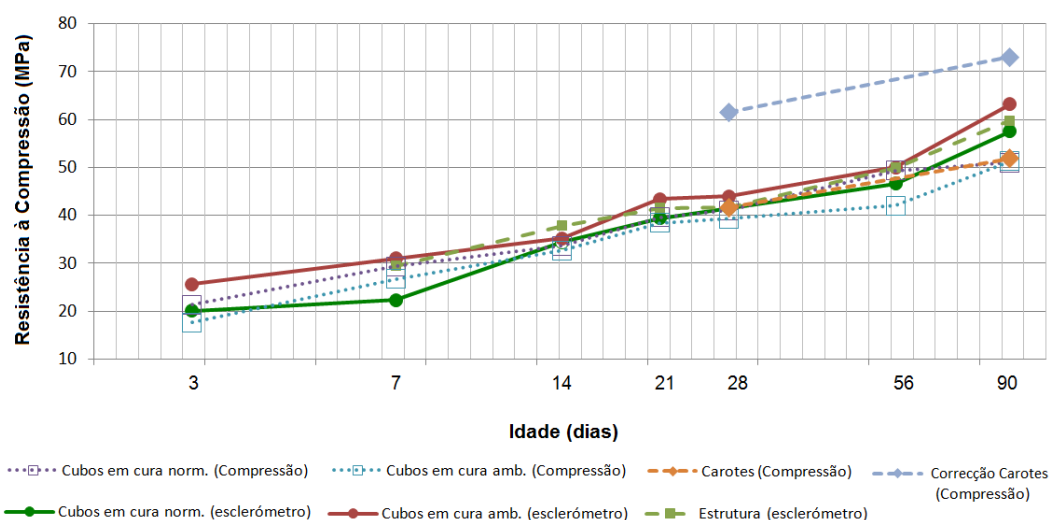


Figura G.1: Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID39 (Viga - C 25/30), respectivas carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro A, ao longo da idade do betão.

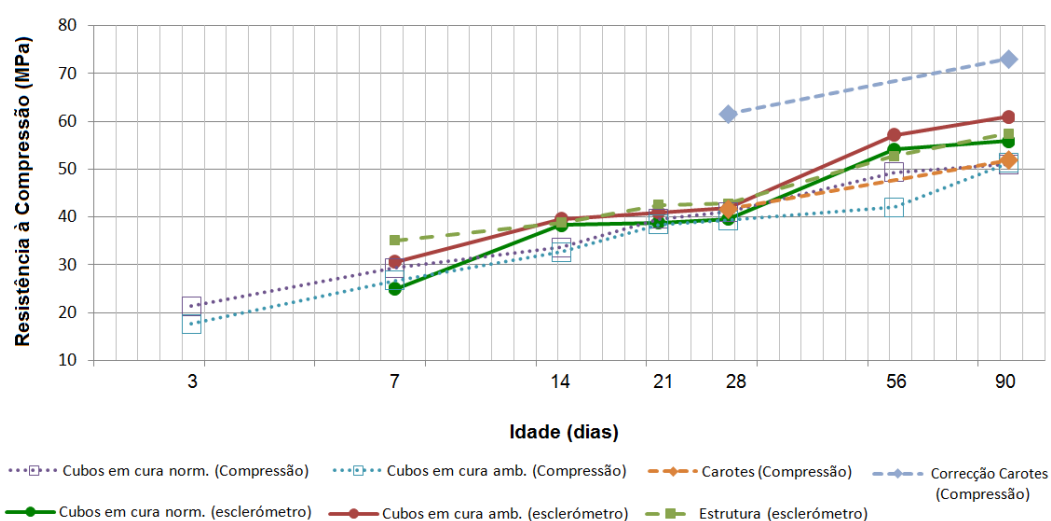


Figura G.2: Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID39 (Viga - C 25/30), respectivas carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro B, ao longo da idade do betão.

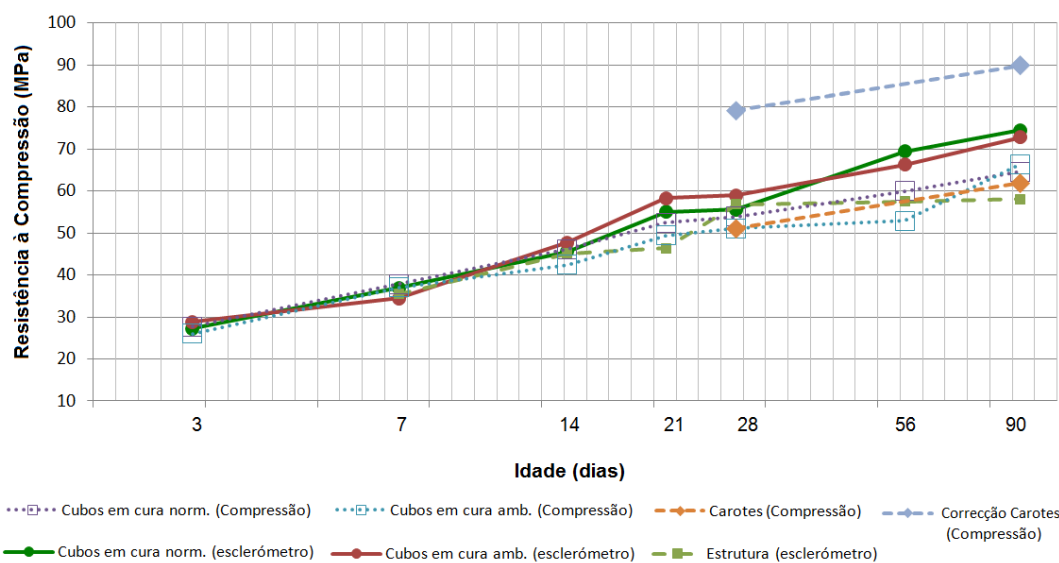


Figura G.3: Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID40 (Viga - C 30/37), respectivas carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro A, ao longo da idade do betão.

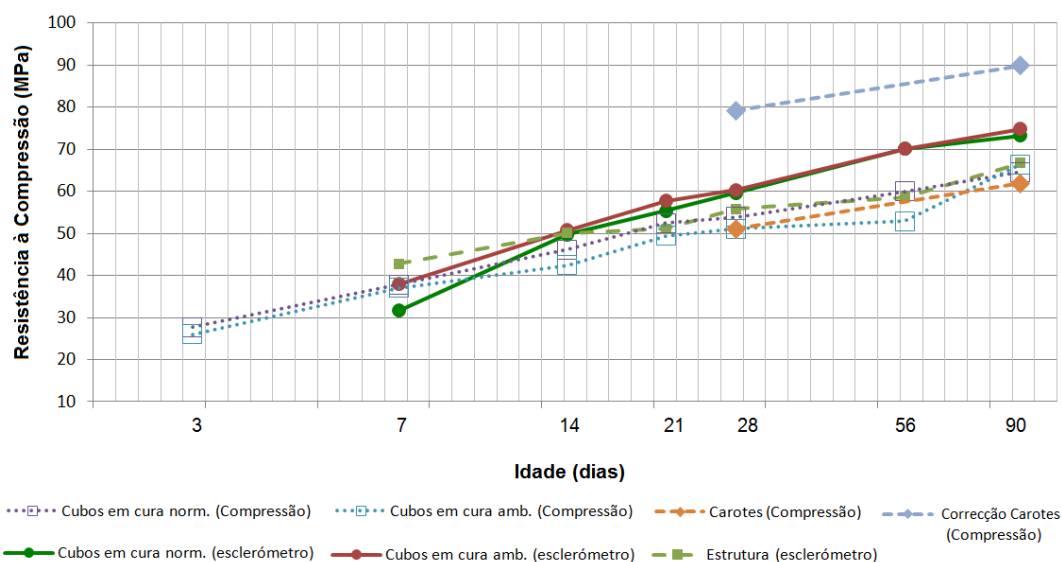


Figura G.4: Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID40 (Viga - C 30/37), respectivas carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro B, ao longo da idade do betão.

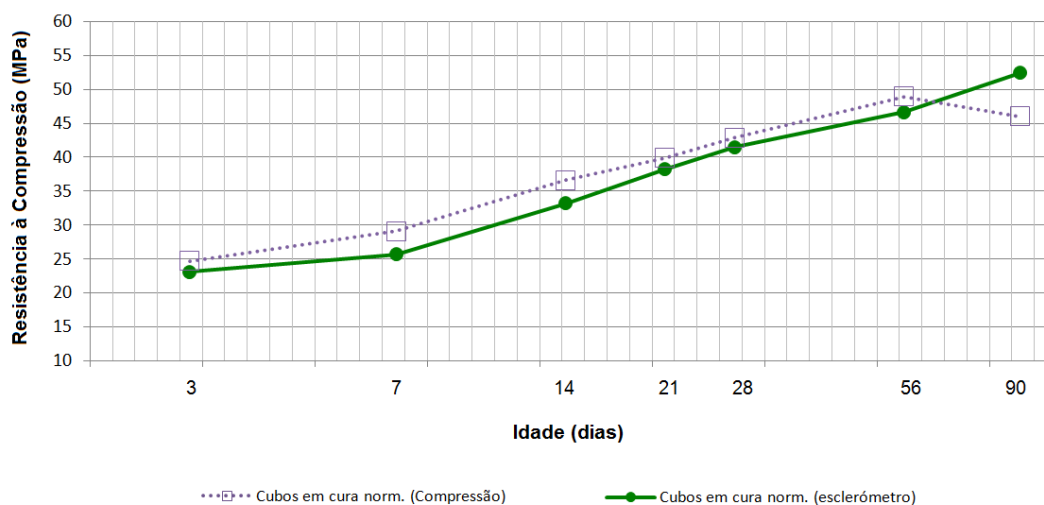


Figura G.5: Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID41 (Pavimento - C 30/37) e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro A, ao longo da idade.

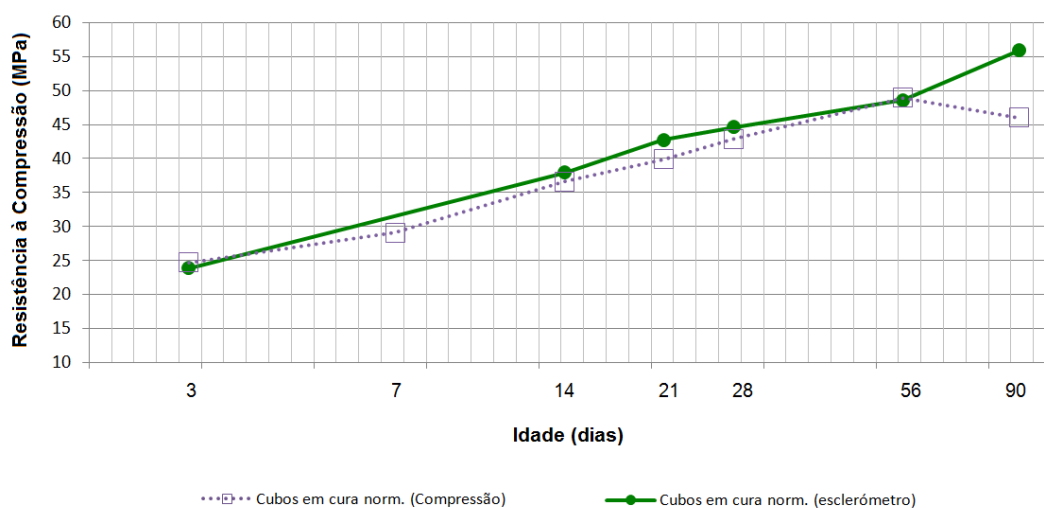


Figura G.6: Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID41 (Pavimento - C 30/37) e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro B, ao longo da idade.

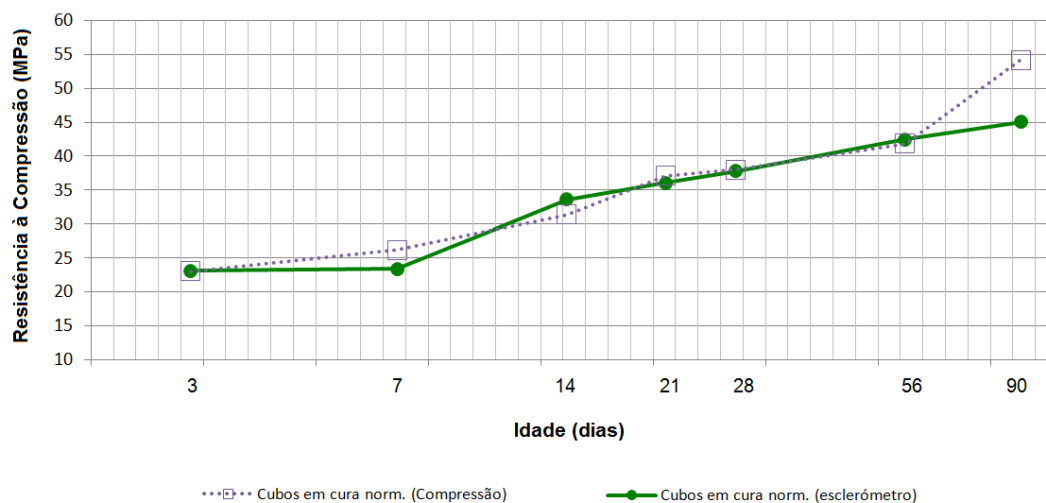


Figura G.7: Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID42 (Pavimento - C 25/30) e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro A, ao longo da idade.

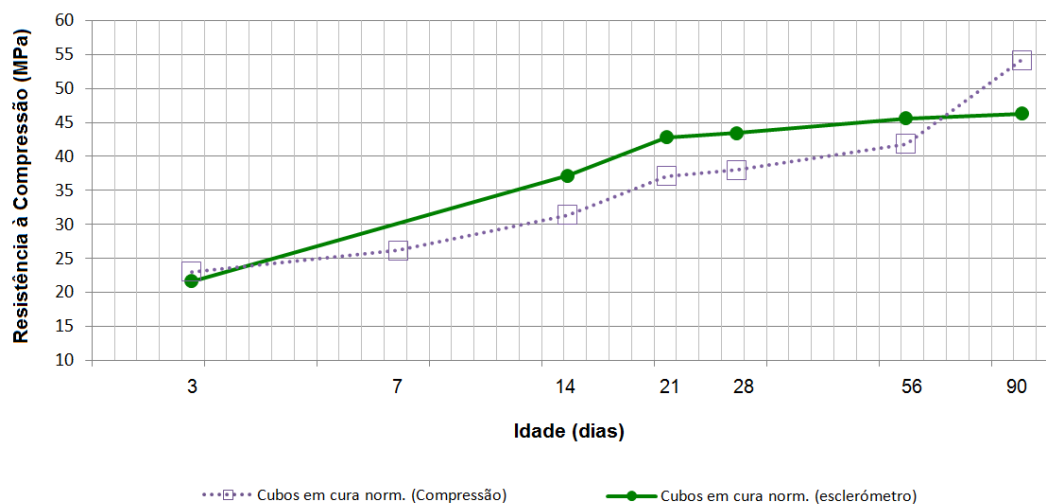


Figura G.8: Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID42 (Pavimento - C 25/30) e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro B, ao longo da idade.

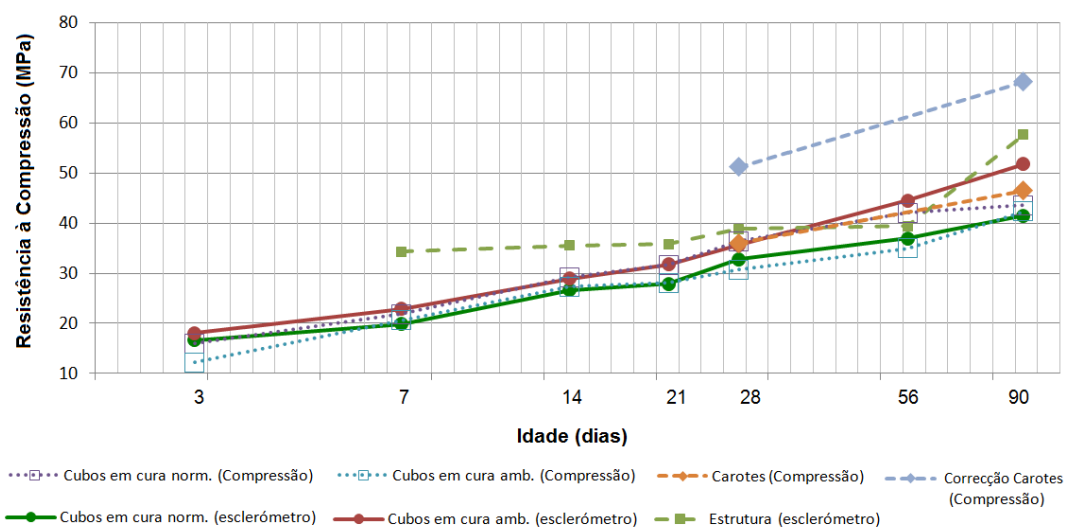


Figura G.9: Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID43 (Pilar - C 25/30), respectivas carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro A, ao longo da idade do betão.

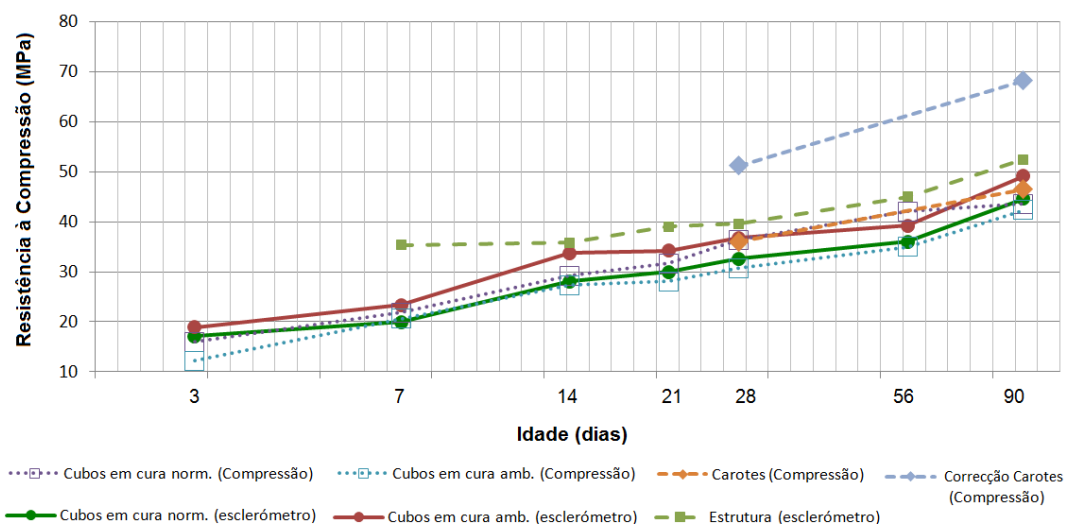


Figura G.10: Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID43 (Pilar - C 25/30), respectivas carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro B, ao longo da idade do betão.

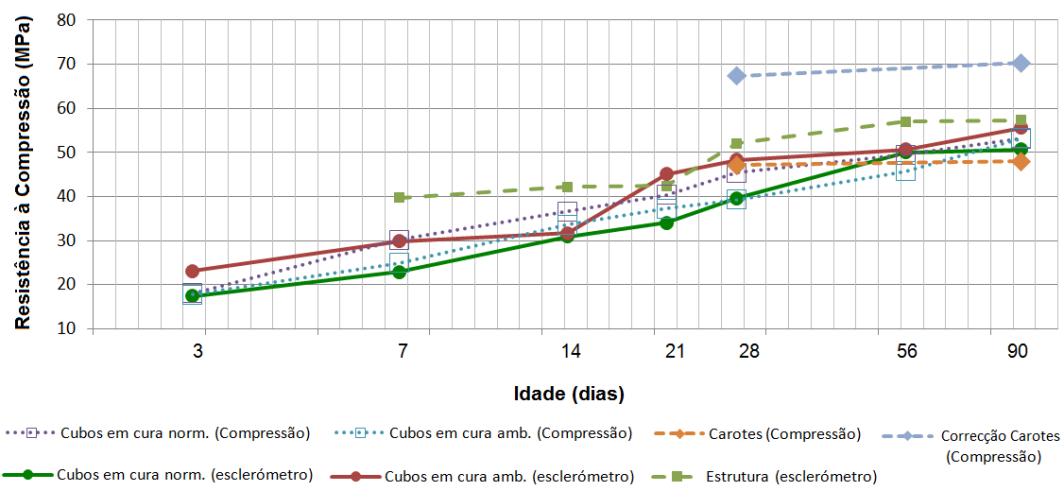


Figura G.11: Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID44 (Pilar - C 30/37), respectivas carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro A, ao longo da idade do betão.

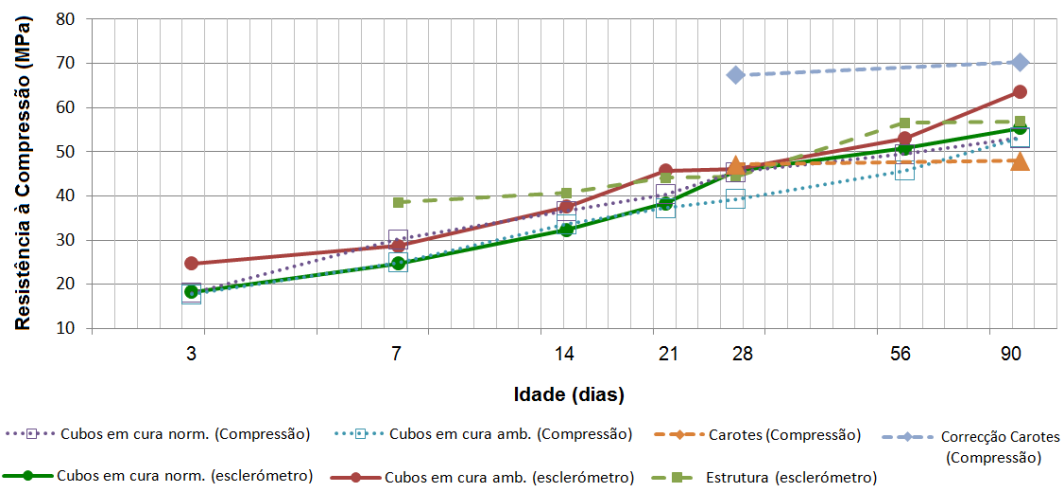


Figura G.12: Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID44 (Pilar - C 30/37), respectivas carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro B, ao longo da idade do betão.

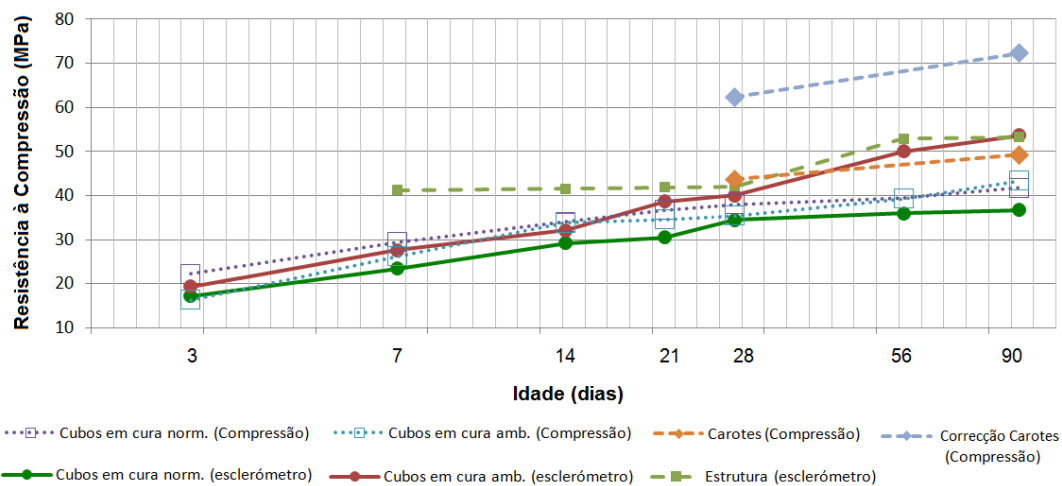


Figura G.13: Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID45 (Pilar - C 25/30 sem cinza), respectivas carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro A, ao longo da idade do betão.

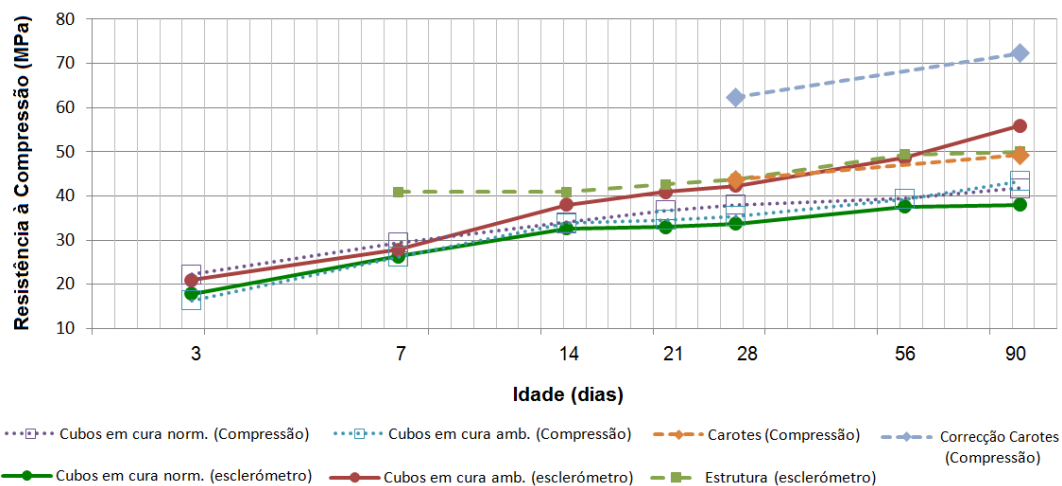


Figura G.14: Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID45 (Pilar - C 25/30 sem cinza), respectivas carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro B, ao longo da idade do betão.

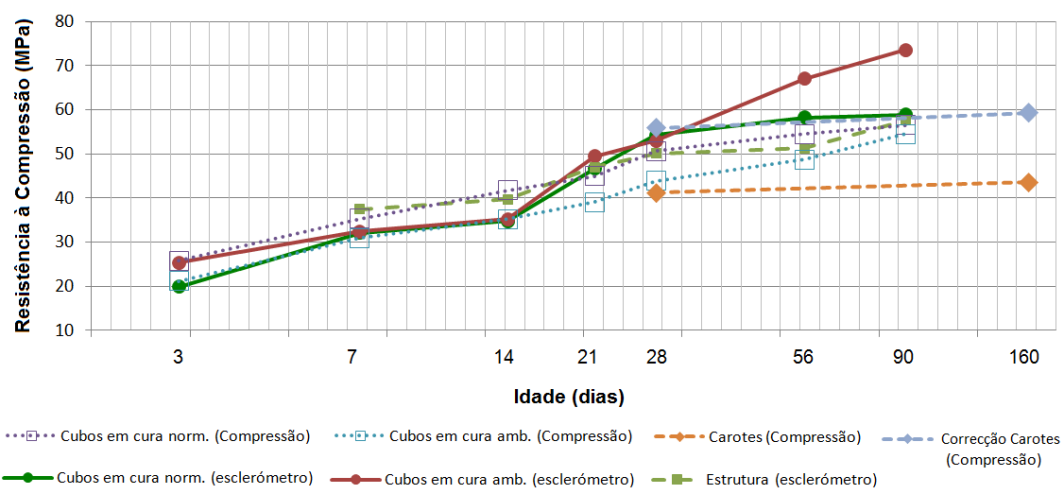


Figura G.15: Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID46 (Lage - C 30/37), respectivas carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro A, ao longo da idade do betão.

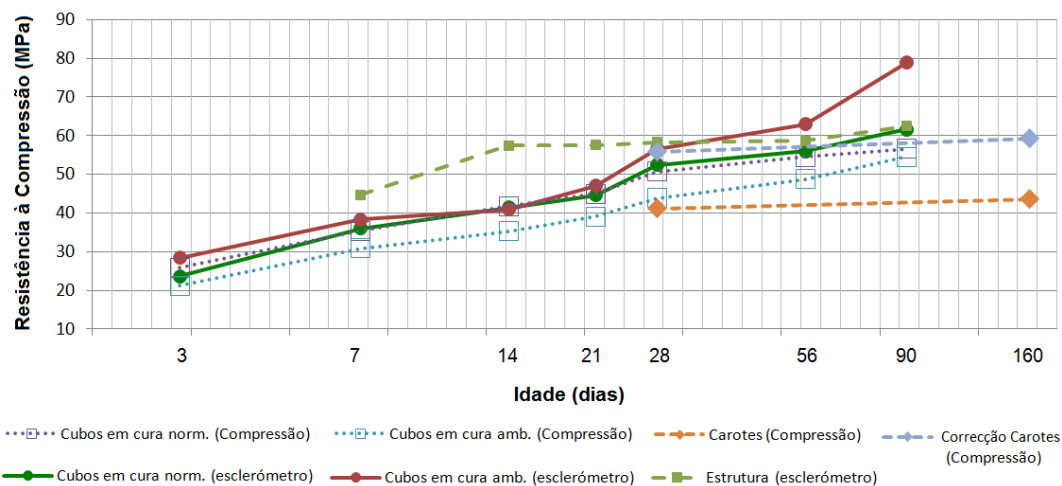


Figura G.16: Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID46 (Lage - C 30/37), respectivas carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro B, ao longo da idade do betão.

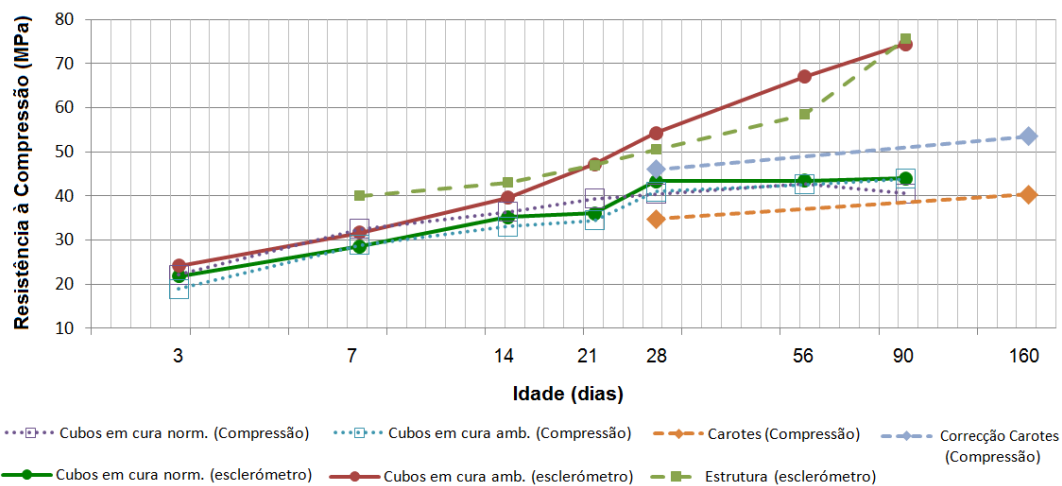


Figura G.17: Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID47 (Lage - C 25/30 sem cinza), respectivas carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro A, ao longo da idade do betão.

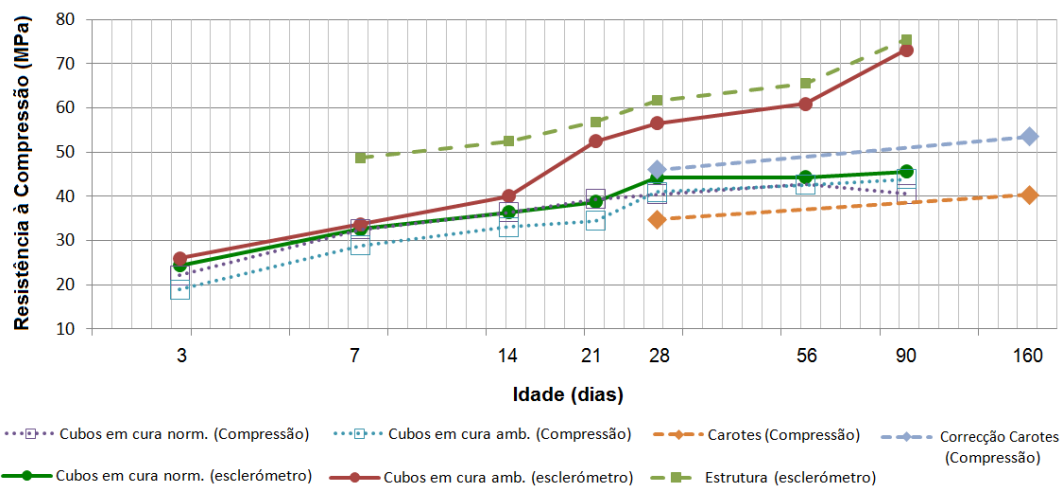


Figura G.18: Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID47 (Lage - C 25/30 sem cinza), respectivas carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro B, ao longo da idade do betão.

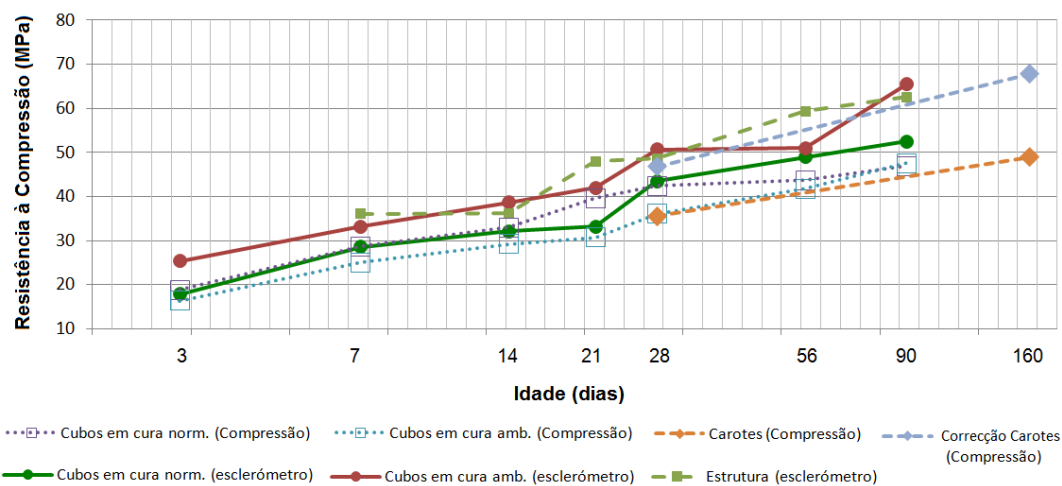


Figura G.19: Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID48 (Lage - C 25/30), respectivas carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro A, ao longo da idade do betão.

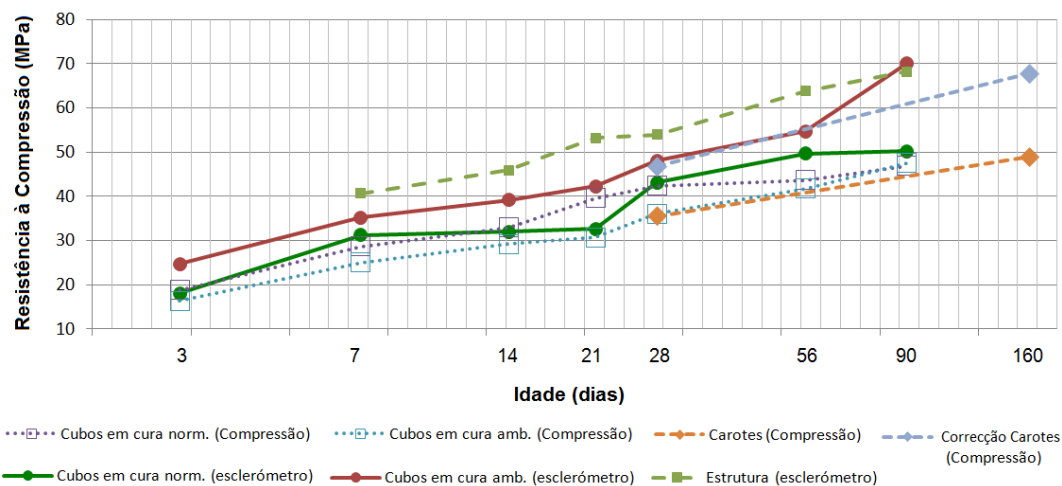


Figura G.20: Comparação de resultados referentes aos ensaios realizados nos provetes cúbicos ID48 (Lage - C 25/30), respectivas carotes e aos ensaios esclerométricos realizados com o esclerómetro B, ao longo da idade do betão.

ANEXO G. COMPRESSÃO E ESCLEROMETRIA

Tabela G.1: Valores obtidos nos ensaios de resistência à compressão e esclerometria efectuados em provetes cúbicos, na estrutura e em carotes.
(Dif. - diferença ente curas normalizada e cond. ambientais; Dif.1 - diferença entre valor na estrutura e no provete em cura normalizada;
Dif.2 - diferença entre valor na estrutura e no provete em cura em cond. ambientais).

Amostra	Local	Classe	Idade	ENSAIO ESCLEROMETRICO												ENSAIO DE COMPRESSÃO								Comparação			
				Esclerômetro A						Esclerômetro B						Comparação		Provetes Cúbicos			Carotes		Esclerômetro vs Compressão				
				Provetes Cúbicos			Estrutura	Comparação		Provetes Cúbicos			Estrutura	Comparação		Cura em Cond. Normalizadas	Cura em Cond. Ambientais	Dif.	tensão obtida	correção de vazios	Esclerômetro Novo		Esclerômetro Velho				
				Cura em Cond. Normalizadas	Cura em Cond. Ambientais	Dif.		Cura em Cond. Normalizadas	Cura em Cond. Ambientais	Dif.	Cura em Cond. Normalizadas	Cura em Cond. Ambientais		Dif.	Dif.1						Dif.2	Dif.1 (Norm.)	Dif.2 (Amb.)	Dif.1 (Norm.)	Dif.2 (Amb.)		
ID39	Viga (esquerda)	C25/30 XC1	3	20	26	6	-	-	-	-	-	-	-	-	21	18	-4	-	-	1	-8	-	-				
			7	22	31	9	29	7	-2	25	31	6	35	10	5	29	27	-3	-	-	7	-4	4	-4			
			14	34	35	1	38	3	3	38	40	1	39	0	-1	34	33	-1	-	-	-1	-3	-5	-7			
			21	39	43	4	41	2	-2	39	41	2	43	4	2	40	38	-1	-	-	0	-5	1	-3			
			28	41	44	3	42	0	-2	40	42	2	43	3	1	41	39	-2	41,6	61,6	0	-5	1	-3			
			56	47	50	3	50	3	0	54	57	3	53	-1	-4	49	42	-7	-	-	3	-8	-5	-15			
Amostra	Local	Classe	Idade	Cubo - Norm.	Cubo - Amb.	Dif.	Estrutura	Dif.1	Dif.2	Cubo - Norm.	Cubo - Amb.	Dif.	Estrutura	Dif.1	Dif.2	Cubo - Norm.	Cubo - Amb.	Dif.	obtida	corrigida	Dif.1 (Norm.)	Dif.2 (Amb.)	Dif.1 (Norm.)	Dif.2 (Amb.)			
ID40	Viga (direita e atrás)	C30/37 XC3	3	27	29	2	-	-	-	-	-	-	-	-	28	26	-2	-	-	0	-3	-	-				
			7	37	34	-3	36	-1	1	32	38	6	43	11	5	38	37	-1	-	-	1	3	6	-1			
			14	46	48	2	45	0	-3	50	51	1	50	0	-1	46	42	-4	-	-	1	-5	-4	-8			
			21	55	58	3	46	-9	-12	55	58	2	51	-4	-7	52	49	-3	-	-	-3	-9	-3	-8			
			28	56	59	3	57	1	-2	60	60	1	56	-4	-5	54	51	-3	51,0	79,1	-2	-8	-6	-9			
			56	69	66	-3	58	-12	-9	70	70	0	59	-12	-12	60	53	-7	-	-	-9	-13	-10	-17			
Amostra	Local	Classe	Idade	Cubo - Norm.	Cubo - Amb.	Dif.	Estrutura	Dif.1	Dif.2	Cubo - Norm.	Cubo - Amb.	Dif.	Estrutura	Dif.1	Dif.2	Cubo - Norm.	Cubo - Amb.	Dif.	obtida	corrigida	Dif.1 (Norm.)	Dif.2 (Amb.)	Dif.1 (Norm.)	Dif.2 (Amb.)			
ID41	Pavimento (atrás)	C30/37 XC3	3	23	23	0	-	-	-	-	-	-	-	-	25	25	0	-	-	2	-	1	-				
			7	26	26	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29	29	0	-	-	3	-	-	-			
			14	33	33	0	-	-	-	38	38	0	-	-	-	37	37	0	-	-	3	-	-1	-			
			21	38	38	0	-	-	-	43	43	0	-	-	-	40	40	0	-	-	2	-	-3	-			
			28	41	41	0	-	-	-	45	45	0	-	-	-	43	43	0	-	-	1	-	-2	-			
			56	47	47	0	-	-	-	49	49	0	-	-	-	49	49	0	-	-	2	-	0	-10			
Amostra	Local	Classe	Idade	Cubo - Norm.	Cubo - Amb.	Dif.	Estrutura	Dif.1	Dif.2	Cubo - Norm.	Cubo - Amb.	Dif.	Estrutura	Dif.1	Dif.2	Cubo - Norm.	Cubo - Amb.	Dif.	obtida	corrigida	Dif.1 (Norm.)	Dif.2 (Amb.)	Dif.1 (Norm.)	Dif.2 (Amb.)			
ID42	Pavimento (à frente)	C25/30 XC1	3	23	23	0	-	-	-	-	-	-	-	-	23	23	0	-	-	0	-	1	-				
			7	23	23	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26	26	0	-	-	3	-	-	-			
			14	34	34	0	-	-	-	37	37	0	-	-	-	31	31	0	-	-	-2	-	-6	-			
			21	36	36	0	-	-	-	43	43	0	-	-	-	37	37	0	-	-	1	-	-6	-			
			28	38	38	0	-	-	-	43	43	0	-	-	-	38	38	0	-	-	0	-	-5	-			
			56	42	42	0	-	-	-	46	46	0	-	-	-	42	42	0	-	-	-1	-	-4	-			
Amostra	Local	Classe	Idade	Cubo - Norm.	Cubo - Amb.	Dif.	Estrutura	Dif.1	Dif.2	Cubo - Norm.	Cubo - Amb.	Dif.	Estrutura	Dif.1	Dif.2	Cubo - Norm.	Cubo - Amb.	Dif.	obtida	corrigida	Dif.1 (Norm.)	Dif.2 (Amb.)	Dif.1 (Norm.)	Dif.2 (Amb.)			
ID43	Pilares 3º e 4º (direta)	C25/30	3	17	18	1	-	-	-	-	-	-	-	-	16	12	-4	-	-	-1	-6	-1	-7				
			7	20	23	3	34	14	11	20	23	3	35	15	12	22	21	-1	-	-	2	-2	2	-3			
			14	27	29	2	36	9	7	28	34	6	36	8	2	29	27	-2	-	-	3	-2	1	-6			
			21	28	32	4	36	8	4	30	34	4	39	9	5	32	28	-4	-	-	4	-4	2	-6			
			28	33	36	3	39	6	3	33	37	4	40	7	3	36	31	-6	36,0	51,2	4	-5	4	-6			
			56	37	45	8	39	3	-5	36	39	3	45	9	6	42	35	-7	-	-	5	-10	6	-4			
Amostra	Local	Classe	Idade	Cubo - Norm.	Cubo - Amb.	Dif.	Estrutura	Dif.1	Dif.2	Cubo - Norm.	Cubo - Amb.	Dif.	Estrutura	Dif.1	Dif.2	Cubo - Norm.	Cubo - Amb.	Dif.	obtida	corrigida	Dif.1 (Norm.)	Dif.2 (Amb.)	Dif.1 (Norm.)	Dif.2 (Amb.)			
ID44	Pilares 2º e 3º (esquerda)	C30/37	3	17	23	6	-	-	-	-	-	-	-	-	18	18	0	-	-	1	-5	0	-7				
			7	23	30	7	40	17	10	25	29	4	39	14	10	30	25	-5	-	-	7	-5	5	-4			
			14	31	32	1	42	11	11	32	38	5	41	8	3	37	34	-3	-	-	6	-2	4	-4			
			21	34	45	11	42	8	-3	38	46	7	44	6	-2	40	37	-3	-	-	6	-8	2	-8			
			28	40	48	9	52	12	4	46	46	1	44	-1	-2	45	39	-6	47,1	67,3	6	-9	0	-7			
			56	50	51	1	57	7	6	51	53	2	57	6	4	49	46	-4	-	-	-1	-5	-1	-7			
Amostra	Local	Classe	Idade	Cubo - Norm.	Cubo - Amb.	Dif.	Estrutura	Dif.1	Dif.2	Cubo - Norm.	Cubo - Amb.	Dif.	Estrutura	Dif.1	Dif.2	Cubo - Norm.	Cubo - Amb.	Dif.	obtida	corrigida	Dif.1 (Norm.)	Dif.2 (Amb.)	Dif.1 (Norm.)	Dif.2 (Amb.)			
ID45	Pilares 1º e 2º (direita)	C25/30 s/ cinza	3	17	19	2	-	-	-	-	-	-	-	-	22	16	-6	-	-	5	-3	4	-5				
			7	23	28	4	41	18	14	26	28	1	41	15	13	29	26	-3	-	-	6	-1	3	-2			
			14	29	32	3	41	12	9	33	38	5	41	8	3	34	34	0	-	-	5	2	1	-4			
			21	30	39	8	42	11	3	33	41	8	43	10	2	37	35	-2	-	-	6	-4	4	-6			
			28	34	40	6	42	8	2	34	42	9	44	10	2	38	35	-3	43,7	62,3	4	-5	4	-7			
			56	36	50	14	53	17	3	38	49	11	49	12	1	39	39	0	-	-	3	-11	2	-9			
Amostra	Local	Classe	Idade	Cubo - Norm.	Cubo - Amb.	Dif.	Estrutura	Dif.1	Dif.2	Cubo - Norm.	Cubo - Amb.	Dif.	Estrutura	Dif.1	Dif.2	Cubo - Norm.	Cubo - Amb.	Dif.	obtida	corrigida	Dif.1 (Norm.)	Dif.2 (Amb.)	Dif.1 (Norm.)	Dif.2 (Amb.)			
ID46	Laje (atrás)	C30/37	3	20	25	6	-	-	-	-	-	-	-	-	26	21	-5	-	-	6	-4	2	-7				
			7	32	32	0	37	5	5	36	38	2	45	9	6	35	31	-4	-	-	3	-2	-1	-7			
			14	35	35	0	40	5	4	41	41	0	57	16	17	42	35	-6	-	-	7	0	0	-6			
			21	47	49	3	47	0	-2	45	47	2	58	13	10	45	39	-6	-	-	-2	-10	0	-8			
			28	54	53	-1	50	-4	-3	52	57	4	58	6	2	51	44	-7	41,2	55,9	-4	-9	-2	-13			
			56	58	67	9	51	-7	-16	56	63	7	59	3	-4	55	49	-6	-	-	-4	-18	-1	-14			
Amostra	Local	Classe	Idade	Cubo - Norm.	Cubo - Amb.	Dif.	Estrutura	Dif.1	Dif.2	Cubo - Norm.	Cubo - Amb.	Dif.	Estrutura	Dif.1	Dif.2	Cubo - Norm.	Cubo - Amb.	Dif.	obtida	corrigida	Dif.1 (Norm.)	Dif.2 (Amb.)	Dif.1 (Norm.)	Dif.2 (Amb.)			
ID47	Laje (ao meio)	C25/30 s/ cinza	3	22	24	2	-	-	-	-	-	-	-	-	23	19	-4	-	-	0	-5	2	-7				
			7	34	40	6	43	8	3	36	40	4	52	16	12	36	34	-2	-	-	4	-7	0	-5			
			14	35	40	5	47	11	0	39	52	14	57	18	4	39	33	-6	-	-	3	-13	1	-18			
			28	43	54	11	51	7	-4	44	57	12	62	18	5	40	41	1	34,8	46,0	-3	-13	-4	-16			
			56	43	67	24	59	15	-9	44	61	17	66	21	5	43	43	0	-	-	-1	-24	-2	-18			
			90	44	74	30	76	32	1	46	73	28	75	30	2	41	44	3	-	-	-3	-31	-5	-29			
Amostra	Local	Classe	Idade	Cubo - Norm.	Cubo - Amb.	Dif.	Estrutura	Dif.1	Dif.2	Cubo - Norm.	Cubo - Amb.	Dif.	Estrutura	Dif.1	Dif.2	Cubo - Norm.	Cubo - Amb.	Dif.	obtida	corrigida	Dif.1 (Norm.)	Dif.2 (Amb.)	Dif.1 (Norm.)	Dif.2 (Amb.)			
ID48	Laje (à frente)	C25/30	3	18	25	8	-	-	-	-	-	-	-	-	19	16	-2	-	-	1	-9	1	-8				
			7	29	33	5	36	8	3	31	35	4	41	9	5	29	25	-4	-	-	0	-8	-3	-10			
			14	32	39	7	36	4	-2	32	39	7	46	14	7	33	29	-4	-	-	1	-10	1	-10			
			21	33	42	9	48	15	6	33	42	10	53	21	11	40	31	-9	-	-	6	-11	7	-12			
			28	43	51	7	49	5	-2	43	48	5	54	11	6	42	36	-6	35,5	46,8	-1	-15	-1	-12			
			56	49	51	2	59	10	8	50	55	5	64	14	9	44	42	-2	-	-	-5	-9	-6	-13			

Anexo H

Registo de Temperatura em Frielas

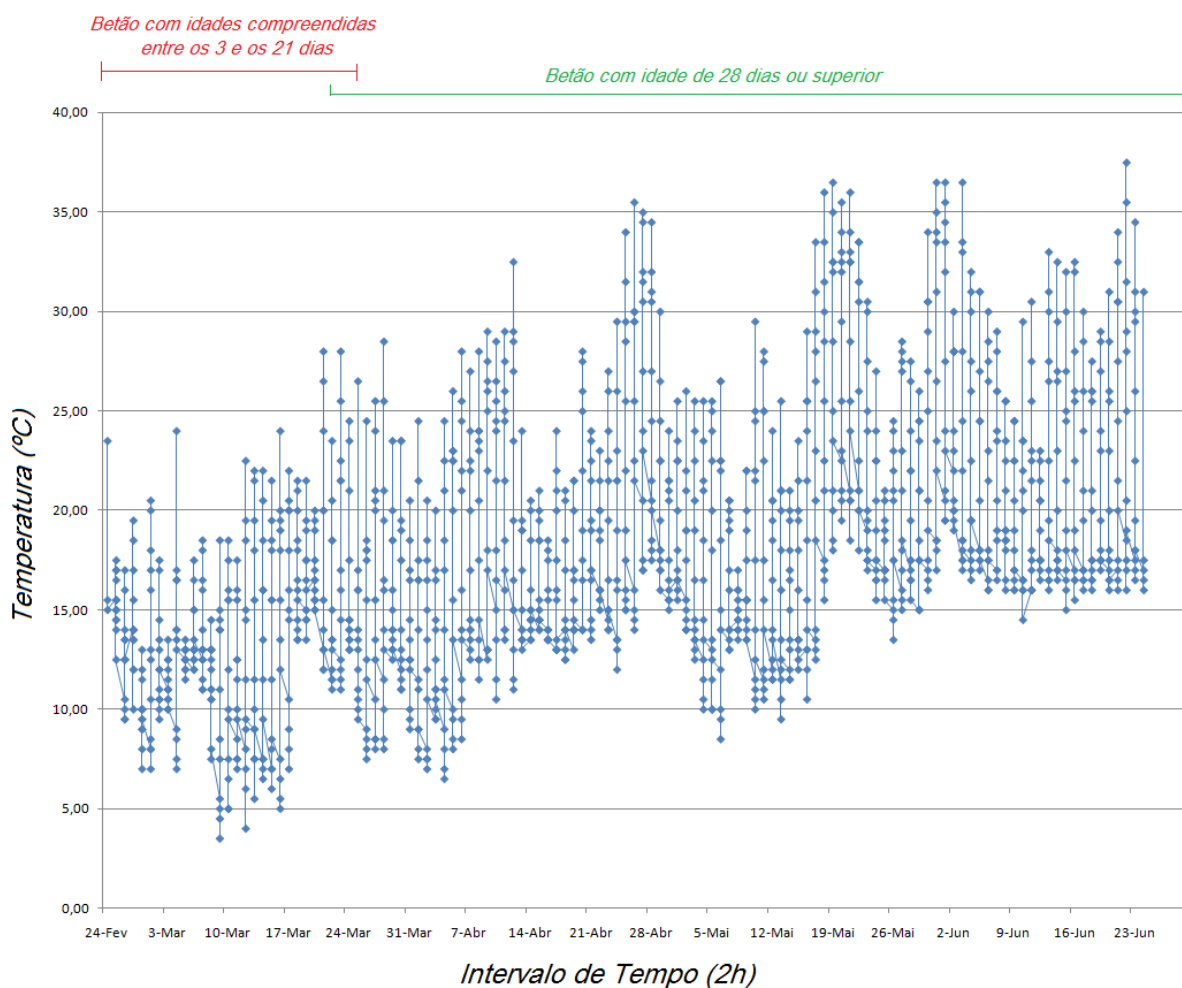


Figura H.1: Temperatura registada em Frielas de duas em duas horas entre os meses de Fevereiro e Junho de 2010.

Anexo I

Análises Térmicas

I.1 Amostras referentes à base de dados

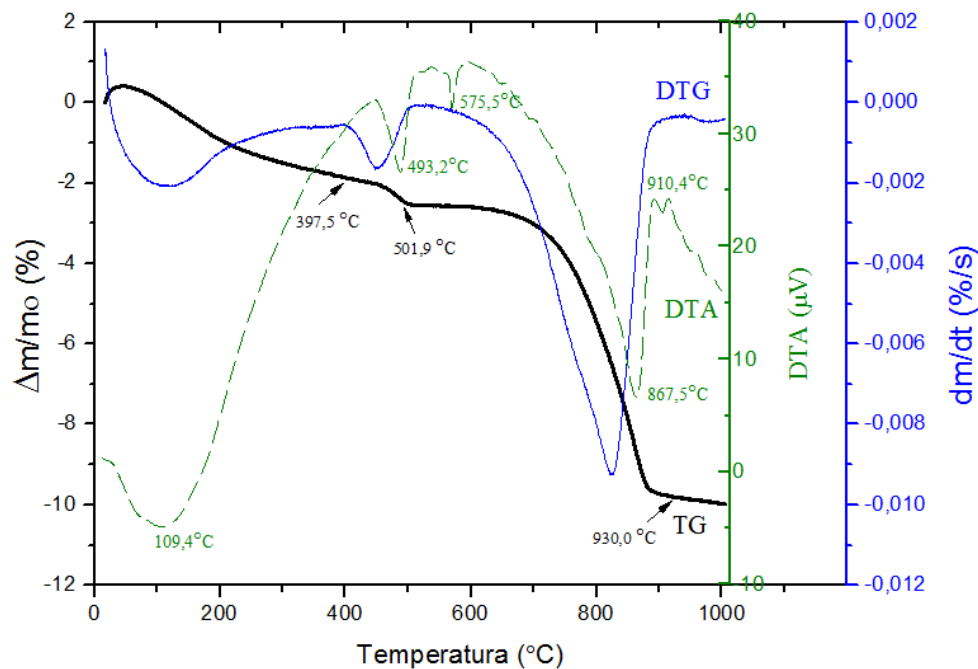


Figura I.1: Análises térmicas da amostra ID28 com 3 dias de hidratação.

Tabela I.1: Valores da análise DTA/TG obtidos para ID28 com 3 dias de hidratação.

GAMA DE TEMPERATURA (°C)	PICOS CURVA DTA (°C)	$\Delta m/m_o$ (%)	$\Delta m/m_o$ (%) TOTAL
40 – 400	—	2,0	10,0
	109,4		
400 – 600	493,2	1,0	
	575,5		
600 – 1000	867,5	7,0	
	910,4		

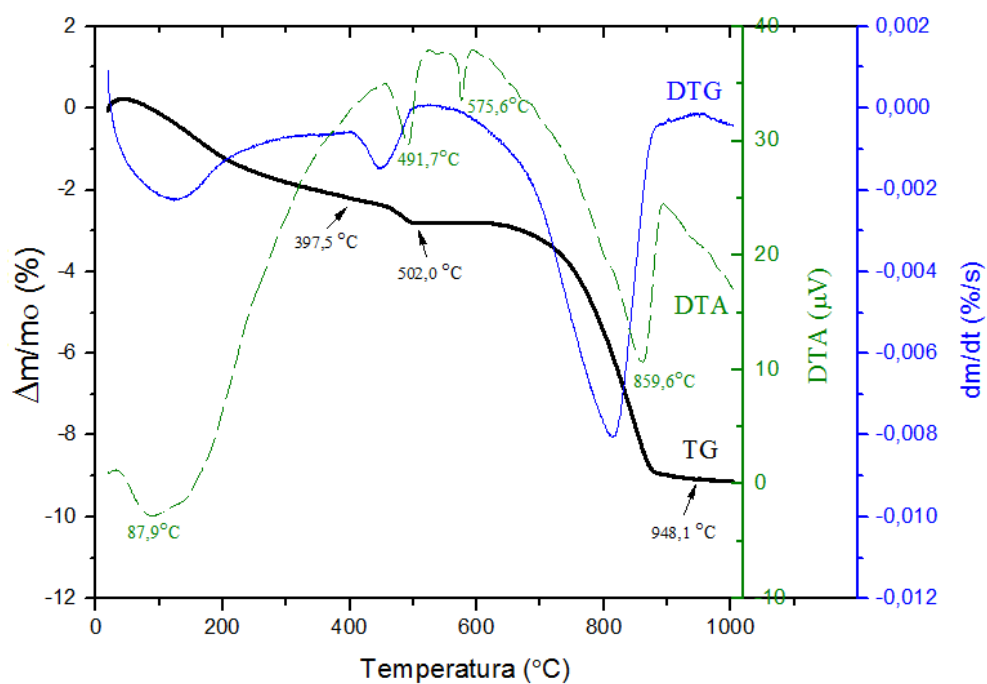


Figura I.2: Análises térmicas da amostra ID28 com 7 dias de hidratação.

Tabela I.2: Valores da análise DTA/TG obtidos para ID28 com 7 dias de hidratação.

GAMA DE TEMPERATURA (°C)	PICOS CURVA DTA (°C)	$\Delta m/m_o$ (%)	$\Delta m/m_o$ (%) TOTAL
40 – 400	87,9	2,5	9,5
	—		
400 – 600	491,7	1,0	
	575,6		
600 – 1000	859,6	6,0	
	—		

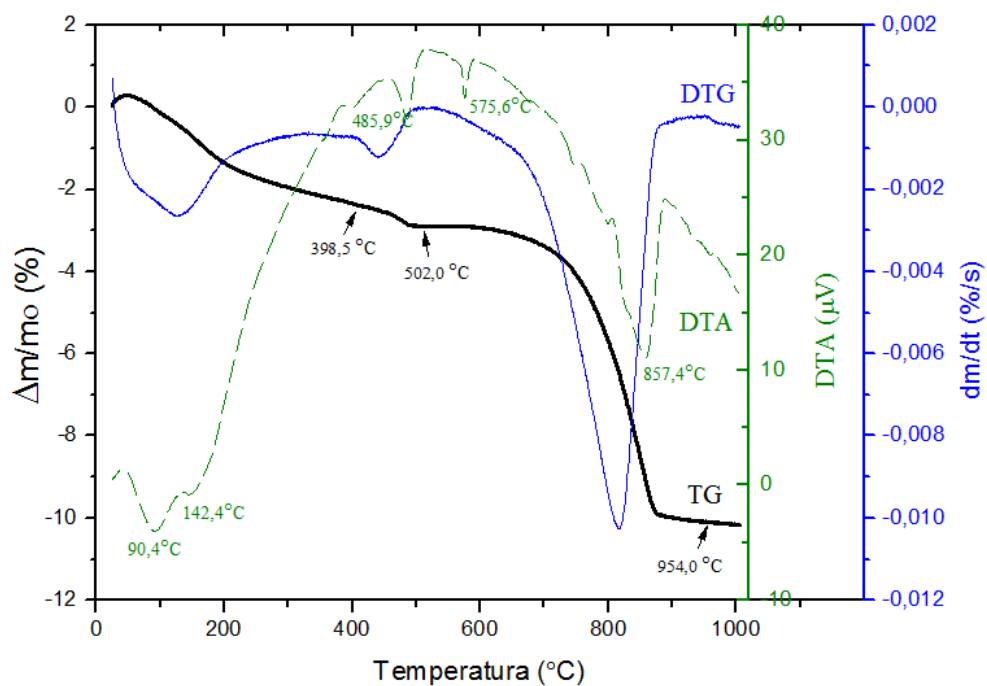


Figura I.3: Análises térmicas da amostra ID28 com 28 dias de hidratação.

Tabela I.3: Valores da análise DTA/TG obtidos para ID28 com 28 dias de hidratação.

GAMA DE TEMPERATURA (°C)	PICOS CURVA DTA (°C)	$\Delta m/m_o$ (%)	$\Delta m/m_o$ (%) TOTAL
40 – 400	90,4	2,5	10,5
	142,4		
400 – 600	485,9	1,0	
	575,6		
600 – 1000	857,4	7,0	
	—		

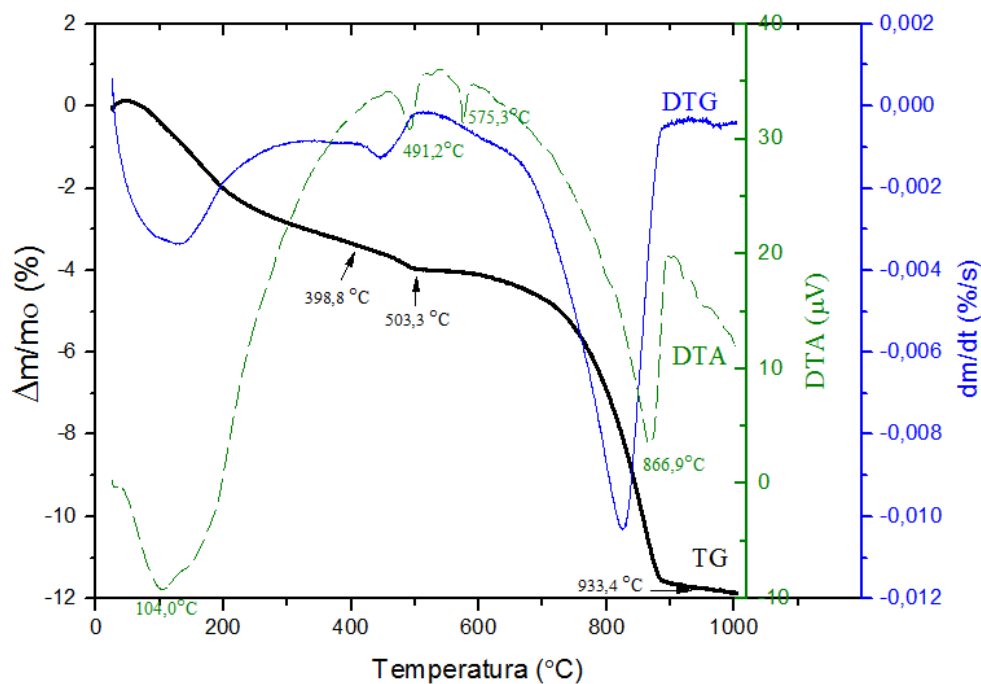


Figura I.4: Análises térmicas da amostra ID28 com 56 dias de hidratação.

Tabela I.4: Valores da análise DTA/TG obtidos para ID28 com 56 dias de hidratação.

GAMA DE TEMPERATURA (°C)	PICOS CURVA DTA (°C)	$\Delta m/m_o$ (%)	$\Delta m/m_o$ (%) TOTAL
40 – 400	—	3,0	12,0
	104,0		
400 – 600	491,2	1,0	
	575,3		
600 – 1000	866,9	8,0	
	—		

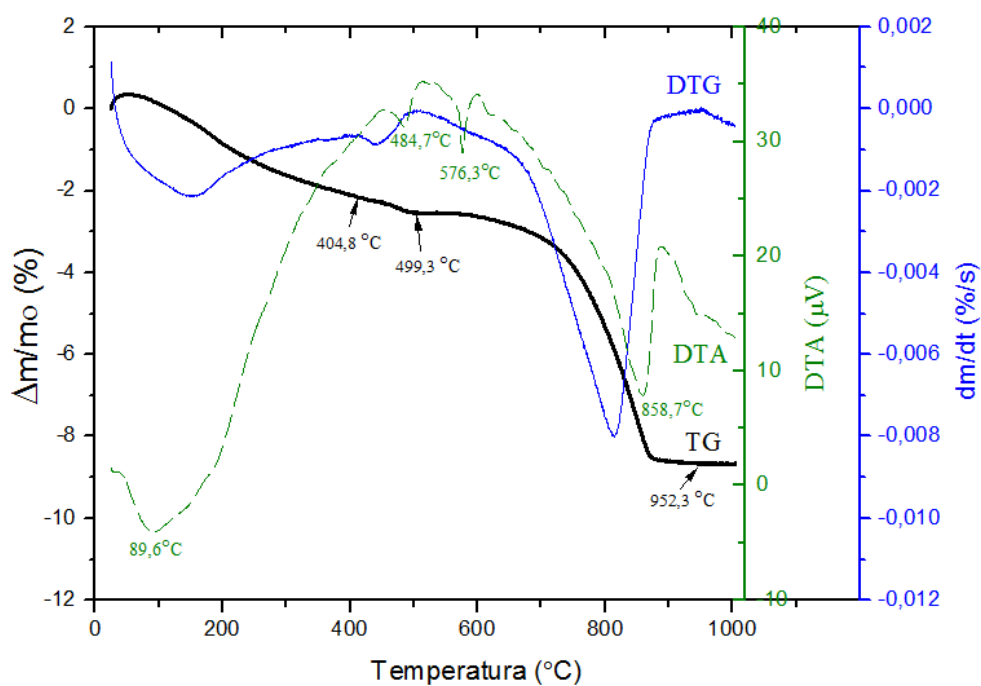


Figura I.5: Análises térmicas da amostra ID28 com 90 dias de hidratação.

Tabela I.5: Valores da análise DTA/TG obtidos para ID28 com 90 dias de hidratação.

GAMA DE TEMPERATURA (°C)	PICOS CURVA DTA (°C)	$\Delta m/m_o$ (%)	$\Delta m/m_o$ (%) TOTAL
40 – 400	89,6	2,5	9,0
	—		
400 – 600	484,7	0,5	
	576,3		
600 – 1000	858,7	6,0	
	—		

I.2 Amostras referentes à estrutura

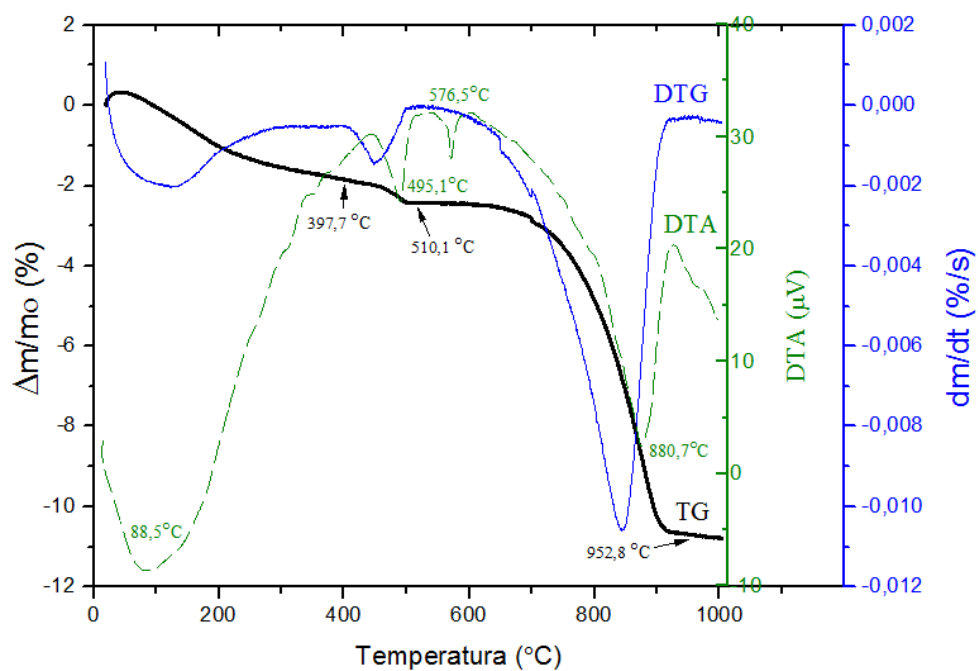


Figura I.6: Análises térmicas da amostra ID48 com 3 dias de hidratação.

Tabela I.6: Valores da análise DTA/TG obtidos para ID48 com 3 dias de hidratação.

GAMA DE TEMPERATURA (°C)	PICOS CURVA DTA (°C)	$\Delta m/m_o$ (%)	$\Delta m/m_o$ (%) TOTAL
40 – 400	88,5	2,0	11,0
	—		
400 – 600	495,1	1,0	
	576,5		
600 – 1000	880,7	8,0	
	—		

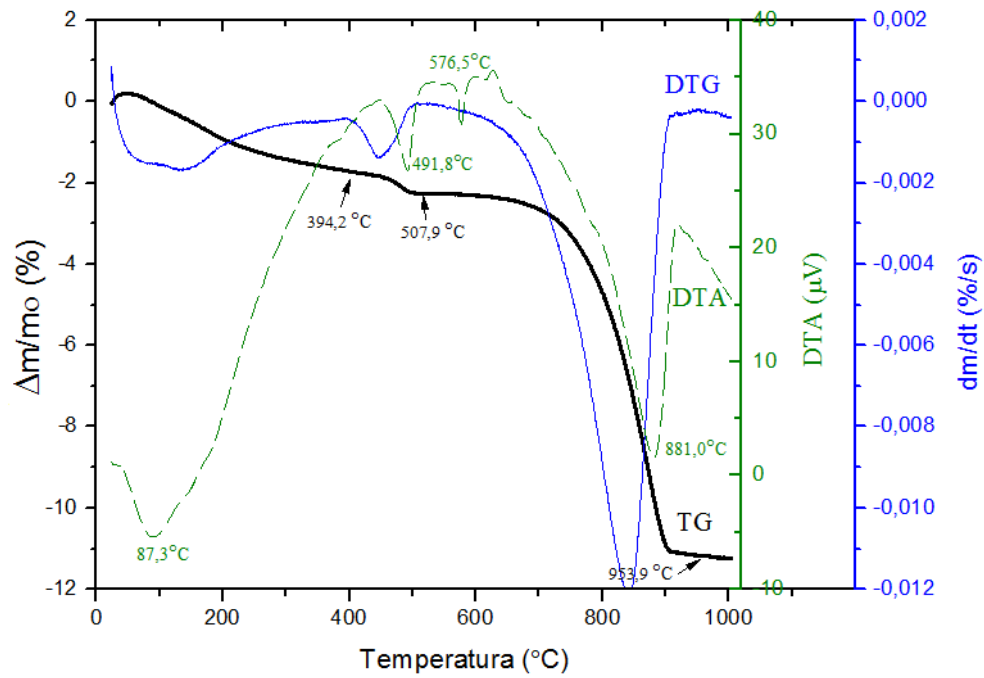


Figura I.7: Análises térmicas da amostra ID48 com 7 dias de hidratação.

Tabela I.7: Valores da análise DTA/TG obtidos para ID48 com 7 dias de hidratação.

GAMA DE TEMPERATURA (°C)	PICOS CURVA DTA (°C)	$\Delta m/m_o$ (%)	$\Delta m/m_o$ (%) TOTAL
40 – 400	87,3	2,0	11,5
	—		
400 – 600	491,8	0,5	
	576,5		
600 – 1000	881,0	9,0	
	—		

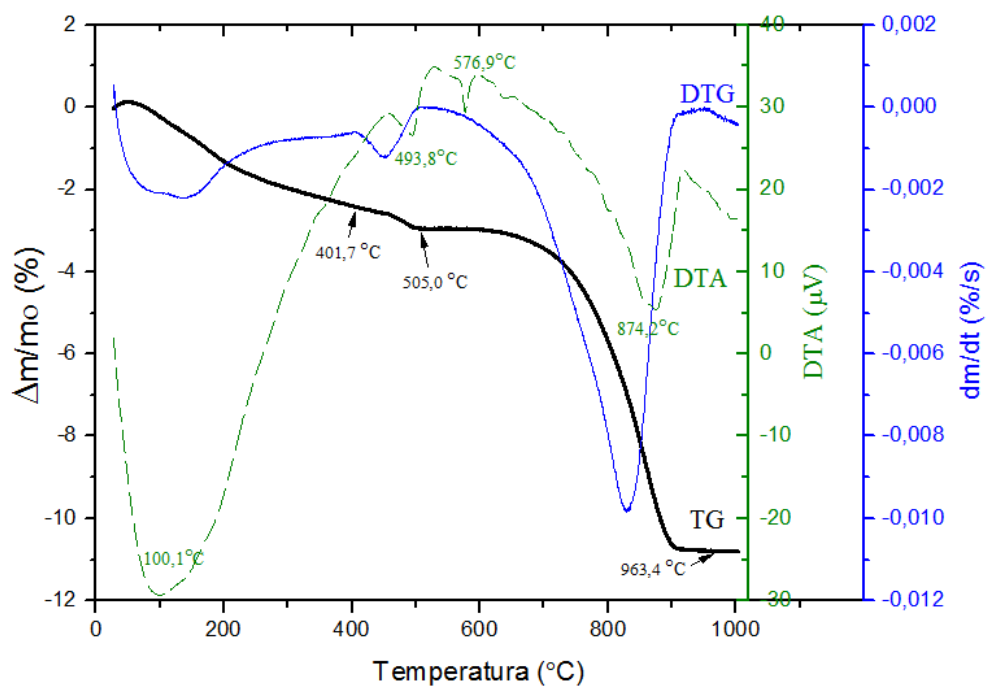


Figura I.8: Análises térmicas da amostra ID48 com 28 dias de hidratação.

Tabela I.8: Valores da análise DTA/TG obtidos para ID48 com 28 dias de hidratação.

GAMA DE TEMPERATURA (°C)	PICOS CURVA DTA (°C)	$\Delta m/m_o$ (%)	$\Delta m/m_o$ (%) TOTAL
40 – 400	—	2,5	11,0
	100,1		
400 – 600	493,8	0,5	
	576,9		
600 – 1000	874,2	8,0	
	—		

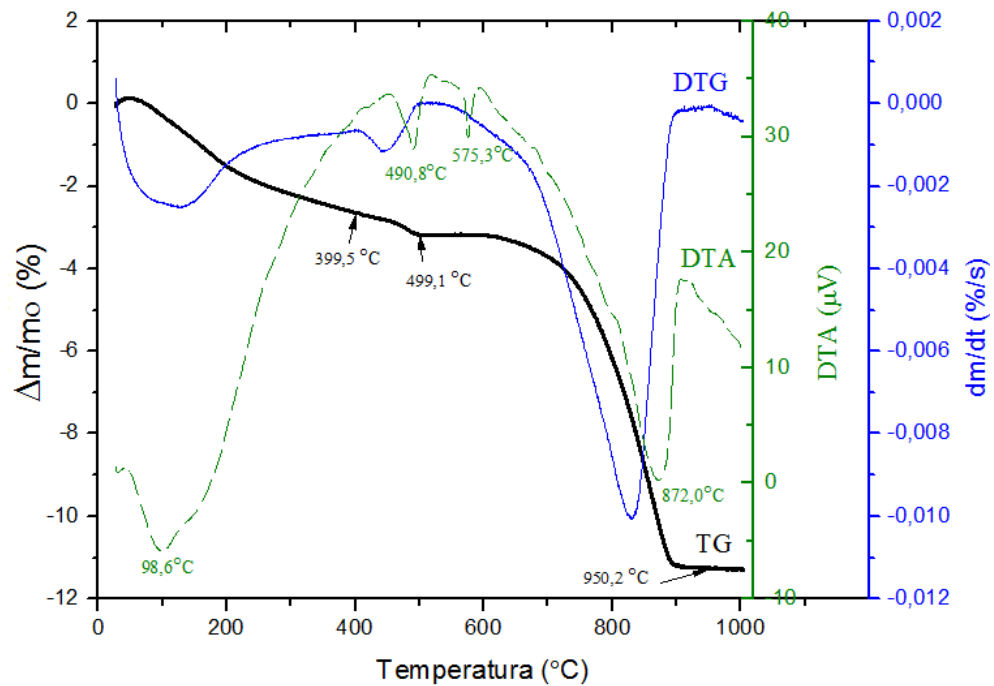


Figura I.9: Análises térmicas da amostra ID48 com 56 dias de hidratação.

Tabela I.9: Valores da análise DTA/TG obtidos para ID48 com 56 dias de hidratação.

GAMA DE TEMPERATURA (°C)	PICOS CURVA DTA (°C)	$\Delta m/m_o$ (%)	$\Delta m/m_o$ (%) TOTAL
40 – 400	98,6	3,0	11,5
	—		
400 – 600	490,8	0,5	
	575,3		
600 – 1000	872,0	8,0	
	—		

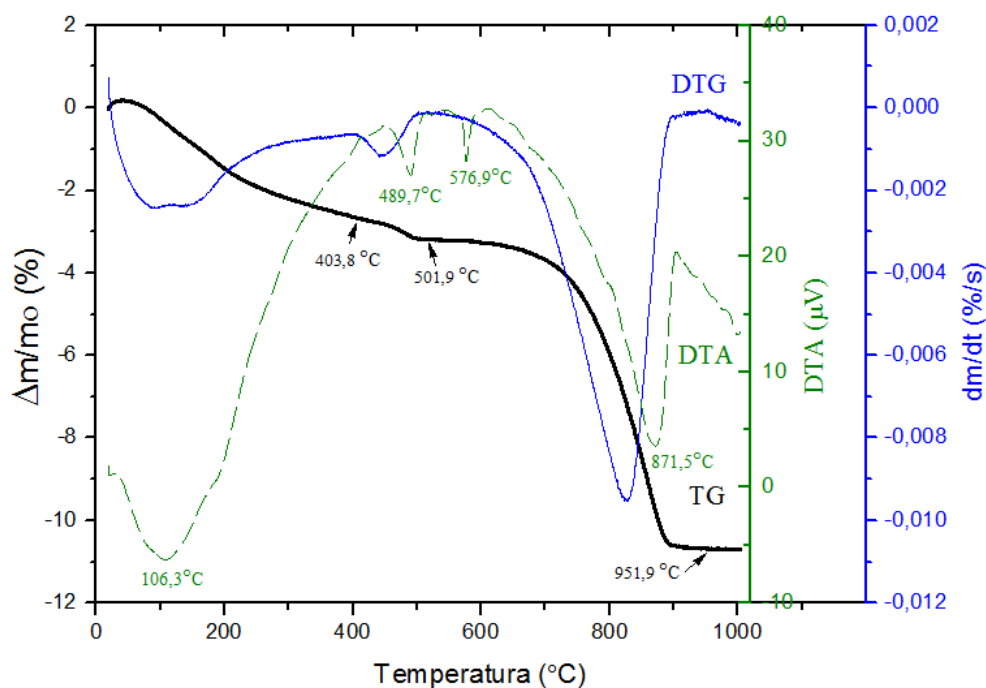


Figura I.10: Análises térmicas da amostra ID48 com 90 dias de hidratação.

Tabela I.10: Valores da análise DTA/TG obtidos para ID48 com 90 dias de hidratação.

GAMA DE TEMPERATURA (°C)	PICOS CURVA DTA (°C)	$\Delta m/m_o$ (%)	$\Delta m/m_o$ (%) TOTAL
40 – 400	—	3,0	11,0
	106,3		
400 – 600	489,7	0,5	
	576,9		
600 – 1000	871,5	7,5	
	—		

Anexo J

Resultados das Análises SEM-EDX

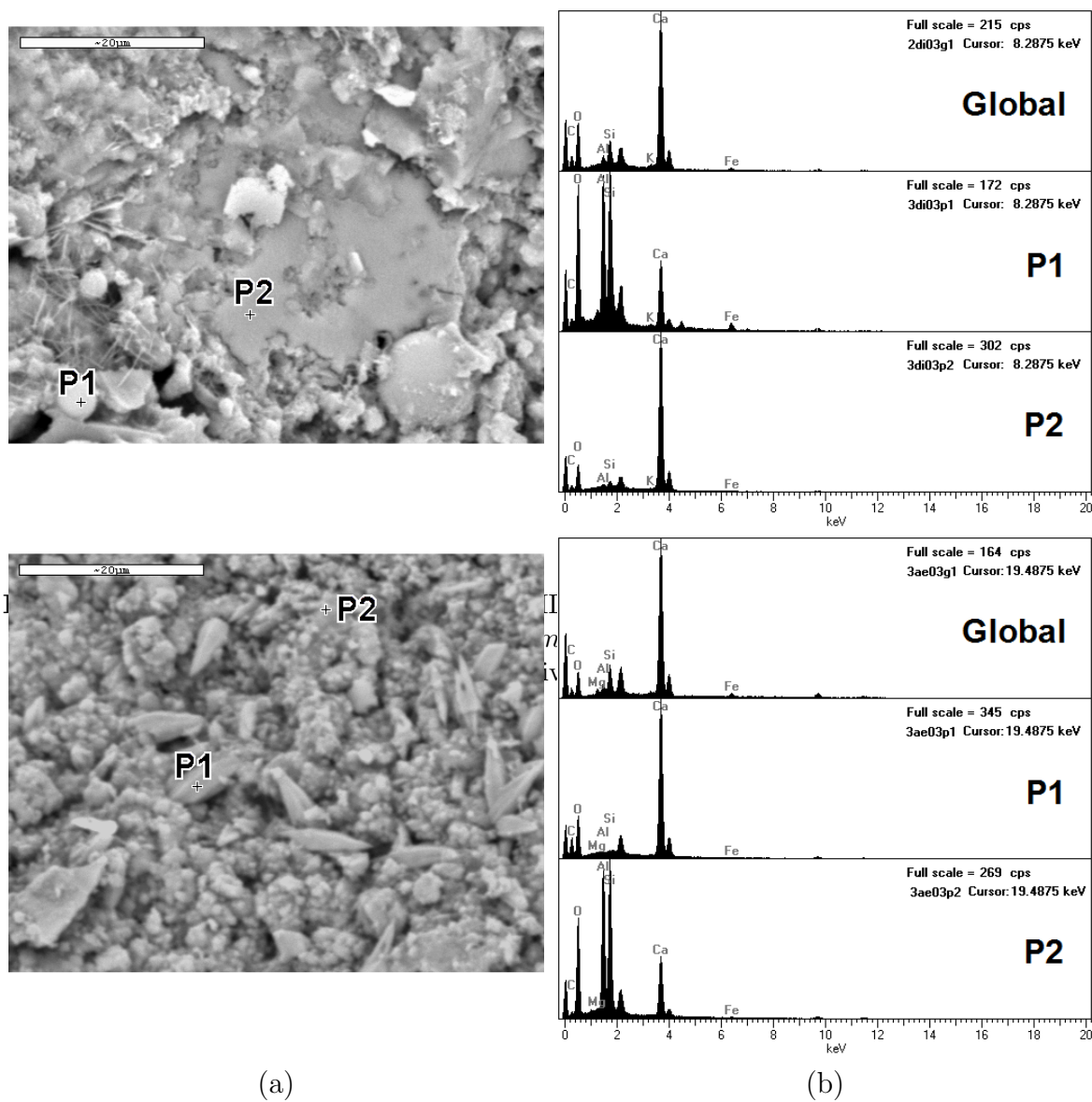


Figura J.2: Análise SEM-EDX da amostra ID48 com 3 dias de hidratação (parte exterior):
(a) micrografia (imagem BE - escala 20 μm) com identificação dos pontos analisados;
(b) espectros global e relativos a cada ponto analisado.

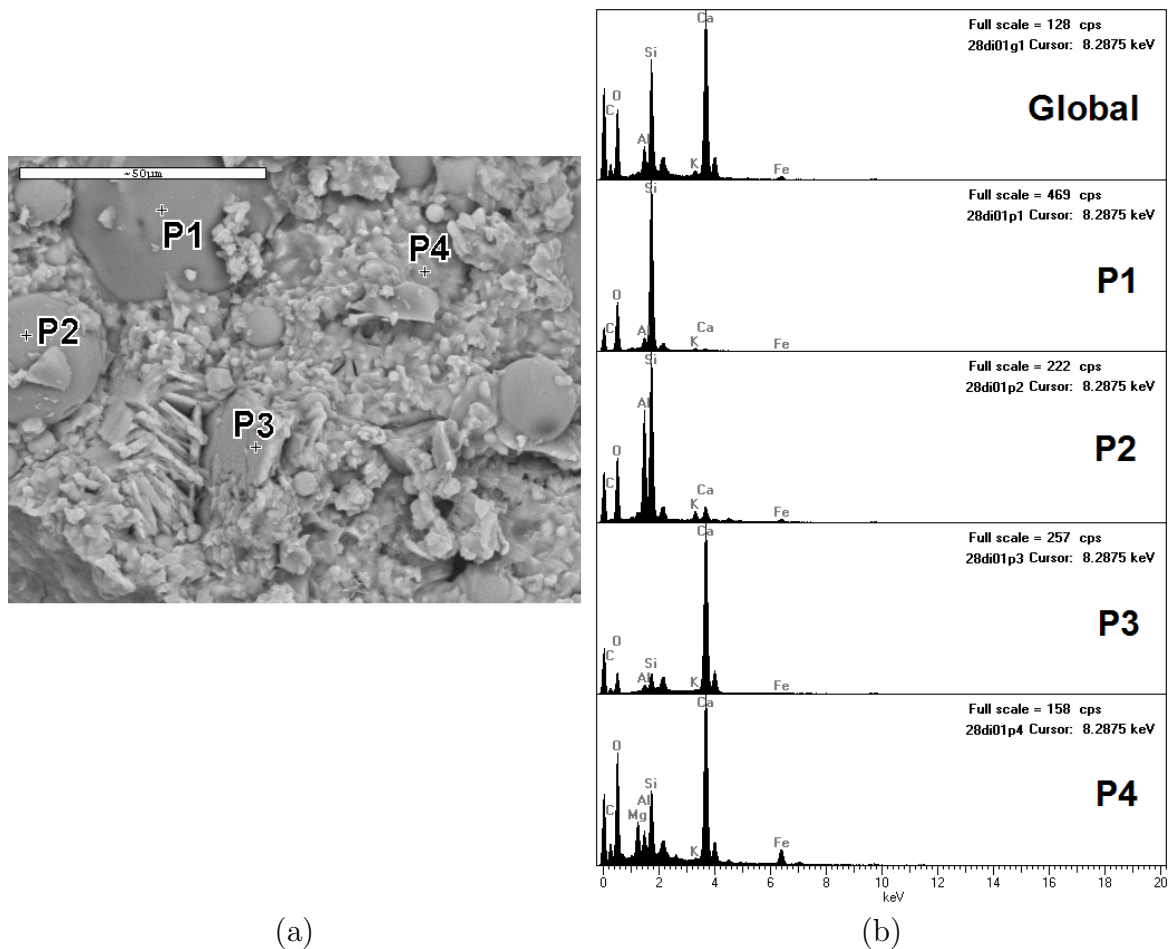


Figura J.3: Análise SEM-EDX da amostra ID28 com 28 dias de hidratação (parte interior): (a) micrografia (imagem BE - escala 20 μm) com identificação dos pontos analisados; (b) espectros global e relativos a cada ponto analisado.

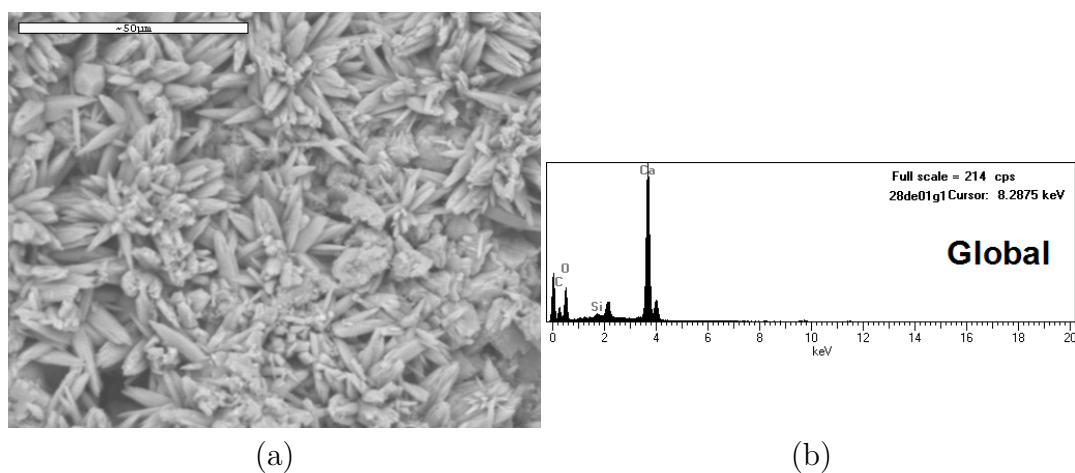


Figura J.4: Análise SEM-EDX da amostra ID28 com 28 dias de hidratação (parte exterior): (a) micrografia (imagem BE - escala 20 μm); (b) espectro global.

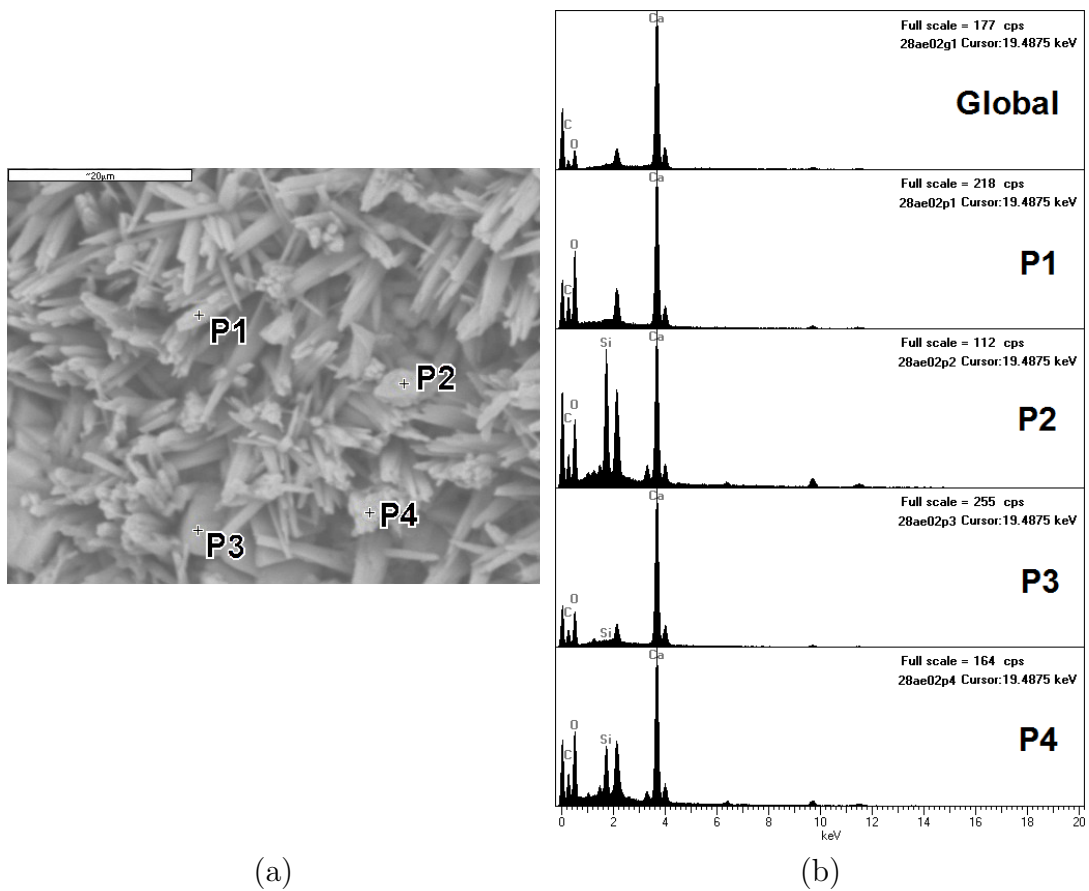


Figura J.5: Análise SEM-EDX da amostra ID48 com 28 dias de hidratação (parte exterior): (a) micrografia (imagem BE - escala $20\mu m$) com identificação dos pontos analisados; (b) espectros global e relativos a cada ponto analisado.

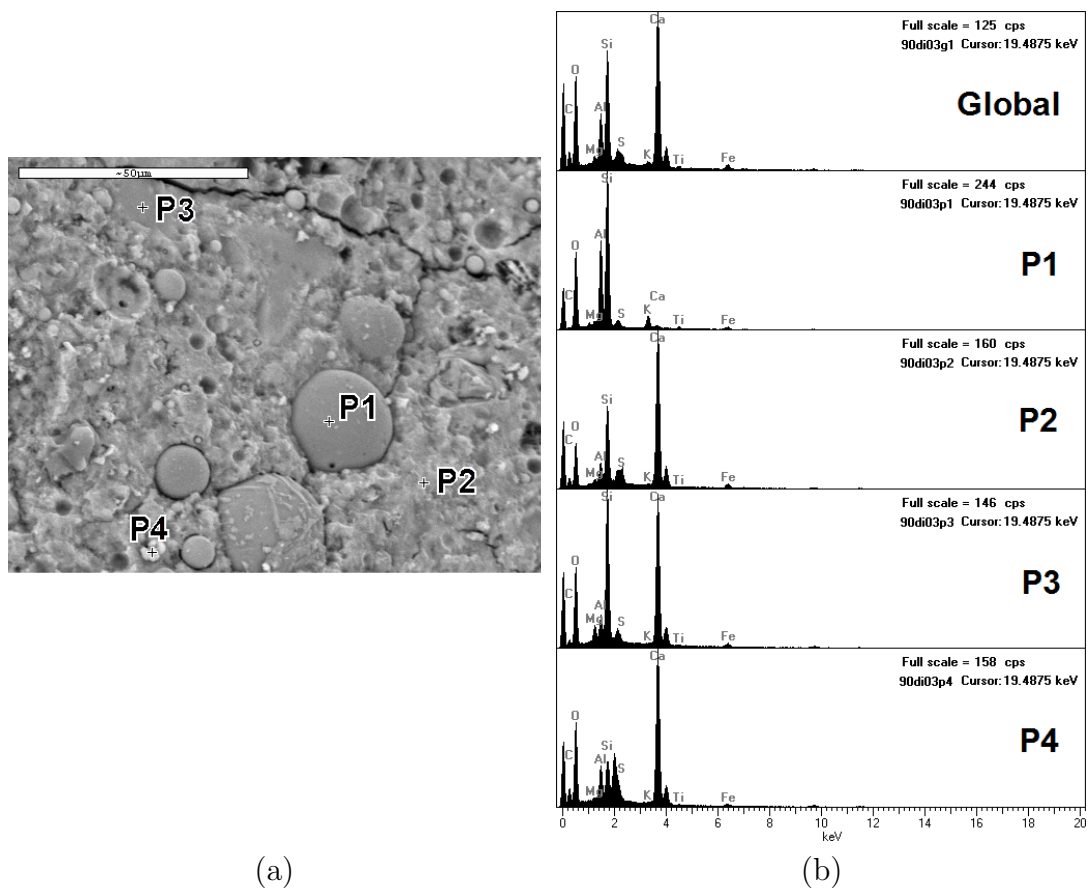


Figura J.6: Análise SEM-EDX da amostra ID28 com 90 dias de hidratação (parte interior): (a) micrografia (imagem BE - escala 20 μm) com identificação dos pontos analisados; (b) espectros global e relativos a cada ponto analisado.

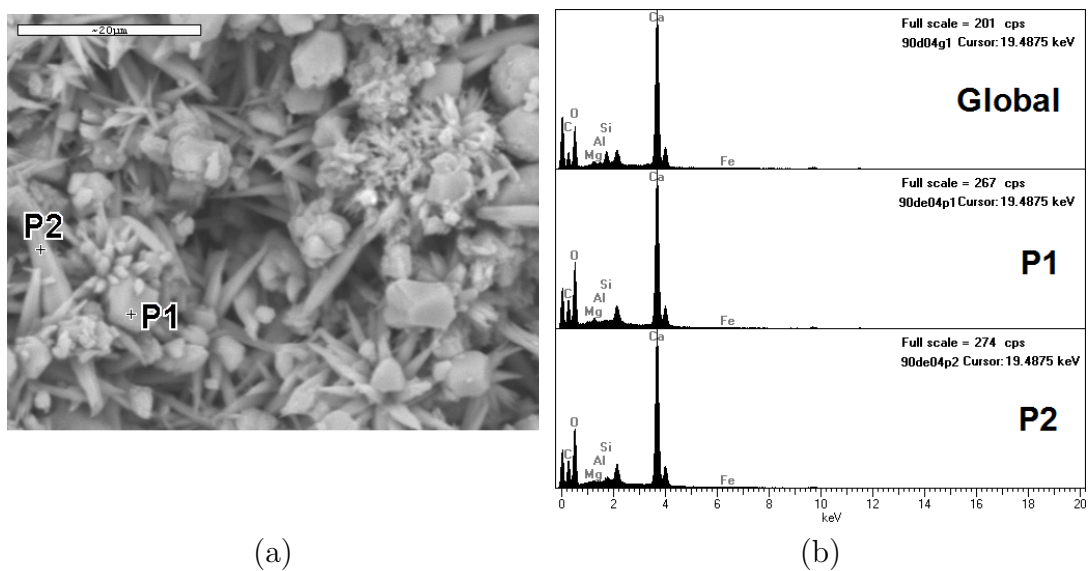


Figura J.7: Análise SEM-EDX da amostra ID28 com 90 dias de hidratação (parte exterior): (a) micrografia (imagem BE - escala $20\mu m$) com identificação dos pontos analisados; (b) espectros global e relativos a cada ponto analisado.