

Influência da interface agregado-pasta no comportamento mecânico de betões estruturais de agregados leves

João Miguel Ortega de Oliveira Paulo

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientador: Professor Doutor José Alexandre de Brito Aleixo Bogas

Orientadora: Professora Doutora Ana Mafalda Saldanha Guedes

Júri:

Presidente: Professor Doutor Nuno Gonçalo Cordeiro Marques de Almeida

Orientador: Professor Doutor José Alexandre de Brito Aleixo Bogas

Vogal: Doutor Pedro Miguel Soares Raposeiro da Silva

Mai de 2018

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Agradecimentos

A conclusão deste trabalho representa o culminar de uma longa jornada da minha vida, ao longo da qual nem sempre o Sol brilhou. Nada do que alcancei seria possível sem os melhores do meu lado, a quem tanto devo por cada estímulo e incentivo prestado. A todos os que me acompanharam e que de alguma forma contribuíram para a minha formação pessoal e académica, o meu mais sincero obrigado. Quero agradecer em especial:

Ao meu orientador Professor Doutor José Alexandre de Brito Bogas e orientadora Professora Doutora Ana Mafalda Saldanha Guedes, pelo tremendo conhecimento transmitido, pela incansável paciência, pela disponibilidade prestada ao longo de todo o processo de realização deste trabalho e principalmente pela confiança que depositaram em mim.

Aos meus adorados pais, que foram e sempre serão a minha fonte de inspiração, a base do meu ser, por todos os impagáveis sacrifícios pessoais e monetários prestados.

À minha irmã Maria, pela força e companheirismo durante o meu percurso.

Aos meus avós e tios, pelos valores e princípios inculcados.

À minha namorada Ana, pela amizade, compreensão e profundo apoio a mim dedicado.

Aos meus amigos para a vida, pela camaradagem, em especial José Morais, Miguel Zilhão, João Silva, João Freitas, Miguel Afonso, Iuri Dias, Pedro Santana, Pedro Santos, Luís Lucas, Diogo Carrilho, Luís Maltez, Pedro Maltez, Artur Tareco, Duarte Calado, António Matos, Luís Martins, Daniel Marques, David Fernandes e Alexis Fernandes.

Aos técnicos e colegas do laboratório de construção, pela fantástica experiência e ensinamentos.

Resumo

A presente dissertação tem como objectivo o estudo da influência da região de interface agregado-pasta (ITZ) no comportamento mecânico de betões estruturais de agregados leves (BEAL), tendo em consideração diferentes tipos de agregado, condições de cura dos betões e condições de molhagem inicial dos agregados. Para tal, foi realizada uma extensa campanha experimental, que envolve ensaios de caracterização mecânica e de aderência agregado-pasta, complementados por análises qualitativas de microscopia electrónica de varrimento. O comportamento dos BEAL é comparado com o de betões convencionais produzidos com diferentes tipos de agregados de massa volúmica normal (BAN).

Na produção dos betões foram considerados três tipos de agregados leves de porosidade distinta e dois tipos de agregados de massa volúmica normal correntes. Os agregados leves de maior porosidade foram sujeitos a diferentes condições de molhagem inicial, de modo a analisar a sua influência na qualidade da ITZ. Foram ainda analisados betões sujeitos a cura húmida e a condições severas de secagem. O estudo envolveu betões correntes da classe LC25/28 a LC40/44, no caso dos BEAL, e da classe C35/45 a C40/50 no caso dos BAN. Os betões foram caracterizados mecanicamente em termos de resistência à compressão, resistência à tracção por compressão diametral e resistência à tracção axial.

Em geral conclui-se que a forma como a ITZ influencia o comportamento mecânico do betão depende do tipo de agregado, constatando-se que os betões com agregados de maior porosidade e menor teor de humidade inicial tendem a desenvolver ITZs de melhor qualidade e ligações agregado-pasta mais fortes. A melhor qualidade da ITZ nos agregados de menor massa volúmica foi demonstrada nos ensaios mecânicos e de microscopia electrónica de varrimento. Em relação aos BAN, confirma-se que a incorporação de calcário conduz a ITZs de melhor qualidade, justificando a maior resistência à compressão e tracção atingida nestes betões, face aos BAN produzidos com agregados mais resistentes de natureza granítica.

Palavras-chave:

Zona de interface agregado-pasta (ITZ), agregados leves, resistência mecânica, aderência agregado-pasta, betões estruturais de agregados leves (BEAL).

Abstract

The present paper is devoted to study the influence of the interfacial aggregate-paste transition zone (ITZ) on the mechanical behaviour of structural lightweight aggregate concrete (SLWAC), taking into account different types of aggregates, concrete curing conditions and aggregate's pre-wetting conditions. Therefore, an extensive experimental campaign was carried out, involving mechanical characterization and aggregate-paste adhesion tests, complemented by qualitative analyses of scanning electron microscopy (SEM). The behaviour of SLWAC is compared to that of normal weight concrete (NWC) produced with different types of normal weight aggregates.

Three types of lightweight aggregates of distinct porosity and two types of normal weight aggregates were considered in concrete production. Lightweight aggregates of higher porosity were subjected to different initial wetting conditions, in order to analyse their influence on the ITZ's quality. Concretes subjected to moist-curing and severe drying conditions were also analysed. The most common structural concrete with compressive strength classes from LC25/28 to LC40/44 in SLWAC and from C35/45 to C40/50 in NWC were covered. The concretes were mechanically characterized, in terms of compressive strength, splitting tensile strength and direct tensile strength.

In general, it is concluded that the way ITZ influences the mechanical behaviour of concrete depends on the type of aggregate. It was found that concretes with aggregates of higher porosity and lower initial water content tend to develop ITZs of better quality, with stronger aggregate-paste bonds. The better quality of the ITZ in lightweight aggregates of higher porosity was shown by mechanical tests and SEM analysis. Regarding NWC, it was confirmed that the incorporation of lime gravel leads to ITZs of better quality, justifying the greater compressive and tensile strength achieved in these concretes, compared to NWC produced with stronger granitic aggregates.

Keywords:

Interfacial transition zone (ITZ), lightweight aggregates, mechanical properties, aggregate-paste bond, structural lightweight aggregate concrete (SLWAC).

Índice de texto

1.	Introdução.....	1
1.1.	Enquadramento	1
1.2.	Objectivos	2
1.3.	Metodologia e organização do trabalho	2
2	Estado de arte	4
2.1	Introdução.....	4
2.2	Zona de interface agregado-pasta	5
2.3	Factores que afectam as características da ITZ	6
2.4	Influência da ITZ nas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade do betão	10
2.5	Metodologias/ensaios para avaliação da qualidade da ITZ	12
3	Trabalho experimental.....	16
3.1	Introdução.....	16
3.2	Descrição do trabalho experimental.....	16
3.3	Materiais e composição das misturas	18
3.3.1	Materiais constituintes do betão e argamassas	18
3.3.2	Caracterização dos agregados.....	19
3.3.2.1	Análise granulométrica	20
3.3.2.2	Determinação da baridade.....	22
3.3.2.3	Determinação da massa volúmica	23
3.3.2.4	Determinação da absorção de água às 24 horas	24
3.4	Composição das misturas e produção de provetes	26
3.4.1	Preparação dos agregados	26
3.4.2	Produção dos provetes para caracterização mecânica dos betões.....	27
3.4.2.1	Mistura	27
3.4.2.2	Moldagem e compactação.....	28
3.4.3	Produção de provetes de reduzida dimensão para ensaios de tracção axial.....	29
3.4.3.1	Mistura.....	29
3.4.3.2	Moldagem e compactação.....	30
3.4.4	Produção de provetes para ensaios de aderência agregado-pasta	31
3.4.4.1	Mistura	32
3.4.4.2	Moldagem e compactação.....	32
3.4.5	Cura dos provetes	33

3.5	Ensaio de caracterização dos betões.....	34
3.5.1	Ensaio de caracterização dos betões no estado fresco.....	34
3.5.1.1	Determinação da massa volúmica fresca	35
3.5.1.2	Ensaio de abaixamento	35
3.5.2	Ensaio de caracterização dos betões no estado endurecido.....	36
3.5.2.1	Resistência à compressão.....	36
3.5.2.2	Resistência à tracção por compressão diametral	37
3.5.3	Resistência à tracção axial.....	38
3.5.4	Ensaio de aderência agregado-pasta.....	39
3.5.5	Caracterização da ITZ por microscopia electrónica de varrimento (MEV).....	40
4	Apresentação e discussão de resultados.....	41
4.1	Caracterização dos betões no estado fresco	41
4.2	Caracterização dos betões no estado endurecido.....	42
4.2.1	Resistência à compressão (<i>f_{cm}</i>).....	42
4.2.1.1	Superfícies de fractura.....	44
4.2.1.2	Influência das condições de cura.....	46
4.2.1.3	Influência das condições de molhagem inicial dos agregados.....	47
4.2.2	Resistência à tracção por compressão diametral (<i>f_{ctm, sp}</i>).....	48
4.2.2.1	Superfícies de fractura.....	49
4.2.2.2	Influência das condições de cura.....	51
4.2.2.3	Influência das condições de molhagem inicial dos agregados.....	52
4.2.3	Caracterização da interface agregado-pasta	53
4.2.3.1	Resistência à tracção axial em provetes de reduzida dimensão (<i>f_{ctm}</i>)	54
4.2.3.2	Ensaio de aderência agregado-pasta	60
4.2.4	Relação entre resistências mecânicas	68
4.2.5	Análise qualitativa da ITZ	71
5	Conclusões	77
5.1	Considerações finais	77
5.2	Conclusões gerais	77
5.3	Propostas para desenvolvimento futuro.....	80
	Bibliografia	81
	Anexos.....	87
	Anexo I - Ficha técnica - cimento Portland.....	89
	Anexo II - Baridade	91

Anexo III - Massa volúmica e absorção de água	92
Anexo IV - Resistência à compressão	94
Anexo V - Resistência à tracção por compressão diametral	95
Anexo VI - Resistência à tracção axial.....	96
Anexo VII - Ensaio de aderência agregado-pasta com composição de a/c 0,47.....	97

Índice de figuras

Figura 2.1 - Imagens MEV de betões com agregado leve de cinzas volantes (L: agregado leve; P: matriz cimentícia), adaptado de Nadesan e Dinakar 2018: a)relação a/c 0,35; b)relação a/c 0,55	13
Figura 2.2 - Imagens BSE de betões com agregado leve de cinzas volantes (L: agregado leve; S: areia; A: partículas de cimento não hidratadas), adaptado de Nadesan e Dinakar 2018: a)relação a/c 0,35; b)relação a/c 0,55.....	13
Figura 2.3 - Dureza da ITZ em torno da superfície dos agregados aos 28 dias (G: agregados graníticos; L: agregados de cinzas volantes), adaptado de Nadesan e Dinakar 2018.....	14
Figura 2.4 - Esquema representativo da execução do ensaio de corte, adaptado de Jebli et al. 2018: a)alinhamento do suporte e posicionamento do provete; b)posicionamento e fixação do sensor; c)aplicação da força de confinamento; d)ensaio ao corte puro	15
Figura 3.1 - Curvas granulométricas das areias e agregados grossos naturais.....	21
Figura 3.2 - Curvas granulométricas dos agregados leves.....	22
Figura 3.3 - Ensaio de medição da baridade do agregado leve Stalite	23
Figura 3.4 - Ensaio de medição da massa volúmica seca e da absorção de água do agregado leve Leca	24
Figura 3.5 - Curvas de absorção dos agregados leves (t = 3 h).....	25
Figura 3.6 - Curvas de absorção dos agregados leves (t = 24 h).....	26
Figura 3.7 - Moldes de betão após enchimento, vibração e alisamento.....	29
Figura 3.8 - Moldes de provetes prismáticos após enchimento, compactação e alisamento.....	31
Figura 3.9 - Conjunto resina-agregado antes da produção da argamassa final.....	33
Figura 3.10 - Provelte constituído por agregados de brita calcária embebidos em resina e argamassa a)antes do corte; b)depois do corte.....	33
Figura 3.11 - Exemplo de abaixamento - composição com Lytag	36
Figura 3.12 - Provelte de betão com agregado de brita calcária após ensaio de compressão aos 7 dias	37
Figura 3.13 - Provelte de betão com agregado leve Lytag antes do ensaio à tracção por compressão diametral.....	38
Figura 3.14 - Provelte prismático de Leca preparado para a realização do ensaio de tracção axial	39

Figura 4.1 - Evolução da resistência média à compressão dos betões analisados	42
Figura 4.2 - Resistência à compressão relativa dos BEAL face aos betões convencionais de igual composição aos 28 dias	43
Figura 4.3 - Superfície de fractura de provetes de betão com Leca previamente seca curados em água e ensaiados à compressão para as respectivas idades de ensaio.....	45
Figura 4.4 - Superfície de fractura de provetes de betão com Leca pré-saturada curados em água e ensaiados à compressão para as respectivas idades de ensaio.....	45
Figura 4.5 - Superfície de fractura de provetes de betão com Leca pré-saturada sujeitos a secagem e ensaiados à compressão para as respectivas idades de ensaio.....	45
Figura 4.6 - Superfície de fractura de provetes de betão com Lytag pré-saturada curados em água e ensaiados à compressão para as respectivas idades de ensaio.....	46
Figura 4.7 - Superfície de fractura de provetes de betão com Stalite pré-saturada curados em água e ensaiados à compressão para as respectivas idades de ensaio.....	46
Figura 4.8 - Superfície de fractura de provetes de betão com Brita calcária sujeitos a secagem e ensaiados à compressão para as respectivas idades de ensaio.....	46
Figura 4.9 - Superfície de fractura de provetes de betão com Brita calcária curados em água e ensaiados à compressão para as respectivas idades de ensaio.....	46
Figura 4.10 - Resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias, nos BEAL face aos betões convencionais de igual composição, para diferentes condições de cura	48
Figura 4.11 - Superfície de fractura típica de um provete com Stalite ensaiado à tracção por compressão diametral	49
Figura 4.12 - Superfície de fractura de betão com Leca pré-saturada curado em água e ensaiado à tracção por compressão diametral aos 28 dias.....	50
Figura 4.13 - Superfície de fractura de betão com Leca inicialmente seca curado em água e ensaiado à tracção por compressão diametral aos 28 dias	50
Figura 4.14 - Superfície de fractura de betão com Leca pré-saturada sujeito a secagem e ensaiado à tracção por compressão diametral aos 28 dias.....	50
Figura 4.15 - Superfície de fractura de betão com Lytag pré-saturada curado em água e ensaiado à tracção por compressão diametral aos 28 dias.....	51
Figura 4.16 - Superfície de fractura de betão com Stalite pré-saturada curado em água e ensaiado à tracção por compressão diametral aos 28 dias.....	51

Figura 4.17 - Superfície de fractura de betão com Brita calcária sujeito a secagem e ensaiado à tracção por compressão diametral aos 28 dias.....	51
Figura 4.18 - Superfície de fractura de betão com Brita calcária curado em água e ensaiado à tracção por compressão diametral aos 28 dias	51
Figura 4.19 - Superfície de fractura de betão com Leca pré-saturada pela ITZ.....	53
Figura 4.20 - Resistência à tracção axial aos 28 dias face aos betões convencionais com brita calcária de igual composição	55
Figura 4.21 - Fractura típica dos betões à tracção axial: a)fractura pela zona central do provete; b), c) e d)fractura pela ITZ em provete com esferas de vidro	55
Figura 4.22 - Transferência de tensões de tracção: a)Nos BAN; b)Nos BEAL	57
Figura 4.23 - Superfície de fractura de provete com Leca pré-saturada ensaiado à tracção axial (fractura maioritariamente através do agregado, mas também em situações esporádicas envolvendo a ITZ)	58
Figura 4.24 - Superfície de fractura de provete com Leca inicialmente seca ensaiado à tracção axial (fractura através do agregado).....	58
Figura 4.25 - Superfície de fractura de provete com Lytag pré-saturada ensaiado à tracção axial (superfícies de fractura envolvendo regiões em que esta atravessa o agregado, e outras em que atravessa a ITZ)	58
Figura 4.26 - Superfície de fractura de provete com Stalite pré-saturada ensaiado à tracção axial (superfícies de fractura envolvendo regiões em que esta atravessa o agregado, e outras em que atravessa a ITZ)	58
Figura 4.27 - Superfície de fractura de provete com Brita calcária ensaiado à tracção axial (fractura através do agregado)	59
Figura 4.28 - Superfície de fractura de provete com Brita granítica ensaiado à tracção axial (superfícies de fractura envolvendo maioritariamente a ITZ).....	59
Figura 4.29 - Superfície de fractura de provete com esferas de vidro ensaiado à tracção axial (Fractura através da ITZ, com destaque dos agregados).....	59
Figura 4.30 - Acção sobre as partículas de agregado durante os ensaios de aderência.....	60
Figura 4.31 - Relação entre a resistência à tracção dos agregados ($f_{ctm,agr}$) e a sua massa volúmica (MV_{agr})	61

Figura 4.32 - Fractura típica observada no ensaio de aderência: a)fractura pela zona de contacto resina-argamassa em provete com agregados calcários; b)superfície de fractura através dos agregados num provete com incorporação de Leca.....	62
Figura 4.33 - Incremento da área de aderência agregado-pasta devido ao posicionamento e forma alongada dos agregados.....	62
Figura 4.34 - Superfície de fractura de provete através dos agregados de Leca pré-saturada	63
Figura 4.35 - Superfície de fractura de provete através dos agregados de Leca inicialmente seca	63
Figura 4.36 - Superfície de fractura de provete através dos agregados de Lytag pré-saturada	63
Figura 4.37 - Superfície de fractura de provete através dos agregados de Stalite saturada	63
Figura 4.38 - Superfície de fractura de provete através dos agregados de Brita calcária.....	63
Figura 4.39 - Superfície de fractura de provete através dos agregados de Brita granítica	63
Figura 4.40 - Diferenças de porosidade entre partículas de Leca provenientes da mesma remessa..	64
Figura 4.41 - Superfície de fractura de provete a atravessar o agregado Leca pré-saturada com argamassa de a/c de 0,7	65
Figura 4.42 - Superfície de fractura atravessando o agregado e a ITZ. Stalite pré-saturada com argamassa de a/c de 0,7	65
Figura 4.43 - Superfície de fractura atravessando a ITZ. Brita calcária com argamassa de a/c de 0,765	
Figura 4.44 - Superfície de fractura atravessando a ITZ. Brita granítica com argamassa de a/c de 0,7	65
Figura 4.45 - Influência da forma e posicionamento do agregado no desenvolvimento das tensões média de aderência, que envolvem componentes de corte e de tracção.....	67
Figura 4.46 - Relação entre a resistência à tracção por compressão diametral e a resistência à compressão para os BEAL.....	68
Figura 4.47 - Relação entre a resistência à tracção axial e a resistência à compressão para os BEAL	69
Figura 4.48 - Relação entre a resistência à tracção axial e a resistência à tracção por compressão diametral para os BEAL.....	70
Figura 4.49 - Betão com Leca saturada: a)superfície polida; b) e c)superfície de fractura; d)EDS demonstrando a presença de etringite (AFt) assinalada em c)	72
Figura 4.50 - Betão com Leca seca: a)superfície polida; b) e c)superfície de fractura	72

Figura 4.51 - Betão com Stalite: a)superfície polida; b)superfície de fractura	73
Figura 4.52 - Betão com Lytag: a)superfície polida; b)superfície de fractura	73
Figura 4.53 - Betão com Brita calcária: a)superfície polida; b)superfície de fractura	74
Figura 4.54 - Betão com Brita granítica: a)superfície polida; b)superfície de fractura.....	74
Figura 4.55 - Superfície de fractura de betão com esferas de vidro: a)vista geral da zona de contacto com o berlinde; b)ampliação mostrando a grande concentração de cristais de etringite (AFt) na ITZ	75

Índice de tabelas

Tabela 3.1 - Ensaios de caracterização dos agregados e respectiva especificação	16
Tabela 3.2 - Ensaios de caracterização dos betões no estado fresco e endurecido.....	17
Tabela 3.3 - Síntese das diversas fases do trabalho experimental	17
Tabela 3.4 - Agregados utilizados na produção das misturas	19
Tabela 3.5 - Percentagem de agregado acumulado passado dos diferentes agregados	21
Tabela 3.6 - Valores da baridade, massa volúmica e absorção de água às 24h obtidos para os diferentes agregados.....	25
Tabela 3.7 - Composição das misturas formuladas durante o trabalho experimental.....	28
Tabela 3.8 - Composição das misturas formuladas para produção dos provetes para ensaios de aderência.....	32
Tabela 3.9 - Processo de cura, ensaios, número e dimensão dos provetes produzidos em cada fase do trabalho experimental.....	34
Tabela 4.1 - Valores da massa volúmica fresca, abaixamento, resistência à compressão e resistência à tracção por compressão diametral	41
Tabela 4.2 - Resultados aos 28 dias dos ensaios de tracção axial	54
Tabela 4.3 - Resultados aos 28 dias dos ensaios de aderência agregado-pasta para argamassas com relação a/c de 0,47	61
Tabela 4.4 - Resultados aos 28 dias dos ensaios de aderência agregado-pasta para argamassas com relação a/c de 0,7	64

Acrónimos

BEAL - Betão estrutural de agregados leves

BAN - Betão corrente de massa volúmica normal

ITZ - Zona de transição agregado-pasta (*Interfacial Transition Zone*)

SEM / MEV - Microscópio de varrimento electrónico

BSE - Electrões retrodifundidos

EBSD - Electrões difractados retrodifundidos

EDS/EDX - Detector de dispersão de energia

Simbologia

δ - Baridade

M.F. - Módulo de finura

D_{\max} - Dimensão máxima

D_{\min} - Dimensão mínima

kg - Quilograma

g - Grama

cm - Centímetro

mm - Milímetro

μm - Micrómetro

m^2 - Metro quadrado

mm^2 - Milímetro quadrado

m^3 - Metro cúbico

dm^3 - Decímetro cúbico

mm^3 - Milímetro cúbico

l - Litro

ml	- Mililitro
h	- Hora
min	- Minuto
s	- Segundo
°C	- Grau Celsius
C-S-H	- Silicato de cálcio hidratado
CH	- Hidróxido de cálcio
AFt	- Etringite
MPa	- Mega Pascal
kN	- Quilonewton
N	- Newton
f_{cm}	- Resistência média à compressão
$f_{ctm,sp}$	- Resistência média à tracção por compressão diametral
f_{ctm}	- Resistência média à tracção axial
F_b	- Força resistente agregado-pasta
F_R	- Força resistente do agregado
A_b	- Área de contacto entre agregado e a pasta
A_a	- Área traccionada dos agregados
ρ	- Massa volúmica
CV	- Coeficiente de variação

1. Introdução

1.1. Enquadramento

O betão é actualmente o material mais utilizado na construção. Esse estatuto resulta da versatilidade, baixo custo, facilidade de aplicação e adequado desempenho mecânico deste material. No entanto, um dos aspectos menos positivos do betão é o seu elevado peso volúmico, conduzindo a níveis de eficiência estrutural (resistência/massa volúmica) modestos face aos apresentados por outros materiais estruturais, como a madeira e o aço. Neste sentido, o betão estrutural de agregados leves (BEAL) aparece como solução alternativa ao betão corrente de massa volúmica normal (BAN).

Devido à sua menor massa volúmica, os BEAL são especialmente adequados para aplicações em que a carga permanente seja um factor condicionante, como edifícios altos, pontes de grande vão, pré-fabricação e reabilitação. Contudo, em aplicações correntes, estes materiais têm tido menos aceitação do que os BAN, devido sobretudo ao seu maior custo e menor experiência na sua utilização. Outros aspectos que podem ser menos positivos, apontados a estes betões, são a sua menor rigidez, maiores deformações diferidas e usualmente menor resistência mecânica face aos BAN.

No comportamento mecânico e de durabilidade dos BEAL, um dos aspectos usualmente salientado na literatura está relacionado com a melhor qualidade atingida na região de interface agregado-pasta (ITZ). A melhor interpenetração de pasta nos agregados leves de natureza porosa, a melhor compatibilidade elástica agregado-pasta e a cura interna promovida pelos agregados leves são os principais factores referidos para o aumento de qualidade desta região nos BEAL. Este aspecto é relevante, visto que o betão é um material trifásico, cujo comportamento depende da contribuição de cada uma das suas principais fases, nomeadamente o agregado, a pasta e a ITZ. Em betões correntes, em que o volume de agregados é superior a 65-70% do volume do betão, a ITZ mesmo que possua alguns μm de espessura, representa uma porção importante da pasta. De acordo com Neville (1997), a ITZ pode constituir até cerca de 50% do volume de pasta. Isso é igualmente salientado por Chandra e Berntsson (2003) que sugerem que a maioria da pasta concentra-se na zona de interface agregado-pasta.

Nos betões normais, a ITZ é considerada a região mais fraca, estando associada a maior porosidade. Porém, como referido, essa região deverá apresentar melhor qualidade nos BEAL. Embora este aumento tenha sido abordado por vários autores (Bogas 2011, Holm e Bremner 2000, Chandra e Berntsson 2003, EuroLightConR2 1998, ACI213R 2003, Elsharief et al. 2005), são ainda poucos os estudos que fazem uma avaliação quantitativa e comparativa da influência do tipo de agregado na qualidade da ITZ e subseqüentemente na forma como esse aspecto pode afectar o comportamento físico, mecânico e de durabilidade dos betões. Nesse sentido é importante desenvolver investigação adicional neste domínio, contribuindo para um melhor conhecimento da importância da ITZ nos BEAL, conforme foi objectivo do presente trabalho.

1.2. Objectivos

A presente dissertação teve como principal objectivo a caracterização da região de interface agregado-pasta de betões estruturais de agregados leves, tendo em consideração diferentes tipos de agregado leve e de massa volúmica normal, bem como pastas de diferentes composições. O trabalho envolve a realização de ensaios de caracterização mecânica das zonas de interface, incluído a análise microestrutural destas regiões. Para tal, foi planeada e realizada uma vasta campanha experimental, que visou, numa primeira fase, a produção e caracterização mecânica de betões produzidos com diferentes tipos de agregados com porosidades e texturas muito distintas, nomeadamente dois tipos de agregados de massa volúmica normal (natureza calcária e granítica), dois tipos de agregados de argila expandida, um agregado leve de cinzas sinterizadas, um agregado leve de ardósia expandida, um agregado de vidro de referência. Os BEAL analisados integraram três tipos de agregados leves de porosidade e massa volúmica distinta, de forma a abranger uma vasta gama de betões leves estruturais correntes. Com o objectivo de comparar o comportamento relativo dos BEAL face aos BAN, foram considerados dois tipos de agregados de massa volúmica normal usualmente utilizados em Portugal. Para além do tipo de agregados, fez-se ainda variar o tipo de cura a que os provetes foram sujeitos até à respectiva data de ensaio, bem como as condições de pré-molhagem dos agregados leves, de modo a analisar a influência destes factores nas características da ITZ. A caracterização mecânica envolveu ensaios de resistência à compressão, resistência à tracção por compressão diametral e resistência à tracção axial, com análise do modo de fractura e possível contribuição da região de interface.

Numa segunda fase, foram idealizados ensaios de aderência agregado-pasta de modo a permitir uma melhor quantificação e avaliação das características das ITZ formadas para cada um dos vários tipos de agregados estudados neste trabalho. Finalmente, os ensaios mecânicos foram ainda complementados por uma análise qualitativa da microestrutura da ITZ, recorrendo a microscopia de varrimento electrónico.

Assim, os resultados obtidos neste estudo visam permitir uma melhor compreensão da influência das características físicas dos diferentes tipos de agregados nas propriedades da matriz circundante, com influência directa na durabilidade e comportamento mecânico dos betões.

1.3. Metodologia e organização do trabalho

A estrutura do presente trabalho de investigação foi dividida em quatro fases. Numa primeira fase, realizou-se o trabalho de pesquisa bibliográfica, que consistiu na recolha e interpretação de informação sobre o tema em questão, com o intuito de adquirir e consolidar conhecimentos teóricos e práticos acerca do mesmo.

A segunda fase consistiu no planeamento e preparação da campanha experimental. Durante esta fase foram seleccionados e definidos os materiais a utilizar, bem como os ensaios de caracterização a realizar, e foi estabelecida a calendarização das várias etapas do trabalho experimental.

A terceira fase coincidiu com a realização do trabalho experimental, incluindo os ensaios de caracterização dos agregados, produção dos betões, moldagem dos provetes e caracterização dos betões no estado fresco e endurecido.

Na fase final, procedeu-se à interpretação e discussão dos resultados obtidos ao longo da campanha experimental e respectiva redacção do documento final, que foi dividido em cinco capítulos, sendo o primeiro referente à introdução e o último às principais conclusões e propostas de desenvolvimentos futuros.

No capítulo 2 é apresentada a pesquisa bibliográfica, onde se descreve de forma resumida, os principais trabalhos de investigação desenvolvidos no domínio da caracterização da ITZ, nomeadamente nos BEAL. Inicialmente foi realizado um breve enquadramento das principais características dos BEAL. De seguida, foram descritas as características e influência da ITZ no comportamento físico e mecânico do betão. Finalmente foram abordados alguns métodos de observação e caracterização desta região. O capítulo 3 descreve de forma pormenorizada os materiais, composições e procedimentos de ensaio adoptados ao longo da campanha experimental. No capítulo 4 procede-se à apresentação e discussão dos resultados obtidos no trabalho experimental, analisando-se a influência do tipo de agregado no desenvolvimento da ITZ.

2 Estado de arte

2.1 Introdução

Apesar da aplicação de betão leve ter assumido maior importância apenas após meados do séc. XX, as primeiras construções com este tipo de material datam de há mais de 3000 anos a.C.. À data este material era obtido através da utilização de agregados naturais de origem vulcânica, como pedrapomes ou escórias (Chandra e Berntsson 2003). Durante o império Romano, há cerca de 2000 anos atrás, o betão, nomeadamente o betão leve, (ACI213R 2003, Chandra e Berntsson 2003, Bogas 2011) foi aplicado com sucesso na construção do Porto de Cosa, da Cúpula do Panteão de Roma e do Coliseu de Roma. Estas estruturas subsistiram até aos dias de hoje em bom estado de conservação (ACI213R 2003, Chandra e Berntsson 2003). Como o nome indica, o principal objectivo da utilização deste tipo de betão era o de reduzir as cargas permanentes da estrutura (ACI213R 2003, Chandra e Berntsson 2003).

Durante vários séculos este material permaneceu esquecido. Apenas no início do século XX, aquando a comercialização dos primeiros agregados leves artificiais (Stephen J. Hayde em 1928) e devido ao sucesso da sua utilização na indústria marítima durante as duas guerras mundiais (ACI213R 2003, Chandra e Berntsson 2003, Holm e Bremner 2000), voltou a ser utilizado a indústria da construção.

Actualmente, a utilização de betão estrutural de agregados leves (BEAL) desperta grande interesse em obras especiais, edifícios de grande porte e no domínio da reabilitação, onde a redução de carga permanente é um objectivo importante. Tem portanto existido um crescente investimento na investigação e desenvolvimento deste tipo de material (Chandra e Berntsson 2003, Bogas et al. 2017a).

A massa volúmica do betão leve pode variar num amplo espectro, desde cerca de 300 a 2000 kg/m³ (Bogas 2011, Holm 2000, NP EN 206, ACI213R 2003). A redução de massa volúmica pode ser obtida através da introdução de ar na pasta, conduzindo a “betões celulares”, através da exclusão total ou parcial de agregados finos, obtendo-se “betões sem finos”, ou da forma mais usual e eficiente, através da substituição de agregados de massa volúmica normal por agregados porosos, nomeadamente na produção de “betão com agregados leves” (Neville 1995). Neste caso, apenas os betões com agregados leves são adequados para fins estruturais, podendo obter-se betões de fraca a elevada resistência, consoante o tipo de agregado utilizado (ACI213R – 87 (reaprovado em 1999, Bogas 2011).

Para além da redução de carga permanente, outras vantagens associadas à aplicação de betão leve são a redução da condutibilidade térmica, facilidade de transporte, redução da acção sísmica, maior resistência ao fogo, capacidade de flutuação (Chandra e Berntsson 2003, ACI213R 2003, Holm 2000, Bogas 2011). Porém, são igualmente apontadas desvantagens que têm condicionado ou limitado a utilização de betões leves em grande escala. Estas limitações incluem maior custo de produção,

maior deformabilidade, maior deformação diferida, maior dificuldade de controlo da mistura e trabalhabilidade do betão e, em geral, menor resistência mecânica face a betões convencionais de igual composição.

No comportamento mecânico e durabilidade dos BEAL, um dos aspectos que é usualmente salientado no desempenho diferenciado destes betões é a melhor qualidade desenvolvida na região de interface agregado-pasta. Esta justifica-se pela interpenetração de pasta nos agregados leves de natureza porosa, a melhor compatibilidade elástica agregado-pasta e a capacidade de cura interna promovida pelos agregados leves no betão, são alguns dos factores que justificam esta tendência apontada para os BEAL.

Nos próximos pontos aborda-se em maior detalhe a caracterização destas regiões e a sua importância no betão, visto que é neste domínio que se desenvolve o presente trabalho. É igualmente objectivo do presente capítulo apresentar o conhecimento adquirido pela comunidade científica relativamente às características da região de interface agregado-pasta de betões estruturais de agregado leve. Para tal, descrevem-se as investigações experimentais de maior interesse para a presente dissertação, bem como as respectivas conclusões e resultados obtidos nesses trabalhos.

2.2 Zona de interface agregado-pasta

O betão sendo um material compósito, é formado pela mistura de agregados, grossos e finos, cimento, água, adições e adjuvantes, na qual se formam várias interfaces. Existem vários termos para definir a região de ligação agregado-pasta, nomeadamente: “zona de contacto”, “zona de transição”, “zona de interface” ou, a mais utilizada “zona de transição interfacial” (*interfacial transition zone* – ITZ) (Mehta e Monteiro 2006, Neville 1995).

Hoje em dia, é aceite pela maioria dos investigadores que as características morfológicas da camada de pasta na imediação das partículas de agregado grosso são distintas das da matriz cimentícia, influenciando directamente o comportamento do betão de tal forma, que são consideradas três fases nos modelos de estudo do betão - matriz cimentícia, agregado e zona de transição agregado-pasta (Ollivier et al.1995, Sidorova et al. 2014, Mehta e Monteiro 2006). Assim, torna-se fundamental o estudo e caracterização da zona de transição agregado-pasta (ITZ), incluindo do ponto de vista microestrutural.

Como referido, o betão, do ponto de vista microestrutural, deve ser analisado considerando três fases: os agregados, a matriz cimentícia e a interface entre estes (ITZ). Embora seja usual considerar-se que a ITZ apresenta em média cerca de 50 μm de espessura, as maiores diferenças entre a matriz cimentícia e a zona de transição ocorrem até cerca de 20 μm de distância da superfície do agregado (Mehta e Monteiro 2006, Maso 1996). Segundo Maso (1996) a região mais frágil da zona de transição localiza-se entre 5 a 10 μm da linha de separação física agregado-pasta. Similarmente, Liao (2004) identificou, através de imagens obtidas por microscopia electrónica a zona

mais porosa da ITZ até 15 μm da superfície do agregado, apesar desta região se estender a maior distância embora com menor porosidade.

Nos betões de massa volúmica normal, a ITZ é muitas vezes considerada a zona mais fraca do compósito, uma vez que apresenta regra geral duas a três vezes mais porosidade que a matriz cimentícia (Ollivier, et al., 1995, Maso 1992, Maso 1996 Holm e Bremner 2000, Mehta e Monteiro 2006, Vaysburd 1992). Adicionalmente a quantidade e dimensão de cristais de hidróxido de cálcio (CH) e etringite (AFt) são também mais elevadas.

Vários autores atribuem as piores características da ITZ, à formação de filmes de água na superfície dos agregados (principalmente nas superfícies inferiores por efeito de exsudação) quando o betão se encontra no estado fresco. Este efeito conduz ao incremento local da relação a/c (Mehta e Monteiro 2006, Maso 1996, Chandra e Berntsson 2003) e é mais visível nas imediações dos agregados grossos, especialmente se dotados de geometria alongada e achatada. Estas zonas adquirem maior porosidade, em resultado da dissolução de sulfato de cálcio e dos compostos de aluminato de cálcio. Surgem assim na pasta iões cálcio, sulfato, hidróxido e aluminato que posteriormente se combinam, originando AFt e CH de dimensão considerável e preferencialmente orientados. Como consequência deste fenómeno, a zona de transição agregado-pasta apresenta uma estrutura mais porosa e mecanicamente menos resistente do que a matriz cimentícia (Ollivier, et al. 1995, Mehta e Monteiro 2006). Com a progressiva hidratação da pasta, cristais de C-S-H e cristais mais pequenos de AFt e CH de segunda geração começam a preencher os grandes espaços vazios deixados pelos cristais de maior dimensão formados anteriormente, aumentando a compacidade, sem que no entanto se atinja a densidade da pasta em regiões fora da ITZ (Mehta e Monteiro 2006, Maso 1992). Outra razão apontada para a menor qualidade da ITZ está relacionada com o conhecido “efeito de parede” introduzido pelos agregados em relação à pasta (Scrivener et al. 2004, Neville 1995,). Scrivener et al. (2004) realça a dificuldade de se atingirem níveis de compacidade satisfatórios das partículas de cimento junto da superfície dos agregados grossos. O arranjo das partículas de cimento não hidratado é dificultado, originando zonas de maior porosidade.

2.3 Factores que afectam as características da ITZ

As características da ITZ estão dependentes de diversos factores como o tipo, geometria e textura do agregado (Maso 1996, Chandra e Berntsson 2003, Sidorova et al. 2014, Mehta e Monteiro 2006), a presença de adições na mistura (Goldman e Bentur 1992, Maso 1992), a idade do betão (Liao et al. 2004), a relação a/c da matriz cimentícia e outros parâmetros de composição da mistura (Li et al. 2012, Sidorova et al. 2014).

Segundo Sidorova et al. (2014), a relação a/c da mistura e a natureza do agregado condicionam a microestrutura e propriedades mecânicas da zona de transição agregado-pasta. Ao incrementar a relação a/c, a espessura da zona de transição aumenta substancialmente, apresentando maior porosidade, cristais de CH de maiores dimensões e maior desenvolvimento de etringite. Como consequência do enfraquecimento da região de interface, os autores reportam uma diminuição do

módulo de elasticidade face à pasta mais afastada da superfície do agregado. Através de ensaios de nanoindentação e de imagens de microscopia electrónica, os autores observaram a possível influência do agregado nas características da ITZ. Tendo em conta amostras com diferentes tipos de agregado (agregado de origem calcária; agregado reciclado; agregado obtido a partir de elementos cerâmicos), verificam que apenas nos agregados calcários foi identificado de forma clara a zona de transição. Neste caso, a pasta localizada junto ao agregado apresentou características distintas, com formação de uma ITZ de pior qualidade. A maior porosidade dos agregados reciclados e dos agregados cerâmicos foi a justificação atribuída pelos autores para a melhor qualidade da ITZ atingida nos betões produzidos com estes agregados.

Li et al. (2012), comparou duas abordagens distintas de misturar os componentes do betão durante a sua produção, e as consequências de cada abordagem nas características da ITZ. Em ambas as abordagens foram utilizados agregados reciclados. A análise da ITZ foi efectuada através de ensaios de nanoindentação e observação em microscópio electrónico de varrimento (MEV). A primeira mistura foi realizada em duas fases: numa primeira etapa o cimento e o agregado grosso foram misturados durante 1 minuto, seguido da adição-de metade da água de mistura e mistura adicional de 1 minuto; na segunda etapa adicionou-se à mistura a restante água e o agregado fino. A segunda mistura consistiu na introdução do cimento, agregado fino e água em simultâneo. Através de observação MEV, os autores identificaram zonas de transição claramente mais densas para a segunda mistura, caracterizadas por microestrutura mais homogénea e com menores cristais de CH. A redução da porosidade da ITZ resultou numa melhoria em termos de resistência mecânica, comprovada pelos ensaios de nanoindentação. De acordo com os autores, este método, permite uma redução dos filmes de água que se formam na superfície do agregado grosso.

Vários autores salientam a possível reactividade entre o agregado de origem calcária e o cimento Portland (Mehta e Monteiro 2006, Ollivier et al. 1995). Segundo Farran (1956), citado por Ollivier et al. (1995), ocorre uma reacção química entre a calcite e os componentes da pasta, que promove uma melhor aderência superficial do agregado à pasta. Mehta e Monteiro (2006) reportaram uma reacção semelhante, sugerindo a formação de carbo-aluminato hidratado, devido a reacções entre a pasta de cimento e o agregado. Como consequência dessa reacção, identificam uma notória redução dos cristais de CH e da porosidade da ITZ, bem como uma melhoria na adesão superficial entre as duas fases.

Face aos betões de massa volúmica normal, a ITZ nos BEAL tende a apresentar melhor qualidade (Chandra e Berntsson 2003, Wasserman e Bentur 1996, Bogas 2011). Na maioria dos casos, a resistência da ITZ tende a ser superior à capacidade resistente do agregado, sendo pouco comum o desenvolvimento preferencial da superfície de fractura através da ITZ. Vários autores apontam a porosidade superficial dos agregados leves, como principal motivo para a melhor qualidade da ITZ nos BEAL, permitindo uma ligação física agregado-pasta mais forte e um melhor equilíbrio de humidade entre as duas fases. Este maior equilíbrio de humidade impede que se formem filmes de água na superfície do agregado, eliminando o fenómeno de exsudação comum em agregados de

massa volúmica normal (Chandra e Berntsson 2003, Wasserman e Bentur 1996, Lo et al. 2007). Consequentemente, diminui a relação a/c local e as interfaces agregado-pasta são mais compactas.

Wasserman e Bentur (1996), realçam o incremento da aderência mecânica entre as partículas de agregado leve e a pasta, consequência da interpenetração da pasta na superfície porosa do agregado. Em alguns trabalhos verificou-se inclusivamente a formação de produtos de hidratação no interior dos agregados, indiciando a ocorrência de interpenetração da pasta nas partículas de agregado, principalmente em partículas com maior porosidade superficial (Chandra e Berntsson 2003, Lo et al. 2007, Bogas 2011, Nadesan e Dinakar 2018). Isso foi demonstrado por Bogas (2011) tendo por base a observação MEV de betões produzidos com diferentes tipos de agregados leves.

Os BEAL beneficiam ainda da maior compatibilidade elástica entre o agregado e a pasta, visto que existe uma menor diferença entre o módulo de elasticidade das duas fases. Desse modo, sob acções mecânicas ou diferidas, desenvolve-se menos microfendilhação na interface agregado-pasta, o que contribui para uma melhor qualidade e maior integridade destas regiões (ACI301-05), (Bogas, 2011).

Chandra e Berntsson (2003) observaram a microestrutura da zona de transição agregado-pasta em betões com agregados de argila expandida, com e sem presença de orla exterior mais densa. Segundo os autores, as diferenças foram evidentes. Nos BEAL com agregados de orla exterior densa, a microestrutura da ITZ era porosa, assemelhando-se às ITZs dos betões com agregado convencional. Por outro lado, os agregados com superfície mais porosa exibiram zonas de transição mais densas. Os resultados obtidos por Chandra e Berntsson (2003) estão de acordo com o reportado por outros autores (Wasserman e Bentur 1996, Lo et al. 2007), confirmando-se que os agregados leves porosos originam regiões de interface agregado-pasta de melhor qualidade devido à mais eficiente interpenetração das duas fases.

A rugosidade superficial dos agregados leves contribui também para o incremento da aderência agregado-pasta, melhorando a ligação entre estas duas fases (Bogas 2011). No entanto, os fenómenos de interpenetração da pasta e eliminação da exsudação na superfície do agregado leve deverão assumir maior relevância nas características da ITZ.

Outro factor relevante para a melhoria de qualidade da ITZ está relacionado com o fenómeno de “cura interna” introduzido pelos agregados leves. As partículas de agregado funcionam como reservatórios de água dispersos pela matriz cimentícia, que após o endurecimento da pasta vão libertar a água existente no seu interior para a mistura. Desse modo, ocorre uma hidratação da pasta cimentícia na região de interface mais eficiente (Bentz e Snyder 1999).

Alguns autores sugerem que devido à melhor qualidade da interface agregado-pasta, os BEAL podem apresentar propriedades de transporte semelhantes ou ligeiramente superiores às dos betões correntes, apesar destes possuírem menor porosidade global (Bogas 2011). De facto, devido à boa qualidade da ITZ, a penetração da água nos BEAL ocorre preferencialmente pela matriz cimentícia, ao contrário do que sucede tipicamente nos betões de massa volúmica normal, em que a ITZ governa este mecanismo (Bogas 2011).

O teor de humidade inicial nos agregados leves parece também afectar a qualidade da ITZ, reportando-se diferentes comportamentos dos BEAL em função deste parâmetro (Chandra e Berntsson 2003, Wasserman e Bentur 1996). Por exemplo, a prévia saturação dos agregados tende a diminuir a capacidade de absorção do agregado e consequentemente os fenómenos de interpenetração e eliminação da exsudação superficial, originando zonas de transição mais porosas. Por sua vez, a introdução de agregados inicialmente secos na mistura pode conduzir à libertação de pequenas bolhas de ar que resultam da absorção do agregado durante a fase inicial da amassadura. No entanto, alguns autores sugerem que estes efeitos tendem a não assumir grande relevância, pelo menos na maioria dos casos correntes (Bogas 2011). Tendo por base observações MEV, Bogas (2011) apenas verificou a formação esporádica de pequenos poros na interface de agregados inicialmente secos, concluindo que as condições de molhagem inicial do agregado não provocam grandes diferenças na microestrutura da ITZ. Bogas (2011) verificou que, face aos BEAL produzidos com agregados inicialmente secos, ocorre uma redução de cerca de 8% na resistência à compressão aos 7 dias de idade em betões cujos agregados foram previamente saturados. Porém, aos 28 e 90 dias de idade as diferenças de resistência foram pouco significativas, indiciando uma maior importância da zona de interface nas idades iniciais.

A possibilidade de alguns agregados desenvolverem reacções pozolânicas superficiais com a pasta tem sido alvo de estudo e ainda não reúne consenso entre a comunidade científica. De acordo com Khokhorin (1993), citado por Chandra e Berntsson (2003) as reacções pozolânicas que ocorrem na superfície do agregado são responsáveis pelo aumento da compacidade na zona de interface. Por sua vez, Chandra e Berntsson (2003) utilizam o termo “vidrado” para descrever a superfície dos agregados leves, que resulta do processo de queima a que este tipo de agregados são sujeitos durante o seu processo de fabrico. Esta fase amorfa dos agregados possui, por esse motivo, propriedades pozolânicas e assim, poderá reagir quimicamente com produtos resultantes da hidratação do cimento, nomeadamente hidróxido de cálcio. No entanto, em face da elevada área superficial dos agregados, sugere-se que a reactividade pozolânica seja um efeito de menor importância (Bogas 2011).

Goldman e Bentur (1992) reportam uma melhoria considerável da zona de transição agregado-pasta após incorporarem na mistura partículas ultra finas de sílica de fumo. Para tal, contribui o efeito de filler proporcionado pela sílica fumo, bem como a redução local da relação a/c, proporcionando a densificação da ITZ. Esta redução da porosidade na zona de transição decorrente da utilização de adições ultrafinas contraria o “efeito de parede” referido. A nucleação e reactividade da sílica de fumo contribuem também para a redução de cristais de CH e melhoria da qualidade da ITZ (Bogas 2011). Liao et al. (2004) investigaram a influência do tempo de cura na ITZ de betões de elevada resistência, submergindo o betão, em água saturada com hidróxido de cálcio durante a cura. Importa referir que na produção do betão foram introduzidas cinzas volantes do tipo F e foi utilizado superplastificante. Os autores verificaram que a grande porosidade e concentração de AFt e CH existente nas idades iniciais do betão (1 a 7 dias), vai gradualmente desaparecendo devido ao preenchimento dos poros pelos produtos de hidratação C-S-H resultantes das reacções pozolânicas, sendo que este fenómeno

tem maior influência a partir dos 28 dias. Conclusões semelhantes foram obtidas por Wasserman e Bentur (1997).

Alguns estudos têm sido realizados com o objectivo de caracterizar a zona de transição agregado-pasta em betões com agregados reciclados, salientando-se a importância deste aspecto no comportamento deste tipo de betões (Xiao et al. 2013, Sidorova et al. 2014, Li et al. 2012). A grande diferença nos betões reciclados face aos betões convencionais, reside no facto de apresentarem uma zona de transição adicional localizada entre a nova pasta e o agregado reciclado, que por sua vez possui uma zona de transição entre o agregado e a pasta originais. Através de ensaios de nanoindentação e observações MEV, Xiao et al (2013) estimaram a espessura das zonas de transição em betões com agregados reciclados. Os autores estimaram as espessuras das antigas e novas ITZs em aproximadamente 40-50 μm e 55-65 μm , respectivamente, ambas com elevada porosidade e elevadas concentrações de CH. Por sua vez, Li et al (2012) constataram a ocorrência de interpenetração de pasta nova para o interior da pasta antiga que fazia parte integrante do agregado reciclado, conduzindo a uma nova zona de transição de melhor qualidade. Lee e Choi (2013) reportam diminuição da resistência à compressão e tracção de 16% e 11%, respectivamente, face aos betões de referência com agregado natural. Verificaram que a superfície de fractura decorrente dos ensaios de compressão e tracção desenvolveu-se através da zona de transição nos betões correntes, enquanto no caso dos betões com agregados reciclados a rotura desenvolveu-se maioritariamente através dos próprios agregados reciclados. A ITZ nos betões reciclados apresentava fendilhação acentuada, separando-se com maior facilidade os agregados reciclados da matriz cimentícia do que no caso dos agregados naturais. Os autores verificaram que a região de transição mais antiga era a mais fraca devido à maior porosidade e fendilhação desenvolvidas durante o processo de produção do agregado reciclado.

2.4 Influência da ITZ nas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade do betão

A ITZ é muitas vezes considerada a “zona fraca” do betão, sendo-lhe atribuído esse estatuto devido às suas limitações, nomeadamente:

- Microestrutura composta por grandes cristais de hidróxido de cálcio preferencialmente orientados e por etringite;
- Maior porosidade do que o interior da pasta;
- Zona preferencial de formação das primeiras microfissuras no betão, mesmo sem qualquer estímulo externo, em resultado da sua menor qualidade e da incompatibilidade elástica agregado-pasta (Alexander 1996, Neville 1995, Maso 1992).

O estudo da ITZ é, por estas razões, fundamental para compreender o comportamento do betão, em termos físicos, mecânicos e de durabilidade.

O betão é tanto mais “durável” (isto é, mantém as características de projecto durante um maior período de tempo), quanto mais resistente à penetração de agentes agressivos e à acção de agentes

exteriores como a temperatura ou a ciclos de gelo-degelo. Este facto aplica-se a todas as partes constituintes do betão, inclusivamente às zonas de transição agregado-pasta (Massazza 1996).

Ao estar associada a maiores níveis de microfendilhação e porosidade a ITZ é mais permeável. Por esse motivo tem influência directa na durabilidade do betão. A influência da ITZ nas propriedades de transporte do betão assume especial relevância quando interfaces de agregados vizinhos contactam entre si e a porosidade é interconectada, desenvolvendo-se caminhos preferenciais para a penetração de água e agentes agressivos (como cloretos, dióxido de carbono e outros elementos químicos), colocando em risco a integridade do betão (Chandra e Berntsson 2003, Massazza 1996).

São relativamente limitadas as investigações acerca da influência da ITZ no comportamento do betão sob ciclos de gelo-degelo. Porém, segundo Massazza (1996), é possível concluir que a resistência do betão a este tipo de acções, depende maioritariamente da resistência da ITZ. Holm e Bremner (2000) alertam para a precoce deterioração do betão devido a acções de gelo-degelo. Como referido anteriormente, a ITZ está muitas vezes associada à formação de microfissuras e elevada porosidade, que por si só torna o betão permeável, e por isso susceptível à penetração de água. Se a água preencher estes vazios e congelar no seu interior, resultará na destruição do betão. Outro problema associado à microfendilhação e porosidade em betões é a despassivação das armaduras em ambiente marítimo, colocando em causa a integridade das estruturas (Holm e Bremner 2000).

A capacidade resistente do betão é também fortemente afectada pelas características das ITZs (Alexander 1996, Demie 2013, Chandra e Berntsson 2003, Massazza 1996). Massazza (1996) aponta que a resistência à compressão de betões correntes é inferior à dos seus constituintes (agregado e pasta cimentícia). Isto sugere que essa perda de resistência resulta da má ligação entre os mesmos, devido às piores características que a ITZ pode apresentar. Por sua vez, Mehta e Monteiro (2006) afirmam que a porosidade de cada material que constitui o betão limita a resistência global. No caso de betões correntes, em que agregados naturais de massa volúmica normal são utilizados, essa resistência é condicionada pela porosidade da matriz cimentícia e pela ITZ.

Muitos estudos demonstram que a melhoria da ligação agregado-pasta se reflecte de forma positiva na capacidade resistente do betão, em tracção, compressão ou flexão (Alexander 1996, Demie 2013, Chandra e Berntsson 2003, Massazza 1996). Chandra e Berntsson (2003) reportam um aumento da resistência do betão, que advém de uma ligação mais forte entre a pasta e o agregado. Também Samuel Demie (2013) verificou que ao utilizar dosagens mais altas de superplastificante (6 a 7%) aumenta a compacidade da ITZ, traduzindo-se no incremento da resistência mecânica à compressão. Wasserman e Bentur (1996) verificaram que betões produzidos com agregados leves mais absorventes apresentam maior resistência à compressão inicial. Tendo por base observações MEV, os autores atribuíram estes resultados à maior densificação atingida na ITZ dos betões com agregados leves de maior capacidade de absorção.

2.5 Metodologias/ensaios para avaliação da qualidade da ITZ

O estudo da microestrutura do betão é essencial para o conhecimento do comportamento do betão. Actualmente são diversos os recursos tecnológicos disponíveis para a caracterização do betão a nível microscópico. Não só é possível observar as características microscópicas do betão, como é inclusivamente possível a sua caracterização mecânica a uma “escala onde a química e a engenharia se reúnem” (Constantinides et al. 2003).

Um dos métodos mais utilizados para observação microscópica do betão, nomeadamente da ITZ, consiste na análise de imagens de alta resolução, obtidas por microscopia electrónica de varrimento (observações MEV). Estas imagens são produzidas a partir de um feixe de electrões que varre a superfície da amostra, interagindo com ela. Este é um método não destrutivo, pelo que permite várias observações sobre a mesma amostra sem danificar a superfície da mesma.

Os electrões que compõem o feixe de electrões, possuem energia cinética e ao colidirem com a superfície da amostra, essa energia é dissipada na forma de sinais. A leitura desses sinais permite recolher informação sobre a superfície da amostra. Esses sinais incluem: electrões secundários; electrões retrodifundidos (BSE); electrões difractados retrodifundidos (EBSD); fótons.

Diferentes características da microestrutura são obtidas através da leitura de cada tipo de sinal. Electrões secundários são utilizados para produção de imagens topográficas, a partir das quais é possível obter informação sobre a morfologia e relevo da superfície da amostra e das fases que a constituem. A recolha e interpretação dos electrões retrodifundidos permite a reprodução de imagens com informação da composição da superfície amostra, em função do número atómico dos elementos da superfície da amostra (contraste químico). Este tipo de informação é importante para a interpretação e distinção de fases. A ampliação das imagens BSE pode ser desde 20 a 10000x aproximadamente, o que pode ser interessante, na medida em que se pode contextualizar as diferentes visualizações.

Um detector de dispersão de energia (EDS/EDX) quando acoplado ao MEV, permite analisar o espectro de fótons resultantes da colisão do feixe de electrões com a amostra. Através dessa análise é possível a formulação de imagens do tipo raio-X de uma área de microns, e determinar a composição elementar da amostra. Este tipo de informação é importante para a identificação e determinação da abundância de um determinado elemento.

Na Figura 2.1 apresentam-se dois exemplos de imagens MEV típicas, obtidas por Nadesan e Dinakar (2018), onde se observa a ITZ desenvolvida entre os agregados leve de cinzas volantes e a matriz cimentícia de duas amostras em que se fez variar a relação a/c.

Na Figura 2.2, ilustram-se dois exemplos de imagens BSE típicas, obtidas por Nadesan e Dinakar (2018), onde se observa a ITZ desenvolvida em amostras contendo agregado leve de cinzas volantes com diferentes relações a/c.

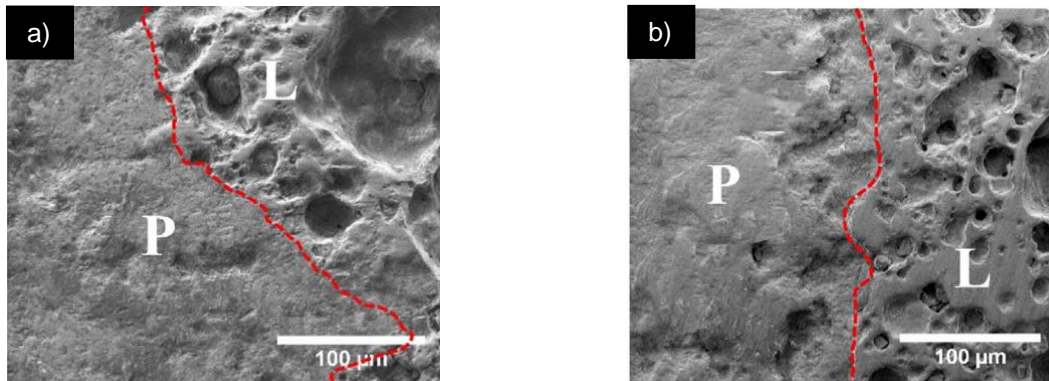


Figura 2.1 - Imagens MEV de betões com agregado leve de cinzas volantes (L: agregado leve; P: matriz cimentícia), adaptado de Nadesan e Dinakar 2018: a)relação a/c 0,35; b)relação a/c 0,55

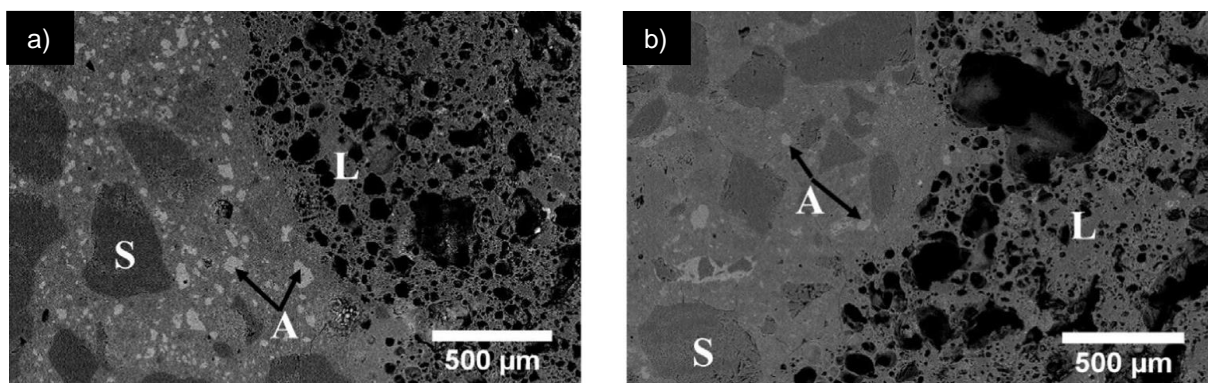


Figura 2.2 - Imagens BSE de betões com agregado leve de cinzas volantes (L: agregado leve; S: areia; A: partículas de cimento não hidratadas), adaptado de Nadesan e Dinakar 2018: a)relação a/c 0,35; b)relação a/c 0,55

A caracterização mecânica de uma região tão fina como a zona de transição agregado-pasta é possível através de ensaios designados por ensaios de indentação (microdureza) ou nanoindentação. Estes ensaios consistem na medição da deformação imposta na superfície da amostra, resultante da aplicação de uma carga conhecida. (Constantinides et al. 2003, Fischer-Cripps 2011). Os indentadores podem apresentar diferentes formas ou geometrias, nomeadamente piramidais, cónicas ou esféricas e, como tal, são uma versátil ferramenta no que toca à caracterização mecânica de reduzidos volumes de betão (Constantinides et al. 2003). Os tipos de indentadores mais utilizados são o indentador de Berkovich, Vickers e Knoop.

O indentador de Berkovich é um indentador piramidal de três faces, utilizado em estudos de indentação de escalas muito reduzidas, como nanoindentação. A sua concepção prende-se com a maior facilidade da união de três faces em apenas um ponto, em comparação com indentadores piramidais de quatro faces (Fischer-Cripps 2011). Verificou-se que o indentador de Berkovich foi o mais utilizado nos ensaios de nanoindentação realizados nas investigações experimentais descritas na presente literatura.

O indentador de Vickers apresenta uma geometria piramidal de quatro faces, cuja geometria permite um ângulo entre o indentador e o plano da amostra de 22° (Fischer-Cripps 2011). Este tipo de indentador é normalmente utilizado nos ensaios de microdureza.

O indentador de Knoop é também um indentador piramidal de quatro faces, porém apresenta 2 pares de faces distintas. Originalmente foi concebido para o ensaio de amostras de maior resistência, uma vez que a sua geometria facilita a leitura da área de contacto em impressões de penetrações excepcionalmente reduzidas. Actualmente, a sua utilização tem especial interesse no estudo da anisotropia da amostra (Fischer-Cripps 2011).

Na Figura 2.3, apresenta-se um exemplo de curvas de dureza da interface agregado-pasta em função da distância ao agregado, obtidas por Nadesan e Dinakar (2018), através de ensaios de microdureza aos 28 dias, com um indentador do tipo Vickers. Os provetes ilustrados foram produzidos com agregados de origem granítica e com agregados leves de cinzas volantes (representado na figura como 'G' e 'L', respectivamente). Os números 25, 35, 45, 55, 65 e 75 designam a correspondente relação a/c, 0,25, 0,35, 0,45, 0,55, 0,65 e 0,75, respectivamente.

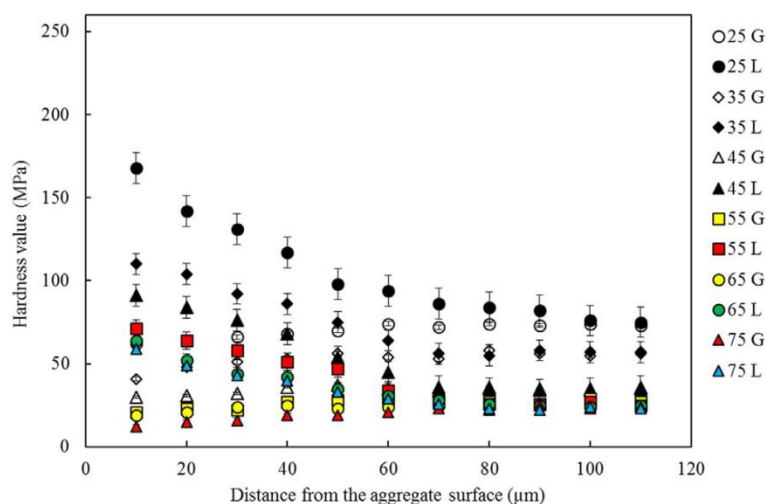


Figura 2.3 - Dureza da ITZ em torno da superfície dos agregados aos 28 dias (G: agregados graníticos; L: agregados de cinzas volantes), adaptado de Nadesan e Dinakar 2018

A análise da aderência que se cria entre os agregados e a pasta cimentícia é ainda um campo por explorar na caracterização da ITZ, devido à dificuldade inerente da sua quantificação. Apenas algumas investigações visam a obtenção desta característica da ITZ. Jebli et al. (2018) efectuaram ensaios ao corte puro, especialmente concebidos de forma que a força se exercesse precisamente na ligação entre as fases do provete. O ensaio consiste na colocação de um provete de pequenas dimensões (30x10x10 mm³) entre duas 'meias caixas', separadas por cerca de 0,5 mm, em que a ITZ do provete se alinhou com a separação entre as caixas. O provete é posteriormente restringido, de maneira a impedir o seu movimento durante o ensaio. Finalmente, uma das meias caixas desloca-se a uma velocidade controlada de 0,001 mm/s, enquanto a outra se mantém estática, até à rotura do provete sob corte puro. O ensaio permite assim, a quantificação da adesão local e o ângulo de atrito

entre as fases, com o auxílio de sensores associados ao sistema de testes mecânicos (“MTS”). Na Figura 2.4, descreve-se o procedimento de forma esquemática.

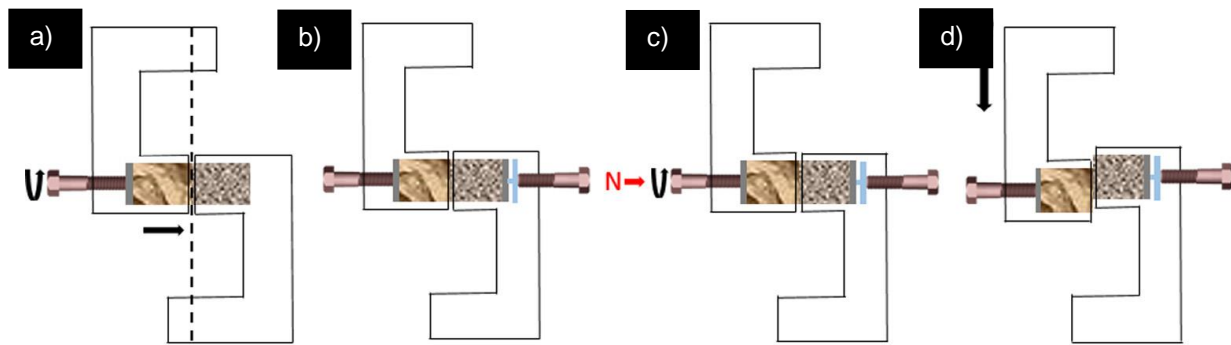


Figura 2.4 - Esquema representativo da execução do ensaio de corte, adaptado de Jebli et al. 2018:
a) alinhamento do suporte e posicionamento do provete; b) posicionamento e fixação do sensor;
c) aplicação da força de confinamento; d) ensaio ao corte puro

3 Trabalho experimental

3.1 Introdução

No presente capítulo descreve-se o trabalho experimental realizado tendo por fim a caracterização da zona de interface agregado-pasta (ITZ) em betões produzidos com diferentes tipos de agregados leves e de massa volúmica normal. Após um breve resumo da campanha experimental, procede-se à caracterização dos materiais e à descrição da composição, formulação, produção e cura dos betões, bem como da produção dos provetes de ensaio realizados.

Importa referir que a campanha experimental se realizou no Laboratório de Construção do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura do Instituto Superior Técnico.

3.2 Descrição do trabalho experimental

O trabalho experimental foi desenvolvido em duas etapas referentes à caracterização de materiais e à formulação, produção e caracterização dos betões. Numa primeira etapa procedeu-se ao planeamento da campanha experimental, definindo-se os tipos de betões e ensaios a considerar no presente trabalho. Em seguida foram seleccionados e caracterizados os vários materiais a utilizar na produção dos betões. O cimento utilizado foi o CEM I 42,5R, cujas características foram fornecidas pelo fabricante. Apenas os agregados foram caracterizados neste trabalho, tendo em conta os ensaios indicados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Ensaios de caracterização dos agregados e respectiva especificação

Ensaio	Norma
Análise granulométrica	NP EN 933-1
Baridade	NP EN 1097-3
Massa volúmica	NP EN 1097-6
Absorção às 24h	NP EN 1097-6

Na segunda etapa do trabalho foram definidas as composições e produzidos os diversos provetes destinados à realização dos ensaios de caracterização previstos na campanha experimental. Esta etapa foi realizada em duas fases que envolveu a realização de ensaios de caracterização normalizados sobre provetes de betão e a realização de ensaios não normalizados de tracção axial e de caracterização da interface agregado-pasta (ITZ).

Para a produção dos betões referentes à primeira fase foram considerados três tipos de agregados leves de porosidade distinta (Leca, Lytag e Stalite) e um tipo de agregado de massa volúmica normal (brita calcária). Durante a produção dos provetes de betão foram realizados ensaios no estado fresco, tendo em conta os ensaios de abaixamento e de massa volúmica indicados na Tabela 3.2. Os betões

produzidos nesta etapa foram caracterizados no estado endurecido, tendo em conta os ensaios normalizados de resistência à compressão e compressão diametral indicados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Ensaio de caracterização dos betões no estado fresco e endurecido

Ensaio	Norma
Abaixamento	NP EN 12350-2
Massa volúmica fresca	NP EN 12350-6
Resistência à compressão	NP EN 12390-3
Resistência à tracção por compressão diametral	NP EN 12390-6

Na segunda fase desta etapa do trabalho procedeu-se à produção de provetes prismáticos de 160x40x40 mm³ para diferentes tipos de agregado, nomeadamente: três tipos de agregados leves; uma brita calcária; uma brita granítica, um dos agregados leves previamente seco (Leca). Foram ainda produzidos, para comparação, provetes constituídos apenas por argamassas e provetes com incorporação de esferas de vidro de modo a simular condições de fraca ligação entre o agregado e a pasta.

Os provetes produzidos na segunda fase destinaram-se à realização de ensaios não normalizados de tracção axial. Avalia-se o modo de fractura e o nível de tensão atingido para cada tipo de betão produzido com diferentes tipos de agregados, mas com igual composição da argamassa. Após o ensaio de tracção axial, os provetes foram cortados em pequenos prismas para posterior caracterização das ITZ por MEV.

Finalmente, para cada uma das composições definidas na segunda fase foram realizados ensaios de aderência sobre provetes constituídos por agregados embebidos em resina e argamassa. Em 3.4.4 apresenta-se uma descrição mais detalhada destes ensaios. Na Tabela 3.3 apresenta-se uma breve descrição das várias fases do trabalho experimental.

Tabela 3.3 - Síntese das diversas fases do trabalho experimental

Etapa	Fase	Descrição	Ordem de trabalhos
1ª Etapa – Planeamento do trabalho experimental	1ª Fase	- Definição dos diferentes tipos de betão; - Selecção dos ensaios a realizar; - Selecção e caracterização dos materiais a utilizar nas misturas.	Realização de ensaios de caracterização dos agregados: - Análise granulométrica; - Baridade; - Massa volúmica; - Absorção de água.

Continuação da Tabela 3.3			
2ª Etapa – Formulação, produção e caracterização das misturas	1ª Fase	<p style="text-align: center;">Produção e caracterização mecânica dos betões através de ensaios normalizados</p>	<p style="text-align: center;">- Produção dos provetes de betões;</p> <p style="text-align: center;">- Realização de ensaios normalizados:</p> <p style="text-align: center;">- Estado fresco (massa volúmica fresca e abaixamento);</p> <p style="text-align: center;">- Estado endurecido (compressão e tracção por compressão diametral).</p>
	2ª Fase	<p style="text-align: center;">Avaliação da interface agregado-pasta através de ensaios não normalizados</p>	<p style="text-align: center;">- Produção de provetes prismáticos;</p> <p style="text-align: center;">- Produção de provetes cúbicos;</p> <p style="text-align: center;">- Realização de ensaios não normalizados:</p> <p style="text-align: center;">- tracção axial;</p> <p style="text-align: center;">- caracterização da ITZ por MEV.</p>

3.3 Materiais e composição das misturas

De forma a aumentar a validade do estudo foram produzidos betões com diferentes tipos de agregado, abrangendo BEAL de diferentes classes de resistência e massa volúmica. Paralelamente, foram também produzidos betões de referência com dois tipos de agregados de massa volúmica normal correntemente utilizados em Portugal, tendo como objectivo comparar o desempenho mecânico e a qualidade da ITZ atingida nestes betões face aos BEAL. Nos próximos pontos indicam-se as principais propriedades dos materiais bem como a composição das misturas consideradas no trabalho experimental.

3.3.1 Materiais constituintes do betão e argamassas

Conforme referido, para a produção das argamassas e betões foram considerados diferentes tipos de agregados leves e de massa volúmica normal.

Os agregados finos consistiram em duas areias de natureza silicosa com granulometria distinta; uma fina de designação 0-2 e uma grossa de designação 0-4. A areia fina, de tonalidade branca, era essencialmente constituída por sílica, apresentando granulometria aproximadamente monogranular. A areia grossa, de tonalidade amarelada, era constituída por sílica e feldspato, apresentando granulometria extensa. Os agregados finos foram fornecidos pela empresa Soarvamil, sendo correntemente utilizados na construção, em obras na região de Lisboa.

Em relação aos agregados grossos, foram considerados três tipos de agregados leves e dois tipos de agregados de massa volúmica normal. Os agregados de massa volúmica normal seleccionados foram dois tipos de brita calcária de diferente granulometria - "Bago de arroz" e "Brita I" - fornecidas pela empresa Soarvamil e um tipo de brita granítica proveniente da região do Porto. Os dois tipos de brita calcária foram seleccionados de modo a ser possível definir uma mistura granulométrica de agregados de massa volúmica normal semelhante à dos agregados leves utilizados neste estudo. Neste caso, considerou-se como granulometria de referência a do agregado leve Leca. A brita granítica foi utilizada apenas na realização dos ensaios da segunda fase, referentes à caracterização de diferentes tipos de ITZ nos betões, pelo que não houve grande preocupação na imposição da definição de requisitos para a sua granulometria.

No que se refere aos agregados leves, foram seleccionados três tipos de agregados de porosidade bastante distinta: um agregado de argila expandida produzido em Portugal (Leca); um agregado de ardósia expandida proveniente dos EUA (Stalite); um agregado de cinzas sinterizadas proveniente do Reino Unido (Lytag).

Para o estudo de caracterização da interface dos betões foram ainda utilizados agregados constituídos por esferas de vidro de modo a simular condições de fraca ligação entre o agregado e a pasta. Na Tabela 3.4 resumem-se os diferentes tipos de agregado considerados no trabalho.

Tabela 3.4 - Agregados utilizados na produção das misturas

Granulometria	Origem	Designação
Fina	Siliciosa	Areia fina
		Areia Grossa
Grossa	Calcária	Bago de arroz
		Brita I
	Granítica	Brita granítica
	Argila expandida	Leca
	Cinzas sintetizadas	Lytag
	Ardósia expandida	Stalite
	-	Esferas de vidro maciço

Na produção dos provetes de argamassa ou betão foi ainda utilizada água corrente proveniente da rede de abastecimento da cidade de Lisboa e um cimento Portland normal, tipo I 42,5R, cujas principais características indicadas pelo fabricante apresentam-se no anexo 1.

3.3.2 Caracterização dos agregados

O conhecimento das propriedades e características dos materiais utilizados no fabrico de betão é fundamental para a formulação da sua composição. As características morfológicas (forma e dimensão) e as propriedades físicas, mecânicas e químicas dos agregados têm influência directa no

comportamento do betão. Por esse motivo, foram realizados ensaios em laboratório que visaram a caracterização dos agregados utilizados. Neste caso, realizaram-se os ensaios de granulometria, baridade, massa volúmica e absorção de água.

3.3.2.1 Análise granulométrica

A granulometria de um agregado é a distribuição dimensional das partículas que o compõem. A sua análise é necessária, uma vez que a granulometria influencia as propriedades do betão, nomeadamente, a sua compacidade (forma como as partículas se distribuem no betão) e a trabalhabilidade (maior ou menor facilidade em amassar, transportar, colocar, compactar e acabar o betão, sem que ocorra segregação).

A determinação granulométrica foi realizada de acordo com a norma NP EN 933-1 “*Ensaios das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração*” através do processo de peneiração. O processo consiste no fraccionamento de uma amostra representativa do lote de agregado, previamente pesada, através da vibração mecânica de um conjunto de peneiros de diferentes granulometrias (Tabela 3.5), dispostos de forma decrescente no agitador de peneiros. Após a vibração, o material retido em cada peneiro foi retirado e pesado individualmente, registando-se o respectivo valor. De seguida, calculou-se a percentagem mássica de partículas retidas em cada fracção em relação à massa inicial da amostra, através da equação Eq. (3.1).

$$\% \text{ retido} = \frac{m_2}{m_1} \times 100 (\%), \quad (3.1)$$

Em que:

- m_1 – Massa total da amostra, (kg);
- m_2 – Massa do material retido num determinado peneiro, (kg).

Por fim, obtiveram-se as percentagens acumuladas passadas em cada peneiro e traçaram-se as curvas granulométricas. De acordo com a norma, caso se verifique uma perda de material superior a 1% em relação à massa inicial do provete, deve repetir-se o ensaio.

Os peneiros utilizados são dotados de uma malha quadrada, com aberturas normalizadas entre 12,5 e 0,125 mm (Tabela 3.5). Importa referir, que este procedimento pressupõe que todas as partículas do mesmo tipo de agregado têm a mesma massa volúmica, o que não é o caso para os agregados leves. As percentagens de material acumulado passado, referentes a cada tipo de agregado estão indicadas na Tabela 3.5. Na mesma tabela indicam-se ainda o módulo de finura, MF, a dimensão máxima, D_{\max} e mínima, d_{\min} , dos agregados ensaiados. As curvas granulométricas apresentam-se na Figura 3.1 e Figura 3.2.

Tabela 3.5 - Percentagem de agregado acumulado passado dos diferentes agregados

Malha [mm]	Areia fina	Areia grossa	Bago de arroz	Brita I	Leca	Lytag	Stalite
63,000	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
31,500	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
16,000	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
12,500	100,0	100,0	100,0	98,4	99,7	99,7	91,6
11,200	100,0	100,0	100,0	89,9	96,3	95,8	72,9
8,000	100,0	100,0	100,0	44,3	71,4	45,7	23,2
6,300	100,0	99,3	99,2	13,7	43,8	14,1	5,4
4,000	100,0	96,6	30,2	0,3	6,7	1,4	0,6
2,000	100,0	88,0	7,6	0,2	1,2	0,8	0,2
1,000	99,5	58,9	2,8	0,2	0,5	0,8	0,2
0,500	82,1	16,8	2,2	0,2	0,5	0,8	0,2
0,250	22,4	2,2	2,2	0,2	0,5	0,8	0,2
0,125	0,4	0,4	2,2	0,2	0,5	0,8	0,2
0,063	0,4	0,4	2,2	0,2	0,5	0,8	0,2
Refugo	4,5	5,0	22,8	2,8	4,9	8,0	1,8
D _{max}	1,0	4,0	6,3	12,5	11,2	11,2	12,5
d _{min}	0,25	0,5	2,0	6,3	4,0	6,3	6,3
M. F.	2,0	3,4	5,5	6,5	6,2	6,5	6,8

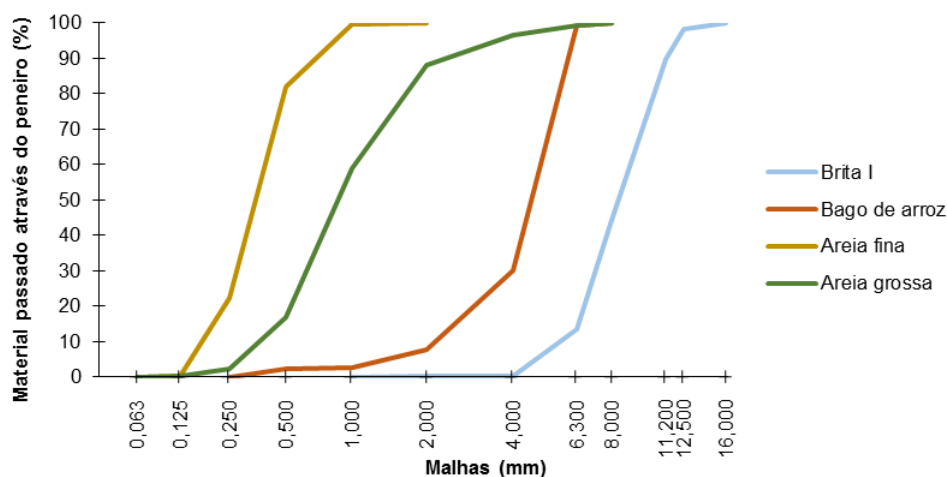


Figura 3.1 - Curvas granulométricas das areias e agregados grossos naturais

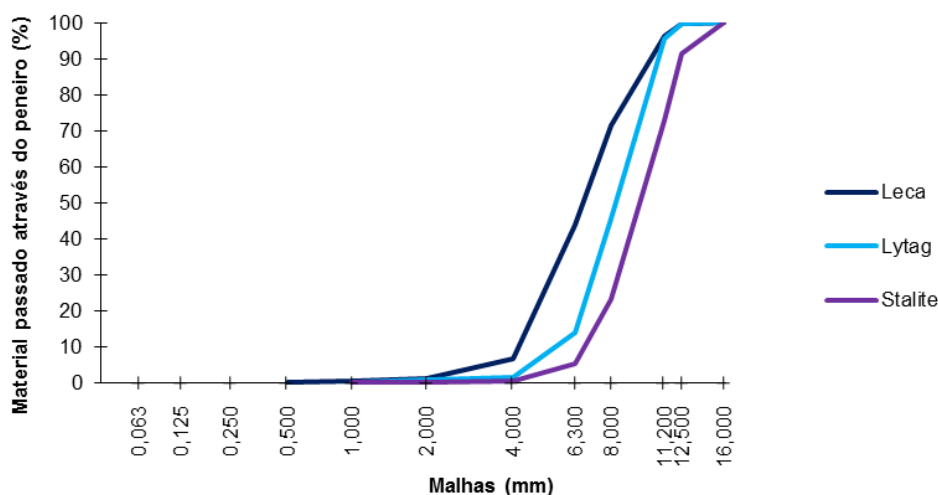


Figura 3.2 - Curvas granulométricas dos agregados leves

3.3.2.2 Determinação da baridade

A baridade (δ) de um agregado é definida como a massa por unidade de volume do agregado seco num recipiente de dimensões conhecidas em determinadas condições de compactação, incluindo os vazios entre as partículas do agregado e entre as partículas do agregado e o recipiente.

A determinação da baridade foi realizada de acordo com a NP EN 1097-3:2000, “*Ensaios para a determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados, Métodos para determinação da massa volúmica e dos vazios*”. O ensaio foi realizado sem compactação, conforme previsto na norma. Inicialmente procedeu-se à pesagem de um recipiente cilíndrico metálico (m_1). Em seguida, o agregado previamente seco foi lançado para o interior do recipiente a uma altura inferior a 5 cm do topo do recipiente, até que este ficasse preenchido. De seguida procedeu-se ao ajustamento do agregado ao nível do topo do recipiente. Na determinação da baridade do agregado fino, rasou-se a superfície do recipiente com o auxílio de uma régua metálica, de forma a obter um plano liso e regular. Como este procedimento não é exequível utilizando agregado grosso, este foi deslocado e reposicionado, para que os espaços superficiais fossem compensados pelas saliências dos agregados. Finalmente, pesou-se o conjunto recipiente-agregado (m_2). A baridade foi calculada de acordo com a equação Eq. (3.2). Dado que nenhum dos agregados seleccionados apresentava D_{max} superior a 12,5 mm, adoptou-se um recipiente com capacidade nominal de 3 dm³. Seguidamente, indica-se a expressão utilizada para o cálculo da baridade sem compactação dos agregados:

$$\delta = \frac{m_2 - m_1}{V} \times 1000, \quad (3.2)$$

Em que:

- m_1 – Massa do recipiente, (kg);
- m_2 – Massa do conjunto recipiente-agregado, (kg);
- V – Volume do recipiente, (dm³).

A Figura 3.3 ilustra o ensaio de baridade do agregado leve Stalite.

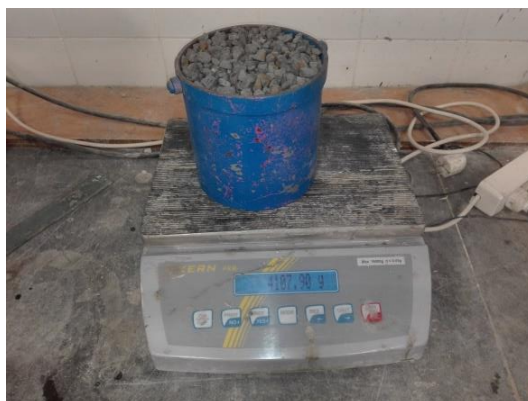


Figura 3.3 - Ensaio de medição da baridade do agregado leve Stalite

Os valores da baridade determinados para cada tipo de agregado estão indicados na Tabela 3.6.

3.3.2.3 Determinação da massa volúmica

A massa volúmica dos agregados foi determinada de acordo com a NP EN 1097-6:2003, “*Ensaios para a determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados, Determinação da massa volúmica e da absorção de água*”. Segundo a norma, a massa volúmica das partículas secas é a relação entre a massa de uma amostra de agregado seca em estufa e o volume que a mesma ocupa dentro de água, incluindo quaisquer tipo de poros internos e acessíveis à água.

No âmbito do presente estudo, apenas se realizou o ensaio da massa volúmica para os agregados grossos. Neste caso, aplicou-se o “*Método do picnómetro para partículas de agregado de dimensões entre 4 mm e 31,5 mm*”. Para os agregados leves foi aplicado o método referido no Anexo C da NP EN 1097-6 – “*Determinação da massa volúmicas das partículas e da absorção de água de agregados leves*”.

O procedimento é descrito em 3.3.2.4, uma vez que a determinação da massa volúmica e da absorção de água foi realizada em simultâneo. A massa volúmica seca de cada tipo de agregado pode ser determinada pela equação Eq. (3.3).

$$\rho_a = \frac{m_2 - m_1}{m_1 + (V_p \times \rho_w) + M_w - M_F / \rho_w}, \quad (3.3)$$

Em que:

- m_1 – Massa do picnómetro, funil e grelha (quando utilizada), (g);
- m_2 – Massa do picnómetro, funil, grelha (quando utilizada) e provete, (g);
- V_p – Volume do picnómetro, (cm³);
- M_w – Massa do agregado saturado com superfície seca, (g);
- M_F – Massa do picnómetro, funil, amostra, água e grelha (quando utilizada) às 24 horas, (g);
- ρ_w – Massa volúmica da água, (g/cm³).

A Figura 3.4 ilustra a medição da massa volúmica e absorção de água do agregado leve Leca.



Figura 3.4 - Ensaio de medição da massa volúmica seca e da absorção de água do agregado leve Leca

3.3.2.4 Determinação da absorção de água às 24 horas

A absorção de água traduz-se no aumento de massa do agregado devido à penetração de água, em relação à sua massa no estado seco. É uma das características mais importantes dos agregados, visto que afecta a água efectiva da mistura, influenciando as características do betão no estado fresco e endurecido. Este fenómeno tem ainda mais relevância nos agregados leves, uma vez que são agregados que, regra geral, apresentam grande porosidade conexas, e por isso, maiores valores de absorção de água.

Como referido em 3.3.2.3, a obtenção da massa volúmica e da absorção de água de cada tipo de agregado foi realizada através de um único ensaio, descrito na NP EN 1097-6:2003.

Foi necessário preparar as amostras de cada lote de agregados antes do início do ensaio. Começou por peneirar-se os agregados através do peneiro de 4 mm, de forma a garantir a gama granulométrica exigida pela norma. De seguida, as amostras foram secas em estufa ($100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5$) durante um período mínimo de 24h, para eliminar a humidade presente nas partículas. Após a preparação das amostras, iniciou-se o ensaio. A amostra foi colocada no picnómetro até perfazer cerca de $\frac{1}{3}$ do seu volume (entre 0,3 a 0,4 l de agregado). De seguida, foi colocada a parte superior do picnómetro e a rede metálica (aquando o ensaio de agregados leves, para garantir que todas as partículas estão imersas ao longo de todo o ensaio) e o conjunto foi pesado. Posteriormente, encheu-se o picnómetro com água até à marca localizada na parte superior do picnómetro, iniciou-se o cronómetro e registou-se a sua massa. Ao fim de 5 minutos, agitou-se o conjunto, rodando e batendo suavemente no picnómetro para remover o ar ocluído no seu interior, repôs-se a água até à marca do funil do picnómetro e pesou-se. Apesar de a norma apenas sugerir medições aos 5, 120 minutos, 24 horas e 7 dias, o processo foi repetido aos 10, 20, 30, 60, 180 minutos e ao fim de 24 horas, repondo-se sempre a água necessária até à marca indicada antes de cada pesagem. Terminadas as medições, a amostra foi escorrida e a superfície das partículas seca, com o auxílio de toalhas secas, como indicado na norma. Pesou-se a amostra saturada com a superfície seca e colocou-se novamente em estufa durante 24 horas. A absorção de água total no final do ensaio e em cada um dos instantes intermédios obtêm-se pelas equações Eq. (3.4) e Eq. (3.5), respectivamente.

- Absorção de água no instante final do ensaio:

$$\omega_F = \frac{M_w - (m_2 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100 (\%), \quad (3.4)$$

- Absorção de água no instante intermédio:

$$\omega_I = \omega_F - \frac{M_F - M_I}{(m_2 - m_1)} \times 100 (\%), \quad (3.5)$$

Em que:

- m_1 – Massa do picnómetro, funil e grelha (quando utilizada), (g);
- m_2 – Massa do picnómetro, funil, grelha (quando utilizada) e amostra, (g);
- M_w – Massa do agregado saturado com superfície seca, (g);
- M_F – Massa do picnómetro, funil, amostra, água e grelha (quando utilizada) às 24 horas, (g);
- M_I – Massa do picnómetro, funil, grelha (quando utilizada), amostra e água no tempo de medição intermédio, (g).

Na Tabela 3.6 estão indicados os valores da massa volúmica e absorção de água às 24 horas. As curvas de absorção dos agregados leves são apresentadas na Figura 3.5 e Figura 3.6. Confirma-se, conforme era desejado, que os agregados leves utilizados neste trabalho experimental apresentam porosidades muito distintas, aumentando a abrangência deste estudo.

Tabela 3.6 - Valores da baridade, massa volúmica e absorção de água às 24h obtidos para os diferentes agregados

Tipo de agregado	Baridade seca	Massa volúmica seca	Absorção às 24h (%)
Areia fina	1500	-	-
Areia grossa	1544	-	-
Bago de arroz	1363	-	-
Brita I	1323	2654	0,7
Leca	573	966	16,6
Lyttag	730	1299	19,0
Stalite	763	1452	4,4
Granito	-	2722	0,7

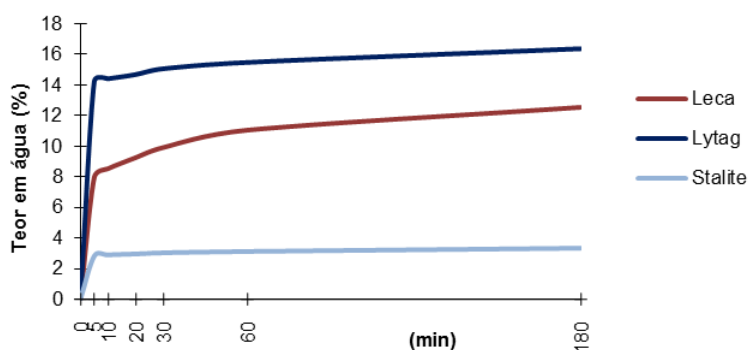


Figura 3.5 - Curvas de absorção dos agregados leves (t = 3 h)

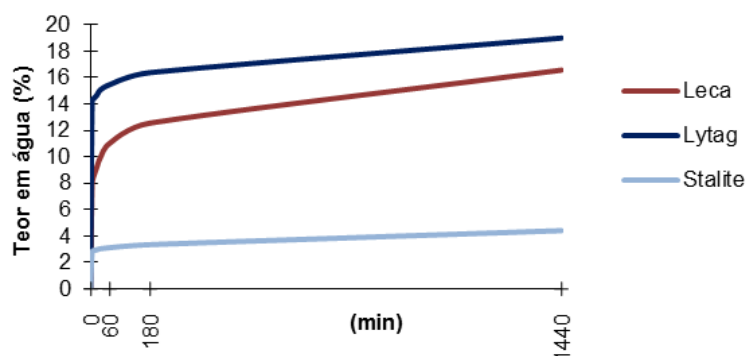


Figura 3.6 - Curvas de absorção dos agregados leves (t = 24 h)

3.4 Composição das misturas e produção de provetes

Como referido o trabalho experimental foi realizado em duas fases, envolvendo inicialmente a produção de betões, que foram sujeitos a ensaios normalizados de caracterização mecânica e depois a produção de provetes de reduzida dimensão para avaliação da interface agregado-pasta de misturas com diferentes tipos de agregado. No presente capítulo são detalhados os diversos passos na formulação e produção dos diferentes provetes, designadamente: a preparação dos agregados, a mistura, a moldagem e compactação e a cura dos provetes. Em todas as composições estudadas o ligante utilizado foi o CEM I 42,5R, variando o tipo de agregado grosso, teor de humidade do agregado e o tipo de cura a que os provetes foram expostos até à data dos ensaios.

3.4.1 Preparação dos agregados

Os agregados leves, como referido anteriormente, influenciam as características do betão, uma vez que alteram a água efectiva da mistura devido à sua capacidade de absorção. Por esse motivo, foi necessária a sua preparação antes de se iniciar a betonagem. Um dos agregados leves foi previamente seco (Leca) aquando a sua introdução na mistura, os restantes agregados leves foram pré-saturados.

A pré-saturação dos agregados consistiu na sua imersão em recipientes plásticos durante um período mínimo de 24 horas. Após a saturação foram retirados e escurridos, utilizando uma rede metálica. De seguida, a sua superfície foi seca, com o auxílio de toalhas secas. Finalmente, foram colocados em barricas devidamente seladas, de maneira a manter esse teor de humidade até à data da betonagem.

Na situação em que se introduziu o agregado seco (Leca), os agregados foram previamente secos em estufa ($100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5$) durante um período mínimo de 24 horas. Posteriormente, foram colocados em barricas seladas até à data de produção das misturas. De forma a controlar a água efectiva da mistura, considerou-se que a absorção durante a mistura dos agregados seria equivalente a 30 minutos de absorção em água, tendo sido adicionada a quantidade equivalente de água à mistura.

Na segunda fase do trabalho experimental, devido à reduzida dimensão dos provetes (160x40x40 mm³), optou-se por restringir a dimensão máxima dos agregados grossos introduzidos na argamassa. Por outro lado, agregados grossos de reduzida dimensão dificultariam a análise da aderência agregado-pasta. Assim, apenas agregados com dimensões entre 10,5 a 8 mm foram incorporados nas misturas.

3.4.2 Produção dos provetes para caracterização mecânica dos betões

3.4.2.1 Mistura

Na formulação dos betões da primeira fase houve o cuidado de aproximar o mais possível o volume de agregado grosso de cada mistura ao da composição de referência Leca, de modo a viabilizar a comparação das diferentes misturas. Para tal, ajustaram-se as percentagens de agregado utilizado em cada mistura. Assim, tendo por base o método de formulação proposto por Bogas (2011) e tendo em consideração volumes de agregado grosso recomendáveis para BEAL entre 300 e 400 l/m³, o volume de agregado grosso variou entre 340 e 350 l/m³ (Tabela 3.7). Desse modo, foi possível obter misturas de massa volúmica reduzida, sem comprometer a estabilidade das mesmas no estado fresco, isto é, sem ocorrência de segregação.

A relação a/c estabelecida para as composições formuladas durante a primeira fase do trabalho experimental, independentemente do tipo de agregado, foi de 0,5. Para esta relação água-cimento, foi possível obter betões sem segregação com trabalhabilidade de 100 ± 20 mm de abaixamento, sem ser necessário a introdução de superplastificante nas misturas.

Na Tabela 3.7 apresentam-se as várias composições consideradas na primeira fase do trabalho experimental. Para a formulação das misturas recorreu-se ao método de Faury, que visa a optimização granulométrica da mistura granular, com base em curvas de referência dos agregados. Neste caso, pretende-se atingir máxima compacidade para uma dada trabalhabilidade.

O volume de água apresentado na Tabela 3.7 corresponde ao volume de água efectiva da mistura. De forma a garantir o controlo da água efectiva e trabalhabilidade da mistura, os agregados leves foram previamente saturados durante 24 horas, excepto uma das composições com Leca, em que se pretendeu analisar a influência de se utilizar agregados leves inicialmente secos. Neste caso houve necessidade de prever água adicional para as misturas, correspondente a 30 minutos de absorção dos agregados em água (Bogas 2011, NP EN 206).

A produção das misturas durante a primeira fase foi realizada numa misturadora de eixo vertical de descarga de fundo com capacidade de 70 litros. A utilização deste tipo de betoneira permite uma mistura mais homogénea comparativamente a betoneiras de eixo inclinado. Em contrapartida, foi necessário barrar previamente toda a superfície e reentrâncias da betoneira com uma argamassa fraca de cimento e areia fina. Com este procedimento, pretende-se minimizar as perdas de água e finos durante a mistura.

Tabela 3.7 - Composição das misturas formuladas durante o trabalho experimental

Ensaio experimental	a/c	Agregado	Teor de cimento (Kg/m ³)	Volume agregado grosso (l/m ³)	Volume de areia (l/m ³)		Volume de água (l/m ³)
					Areia fina	Areia grossa	
Resistência à compressão	0,5	Leca		343	118	178	190
		Brita calcária		346	119	172	190
Resistência à compressão	0,5	Lytag	380	346	53	263	190
diametral		Stalite		339	46	285	190
Resistência à tração axial	0,47	Diferentes					
Observações por MEV		tipos de agregado ⁽¹⁾	460	250	146	210	216

(1) - Os agregados utilizados foram: Leca (seca e saturada), brita calcária, Lytag, Stalite, brita granítica e esferas de vidro.

Como referido anteriormente, os agregados leves foram incorporados na mistura saturados com superfície seca ou totalmente secos. Assim, na produção das misturas foi necessário corrigir a quantidade de agregado a introduzir, tendo em conta o seu teor em água na altura de introdução na misturadora.

Após a preparação dos agregados e da betoneira, iniciou-se a mistura. A mistura consistiu no seguinte processo: primeiro introduziram-se os agregados e a areia por ordem decrescente de granulometria, juntamente com 1/3 da água de amassadura e deixou-se misturar durante 3 minutos; de seguida adicionou-se lentamente o cimento e a restante água de amassadura e deixou-se misturar até obter uma mistura homogénea. Na sua totalidade, o processo demorou entre 7 a 8 minutos. Antes de se proceder ao enchimento dos moldes, foram realizados os ensaios de abaixamento e massa volúmica fresca, descritos em 3.5.1.

3.4.2.2 Moldagem e compactação

Antes de se proceder ao enchimento dos moldes foi necessária a sua preparação. Todos os moldes foram limpos e revestidos com óleo descofrante, de forma possibilitar a desmoldagem dos provetes sem os danificar.

No âmbito da primeira fase do trabalho foram utilizados moldes cúbicos com 150 mm de aresta para a determinação da resistência à compressão de acordo com os requisitos da NP EN 12390-1 e moldes cilíndricos com diâmetro 150 mm e altura 300 mm para a determinação da resistência à compressão diametral de acordo com os requisitos da NP EN 12390-1.

Finda a mistura e os ensaios do betão no estado fresco, procedeu-se ao transporte em carrinho-de-mão até junto dos moldes e procedeu-se ao enchimento e compactação do betão, de acordo com os requisitos da NP EN 12390-2, utilizando um vibrador de agulha. O tempo de vibração foi condicionado pelo tipo de agregado grosso da mistura. No caso dos agregados leves, o tempo de vibração foi menor, cerca de 10 segundos, apenas o suficiente para garantir a libertação do ar aprisionado, sem que ocorressem fenómenos de segregação.

Posteriormente, os moldes preenchidos e compactados, foram regularizados e alisados com uma colher de pedreiro (Figura 3.7). Finalmente, os provetes foram protegidos com uma película plástica, evitando perdas de água excessivas por evaporação através da superfície exposta. Os provetes foram mantidos nestas condições até à sua desmoldagem, aproximadamente 24 horas depois do enchimento.



Figura 3.7 - Moldes de betão após enchimento, vibração e alisamento

3.4.3 Produção de provetes de reduzida dimensão para ensaios de tracção axial

3.4.3.1 Mistura

As misturas referentes à segunda fase do trabalho, relacionadas com a avaliação da aderência agregado-pasta, foram formuladas para um menor volume de agregado grosso (cerca de 250 l/m³), sendo necessário reduzir a relação a/c para 0,47, de forma a evitar fenómenos de segregação indesejáveis. Neste caso pretendia-se a produção de misturas com suficiente argamassa, capaz de envolver partículas de agregado grosso de dimensão semelhante. Assim, mantendo o traço ponderal da argamassa e estipulando 25% e 3% para o volume de agregado grosso e vazios, respectivamente, determinou-se a composição das misturas através da equação Eq. (3.6).

$$1 = V_{ag} + V_{af} + V_c + V_w + V_{agg} + V_v \quad (3.6)$$

Em que:

- V_{ag} – Volume de areia grossa, (m³);
- V_{af} – Volume de areia fina, (m³);
- V_c – Volume de cimento, (m³);

- V_w – Volume de água, (m^3);
- V_{agg} – Volume de agregado grosso, (m^3);
- V_v – Volume de vazios, (m^3).

Na Tabela 3.7 apresentam-se as composições das misturas produzidas durante a segunda fase para ensaios de resistência à tracção axial e para as análises qualitativas de MEV.

A composição das argamassas de comparação foi a mesma que a das restantes misturas produzidas durante esta fase (descritas na Tabela 3.7), contudo não foi introduzido agregado grosso na sua produção.

As misturas da segunda fase foram produzidas numa misturadora convencional de argamassas com movimento rotacional de duas velocidades (movimento lento e rápido) em torno do seu eixo e um movimento planetário em sentido contrário. O misturador é dotado de um recipiente de aço inoxidável com capacidade para produzir cerca de 2 litros de argamassa e permite a execução da amassadura em “modo automático”. Todas as superfícies da misturadora que contactaram com a argamassa foram humedecidas com um pano húmido, incluindo a pá misturadora.

A mistura principiou-se com a introdução da água de amassadura e de seguida o ligante. Após 30 segundos em movimento lento, adicionou-se as areias por ordem decrescente de granulometria em aproximadamente 30 segundos. Posteriormente, accionou-se o movimento rápido e interrompeu-se ao fim de 30 segundos. Com o auxílio de uma raspadeira de borracha, juntou-se o material que aderiu às paredes do recipiente à mistura e deixou-se repousar durante 60 segundos. Finalmente, ligou-se novamente o misturador em movimento rápido durante 60 segundos. Todo o processo demorou cerca de 5 minutos.

Após a produção da argamassa, retirou-se o recipiente do misturador e adicionou-se o agregado grosso à mistura. Manualmente, envolveu-se o agregado grosso na argamassa e misturou-se durante aproximadamente 2 minutos, com o auxílio de uma colher de pedreiro. Uma vez obtida uma mistura homogénea, procedeu-se à sua colocação nos moldes de cofragem e compactação, num processo análogo ao utilizado na produção de argamassas correntes.

3.4.3.2 Moldagem e compactação

Para a segunda fase do trabalho, foram utilizados moldes de aço com 3 compartimentos prismáticos horizontais $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$, de acordo com o especificado em E29-1979, “*Cimentos – Determinação da resistência mecânico*”. Antes de se proceder ao enchimento dos moldes, estes foram colocados na mesa de compactação juntamente com a prolonga metálica, tendo o cuidado de verificar previamente que não haviam folgas nas uniões das peças. A superfície dos moldes foi limpa e untada com óleo descofrante.

Imediatamente após a amassadura e a adição do agregado grosso, procedeu-se ao enchimento e compactação da mistura. A colocação da mistura foi feita de forma faseada. Colocou-se em cada

cavidade uma quantidade correspondente a metade do seu volume e com o auxílio de uma espátula de dimensões adequadas distribuiu-se a mistura numa camada uniforme. Posteriormente, accionou-se o aparelho de compactação até não ser possível observar fuga de ar da mistura. De seguida, encheu-se o resto de cada cavidade excedendo um pouco a sua capacidade e ligou-se novamente o aparelho de compactação, como realizado na colocação e compactação da primeira camada. Cada camada foi sujeita a aproximadamente 5 choques. Retirou-se o molde da mesa de compactação e alisou-se a superfície dos provetes utilizando uma colher de pedreiro (Figura 3.8). O molde foi coberto com um tabuleiro metálico de forma a evitar perdas de água excessivas por evaporação e manteve-se nestas condições durante 24 horas, altura em que se desmoldaram os provetes.



Figura 3.8 - Moldes de provetes prismáticos após enchimento, compactação e alisamento

3.4.4 Produção de provetes para ensaios de aderência agregado-pasta

Nesta fase do trabalho produziram-se provetes não normalizados. Estes são compostos por agregados embebidos em resina e argamassa, destinados à realização dos ensaios de aderência agregado-pasta. Por esse motivo, a preparação dos agregados foi mais exigente.

Antes de se produzir a argamassa, foi necessário preparar a base de resina que compõe o provete. Para tal, cada peça do molde foi revestida por um filme fino de vaselina, antes da montagem do molde. Uma vez montado, todas as juntas do molde foram seladas mais uma vez com vaselina, de forma a impedir fuga de resina quando vertida no estado líquido. Posteriormente, procedeu-se ao preenchimento de metade do volume de cada cavidade do molde com resina. Quando a resina adquiriu resistência suficiente, cada partícula de agregado foi colocada na respectiva posição. Os agregados foram agrupados em grupos de 4, distribuídos uniformemente ao longo da referente cavidade, uma área de aproximadamente 1600 mm^2 para cada grupo de agregado. Cada partícula foi introduzida até pelo menos metade do seu volume estar submerso. Nesta fase de preparação, pretende-se que as partículas do agregado se liguem quimicamente à resina, garantindo uma boa aderência agregado-resina. De seguida, os moldes foram colocados num local liso e desempenado, devidamente protegidos, durante 48 horas, permitindo o endurecimento completo da resina. Terminado esse período, procedeu-se à desmoldagem do prisma de resina-agregados resultante. O

objectivo deste passo é quebrar a ligação da resina ao molde antes de se colocar a argamassa, e assim facilitar a desmoldagem do provete final.

3.4.4.1 Mistura

A formulação e produção das argamassas utilizadas na produção dos provetes para ensaios de aderência estão descritas em 3.4.3.1, uma vez que o processo foi semelhante. No entanto, o último passo da secção, em que se descreve a introdução do agregado grosso na mistura, foi suprimido, dado que os agregados nestes espécimes foram inseridos na base de resina do provete.

Dado que a rotura nos ensaios de aderência dos provetes produzidos com argamassa de relação a/c 0,47 ocorreu preferencialmente pelos agregados, houve a necessidade de repetir os ensaios utilizando uma argamassa mais fraca. Assim, foi necessário formular uma nova argamassa, para tal, aumentou-se a relação a/c para 0,7 e estipulou-se o traço ponderal 1/3 em peso.

As composições das argamassas formuladas durante esta fase estão indicadas na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Composição das misturas formuladas para produção dos provetes para ensaios de aderência

Ensaio experimental	a/c	Agregado	Teor de cimento (Kg/m ³)	Volume de areia (l/m ³)		Volume de água (l/m ³)
				Areia fina	Areia grossa	
Aderência agregado-pasta	0,47	Diferentes tipos de agregado ⁽¹⁾	460	146	210	216
	0,7	Leca saturada, Stalite, brita calcária, brita granítica	436	200	300	306

(1) - Os agregados utilizados foram: Leca (seca e saturada), brita calcária, Lytag, Stalite, brita granítica e esferas de vidro.

3.4.4.2 Moldagem e compactação

O conjunto resina-agregados foi inserido no respectivo molde, sem qualquer folga e completamente horizontal, pronto para a produção e colocação da argamassa final (Figura 3.9). De seguida colocou-se o molde na mesa de compactação com a prolonga, preencheu-se cada cavidade com argamassa e compactou-se a mistura com cerca de 5 pancadas. Passadas 48 horas, procedeu-se à desmoldagem e colocação dos provetes (Figura 3.10a) na câmara de cura húmida devidamente identificados.



Figura 3.9 - Conjunto resina-agregado antes da produção da argamassa final

Após 7 dias de cura (3.4.5) húmida, os provetes foram seccionados de forma a obterem-se 4 provetes cúbicos com cerca de 40 mm de aresta (Figura 3.10b).



Figura 3.10 - Provede constituído por agregados de brita calcária embebidos em resina e argamassa
a)antes do corte; b)depois do corte

3.4.5 Cura dos provetes

Após serem desmoldados, os vários provetes foram devidamente identificados e posteriormente acondicionados até à data de ensaio, em ambientes cuja temperatura e humidade relativa foram controladas. Os provetes produzidos durante a primeira fase foram sujeitos a dois tipos de cura: húmida e seca. Os provetes sujeitos a cura húmida foram colocados numa câmara condicionada com humidade relativa superior a 95%. Os provetes sujeitos a cura “seca” foram colocados numa câmara condicionada com temperatura de 20 ± 2 °C e humidade relativa de 50 ± 5 %. Os provetes produzidos durante a segunda fase foram apenas sujeitos a cura húmida. Na Tabela 3.9 resumem-se as condições de cura consideradas, bem como a dimensão e número de provetes adoptados para cada composição e tipo de ensaio.

Tabela 3.9 - Processo de cura, ensaios, número e dimensão dos provetes produzidos em cada fase do trabalho experimental

Ensaio	Idade (dias)	Nº de provetes ensaiados em cada idade	Dimensão do molde (mm)	Tipo de agregado no betão	Processo de cura
Resistência à compressão	2	3	150x150x150	Leca saturada,	Humidade relativa a 95%
	7			Lytag, Stalite,	
	28			Brita I	
				Leca seca	
	7			Leca saturada,	Temperatura 20±2°C e humidade relativa de 50 ± 5%
	28			Brita I	
Resistência à compressão diametral	28	3	φ150x300	Leca saturada,	Humidade relativa a 95%
				Leca seca,	
				Lytag, Stalite,	
				Brita I	
				Leca saturada,	Temperatura 20±2°C e humidade relativa de 50 ± 5%
				Brita I	
Resistência à tracção axial	28	3	40x40x160	Leca saturada,	
				Leca seca,	
Observações MEV	28	1	40x40x20	Lytag, Stalite,	Humidade relativa a 95%
				brita calcária,	
				brita granítica,	
Ensaio de aderência agregado-pasta	28	4	40x40x40	esferas de vidro,	
				argamassa	

3.5 Ensaios de caracterização dos betões

Conforme referido em 3.2 os betões produzidos neste estudo foram caracterizados em termos das suas principais propriedades no estado fresco (massa volúmica fresca e abaixamento), propriedades mecânicas (resistência à compressão, tracção por compressão diametral e tracção axial) e aderência agregado-pasta. Estes ensaios foram realizados em duas fases, apresentando-se nos próximos pontos os procedimentos adoptados em cada um dos ensaios.

3.5.1 Ensaios de caracterização dos betões no estado fresco

Imediatamente após a produção de cada mistura, foram realizados os ensaios de massa volúmica fresca e o ensaio de abaixamento, para a avaliação da trabalhabilidade.

3.5.1.1 Determinação da massa volúmica fresca

O ensaio de determinação da massa volúmica fresca, permite a avaliação da compacidade do betão e tem como principal objectivo o despiste de possíveis desvios entre as misturas produzidas e formuladas. A determinação da massa volúmica do betão no estado fresco foi realizada de acordo com a NP EN 12350-6:2002, “*Ensaaios do betão fresco - Parte 6 Massa Volúmica*”. Os aparelhos e utensílios necessários para a realização deste ensaio foram: um recipiente estanque de aço de 10 l de volume e massa conhecida; colher de enchimento; balança; vibrador de agulha. A técnica consistiu na pesagem do recipiente vazio (M_1), de seguida procedeu-se ao enchimento do recipiente com o betão fresco em duas camadas compactadas e procedeu-se à pesagem do recipiente cheio (M_2).

O cálculo da massa volúmica fresca foi obtido através da equação Eq. (3.7):

$$\rho = \frac{M_2 - M_1}{V}, \quad (3.7)$$

Em que:

- ρ – Massa volúmica fresca, (kg/m^3);
- M_1 – Massa do recipiente vazio, (g);
- M_2 – Massa do conjunto recipiente-betão, (g);
- V – Volume do recipiente, (l).

3.5.1.2 Ensaio de abaixamento

O ensaio de abaixamento (cone de Abrams), permite a determinação da consistência do betão no estado fresco, sendo um dos ensaios normalizados especificados na NP EN 206. O ensaio de abaixamento foi realizado de acordo com a NP EN 12350-2:2002, “*Ensaaios do betão fresco - Parte 2: Ensaio de abaixamento*”. Os aparelhos e utensílios necessários para a realização deste ensaio foram: o cone troco-cónico metálico com 200 e 100 mm de diâmetro na base e no topo, respectivamente e 300 mm de altura; varão de compactação com 16 mm de diâmetro e extremidades arredondadas; funil de auxílio à colocação do betão; placa plana e não absorvente de apoio ao cone; colher de pedreiro, a régua de consola; cronómetro. Todos os utensílios que contactaram com o betão durante o ensaio foram previamente molhados e escorridos, de forma a eliminar o excesso de água e possível alteração da mistura. Basicamente este ensaio consiste em encher um molde tronco cónico com 300 mm de altura e aberto nas duas extremidades, onde o betão é previamente compactado em 3 camadas e o molde é posteriormente removido na vertical. O valor do abaixamento resulta da diferença entre a altura do molde e o topo superior da amostra.

Segundo a norma, o ensaio é considerado válido quando o betão desmoldado permanece simétrico e semi-intacto (Figura 3.11). Se o abaixamento for deformado, deve recolher-se outra amostra e repetir o ensaio. Caso, dois ensaios consecutivos apresentem abaixamento deformado, o betão não apresenta consistência adequada. O campo de aplicação deste ensaio estende-se a betões cuja máxima dimensão dos agregados não ultrapasse os 40 mm e para abaixamentos entre 10 e 200 mm.



Figura 3.11 - Exemplo de abaixamento - composição com Lytag

3.5.2 Ensaios de caracterização dos betões no estado endurecido

No estado endurecido, os betões foram caracterizados em termos de massa volúmica, resistência à compressão, resistência à tracção por compressão diametral, resistência à tracção axial e aderência agregado-pasta. Complementarmente, foram caracterizadas as ITZs dos diferentes betões através da observação por MEV.

3.5.2.1 Resistência à compressão

O objectivo do ensaio de resistência à compressão é a avaliação da capacidade resistente do betão quando solicitado a uma tensão uniforme de compressão. Costa e Appleton (2002) apontam a resistência à compressão como a característica mais importante do betão estrutural, uma vez que nas estruturas, a principal função do betão é resistir a este tipo de carregamento.

O ensaio foi realizado de acordo com o especificado na norma NP EN 12390-3:2003, "*Ensaio ao betão endurecido – Parte 3: Resistência à compressão de provetes de ensaio*". Os ensaios foram realizados sobre provetes cúbicos normalizados de 150 mm de aresta, moldados de acordo com os requisitos da NP EN 12390-1. Foram realizados ensaios de compressão aos 2, 7 e 28 dias de idade. No caso de algumas composições, dispensou-se a sua caracterização em termos de resistência à compressão aos 2 dias de idade, uma vez que não acrescentaria informação relevante para o presente trabalho. Para cada idade foram ensaiados, pelo menos, 3 provetes.

Para a realização do ensaio de compressão utilizou-se uma prensa hidráulica TONI PACT com capacidade de carga de 3000 kN e com velocidade de carregamento controlável. A prensa é dotada de um prato inferior fixo e um prato superior móvel, o qual está conectado a uma rótula que garante a uniformidade das tensões aplicadas.

Inicialmente os pratos da prensa hidráulica e da superfície dos provetes foram limpos com um pano. Uma vez limpo e desprovido de qualquer resíduo superficial, o provete foi colocado no centro do prato inferior, com a face de betonagem perpendicular ao sentido da carga. Desta forma, garantem-se as faces em contacto com os pratos lisas e desempenadas, e em simultâneo evita-se qualquer tipo de excentricidade. Os ensaios foram conduzidos para uma velocidade de carga de 13,5 KN/s,

ensaiando-se o provete até à rotura. Após o ensaio, verificou-se se a rotura do provete foi satisfatória e registou-se a força de rotura, F (Figura 3.12).

O cálculo da resistência à compressão foi obtido através da equação Eq. (3.8).

$$f_c = \frac{F}{A_c}, \quad (3.8)$$

Em que:

- f_c – Resistência à compressão, (MPa ou N/mm²);
- F – Força de rotura à compressão, (N);
- A_c – Área da secção transversal submetida à aplicação de carga, (mm²).



Figura 3.12 - Provete de betão com agregado de brita calcária após ensaio de compressão aos 7 dias

3.5.2.2 Resistência à tracção por compressão diametral

O ensaio à tracção por compressão diametral é uma forma indirecta de medir a resistência à tracção do betão, através da aplicação de uma força de compressão segundo a geratriz perpendicular à base do provete cilíndrico. A resistência à tracção do betão é uma característica importante no controlo da fendilhação nas estruturas de betão (Costa e Appleton 2002). O ensaio foi realizado de acordo com o especificado na NP EN 12390-6:2003, “*Ensaio ao betão endurecido – Parte 6: Resistência à tracção por compressão dos provetes*”

Para cada tipo de betão produzido foram ensaiados 3 provetes cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 300 mm altura, que foram moldados de acordo com a NP EN 12390-1. O ensaio de tracção por compressão diametral foi executado em provetes com 28 dias. O equipamento utilizado para a execução do ensaio de tracção por compressão diametral foi o mesmo que se utilizou para a realização do ensaio de compressão, acrescido do suporte metálico que permite o posicionamento dos provetes cilíndricos.

Antes do ensaio de tracção por compressão diametral limpavam-se os pratos da prensa hidráulica, da superfície dos provetes e do suporte metálico, com o auxílio de um pano. De seguida, posicionou-se o provete horizontalmente no suporte metálico, colocando-se na parte superior e inferior uma banda de aglomerado de fibras de madeira, ou seja, na direcção de carregamento do provete. Introduziu-se

o conjunto (suporte e provete) no centro do prato inferior, de modo a eliminar qualquer tipo de excentricidade (Figura 3.13). O ensaio foi conduzido para uma velocidade de carga de 3,5 kN/s até o provete atingir a rotura. A resistência à tracção por compressão foi determinada através da equação Eq. (3.9).

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d}, \quad (3.9)$$

Em que:

- f_{ct} – Resistência à tracção por compressão diametral, (MPa ou N/mm²);
- F – Força de rotura, (N);
- L – Comprimento do provete cilíndrico, (mm);
- d – Diâmetro do provete cilíndrico, (mm).



Figura 3.13 - Provete de betão com agregado leve Lytag antes do ensaio à tracção por compressão diametral

3.5.3 Resistência à tracção axial

O ensaio de tracção axial permite a determinação directa da resistência à tracção dos betões produzidos. Contudo, este ensaio é de difícil execução, uma vez que é difícil evitar excentricidades durante a realização do mesmo.

Para este ensaio foram produzidos provetes de 160x40x40 mm³ conforme referido em 3.2. Após 27 dias de cura húmida, os topos do provete foram perfurados mecanicamente até cerca de 35 mm de profundidade, utilizando uma broca cilíndrica de 10 mm de diâmetro com extremidade adiamantada. Cada furo foi posteriormente preenchido através da injeção de uma resina bi-componente de fixação (bucha química de alta resistência) e finalmente inseriu-se um varão roscado M8 de aço, seguindo todos os cuidados para garantir uma boa ligação. A verticalidade dos varões foi assegurada através da utilização de esquadros metálicos. Este procedimento foi realizado, no mínimo 24 horas antes do ensaio de tracção axial do provete.

O ensaio de tracção axial foi realizado utilizando a prensa multi testes Lloyd LR 50K de alta precisão, cuja capacidade de carga é 50 kN. O equipamento tem acoplado duas garras metálicas, sendo que a

garra superior é móvel e permite regular a velocidade de extensão. O sistema digital da máquina permite o registo da carga de pico com um erro associado inferior a 0,5%.

O ensaio de tracção axial iniciou-se com a colocação do provete prismático na garra inferior do equipamento, apertando o varão roscado e garantido a verticalidade do mesmo (Figura 3.14). De seguida conectou-se o varão superior do provete a um mosquetão de aço, através de uma anilha de dimensões adequadas e este por sua vez, conectou-se à garra móvel. Desse modo, garantiu-se que a ligação superior do provete à prensa ficasse rotulada, não transmitindo esforços de flexão indesejáveis. Finalmente, o ensaio foi conduzido até à rotura, para uma velocidade de deformação de 1,00 mm/minuto.

O cálculo da resistência à tracção do provete foi realizado através da equação Eq. (3.10).

$$f_{ct} = \frac{F}{A_t}, \quad (3.10)$$

Em que:

- f_{ct} – Resistência à tracção, (MPa ou N/mm²);
- F – Força de rotura à tracção, (N);
- A_c – Área da secção transversal submetida à aplicação de carga, (mm²).



Figura 3.14 - Provete prismático de Leca preparado para a realização do ensaio de tracção axial

3.5.4 Ensaio de aderência agregado-pasta

O ensaio de aderência realizado sobre os provetes cúbicos foi executado de forma análoga ao ensaio de tracção axial a que os provetes prismáticos foram sujeitos. Porém, nos seus topos foram coladas chapas metálicas que permitem a ligação dos varões roscados M8 em vez da sua furação. O cálculo da aderência agregado-pasta foi realizado através da expressão Eq. (3.10), substituindo A_c pela área traccionada do agregado e não pela totalidade da secção traccionada. A área do agregado foi obtida através da lupa digital da *Dino-lite*, modelo *AM4815ZT edge*, no caso em que a fractura do provete ocorreu pelo agregado (área projectada da superfície de fractura do agregado). Quando a fractura ocorreu na ITZ agregado-pasta, a área superficial foi medida através de uma réplica tridimensional em plasticina. A superfície de fractura foi digitalizada (*Einscan-Pro*, *Shining 3D*); a análise da imagem

foi efectuada com recurso ao software *CATIA*. Posteriormente, os resultados foram tratados com o auxílio do programa *Autocad*.

3.5.5 Caracterização da ITZ por microscopia electrónica de varrimento (MEV)

Nesta etapa do trabalho avaliou-se qualitativamente as ITZs desenvolvidas entre a pasta cimentícia e cada um dos tipos de agregado em estudo, através de observação por microscopia electrónica de varrimento (MEV).

Como referido em 3.2, após o ensaio de tracção axial os provetes foram seccionados transversalmente no troço central, para obtenção de material representativo de cada um dos betões produzidos. Obtiveram-se espécimes com sete tipos de agregado: Brita granítica, Brita calcária, Leca seca, Leca saturada, Stalite, esfera de vidro (sílica) e Lytag; cada um apresentava cerca de 20 mm de espessura (devido a limitações impostas pelas dimensões da câmara do microscópio electrónico) e uma área transversal igual à do provete original: 40x40 mm². No corte dos provetes houve o cuidado de evitar a introdução de danos que interferissem com a análise. A partir destes blocos prepararam-se dois tipos de amostras: superfícies de fractura, obtidas por fragmentação de cada bloco seguido por revestimento com liga Au-Pd, de modo a tornar a amostra condutora; e preparação de superfícies polidas. As superfícies polidas foram obtidas por infiltração da amostra em vácuo com resina epóxida de baixa viscosidade. Após cura da resina, a camada superficial foi removida com serra de precisão, expondo uma nova superfície infiltrada. Seguiram-se etapas de desbaste e polimento da superfície até um acabamento de 1 µm, e revestimento com liga Au-Pd. O equipamento utilizado para as observações foi o microscópio electrónico de varrimento por emissão de campo da *JEOL*, modelo *JSM 7001F*, acoplado a um espectrómetro de dispersão de energia (EDS) da marca *Inca*, modelo *PentaFETx3*. As superfícies de fractura foram observadas no modo de electrões secundários (que fornece sobretudo informação sobre a topografia da superfície e morfologia das fases presentes); as seções polidas foram observadas em modo de electrões retrodifundidos (que fornece informação sobre a composição química das fases presentes). Por último, o EDS permite análise química elementar da superfície, tornando possível a verificação da identificação de fases e a determinação da presença e abundância relativa de um determinado elemento químico.

4 Apresentação e discussão de resultados

No presente capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos ao longo da campanha experimental, descrita no capítulo 3. Procede-se à caracterização das principais propriedades dos betões produzidos, quer no estado fresco, através da determinação da massa volúmica fresca e do abaixamento, quer no estado endurecido, através de ensaios de resistência à compressão, resistência à tracção por compressão diametral, resistência à tracção axial e ensaios de aderência. Complementarmente aos ensaios mecânicos foram qualitativamente analisadas as interfaces agregado-pasta que se desenvolveram entre os diferentes tipos de agregados estudados e a matriz cimentícia, com base em imagens obtidas em microscópio de varrimento electrónico (MEV). Os ensaios supracitados foram realizados de acordo com as metodologias descritas no capítulo 3.

4.1 Caracterização dos betões no estado fresco

Na Tabela 4.1 apresentam-se os valores de massa volúmica fresca e de abaixamento (cone de Abrams) obtidos para cada tipo de betão estudado, de acordo com as metodologias expostas em 3.5.1.1 e 3.5.1.2, respectivamente.

Tabela 4.1 - Valores da massa volúmica fresca, abaixamento, resistência à compressão e resistência à tracção por compressão diametral

Tipo de agregado (molhagem inicial dos agregados)	Processo de cura do betão	Massa volúmica fresca (kg/m ³)	Abaixamento (mm)	f_{cm} (MPa)			CV _{fc,28} (%)	$f_{ctm,sp,28\ dias}$ (MPa)	CV _{fc,sp,28} (%)
				2 dias	7 dias	28 dias			
Leca (secos)	Húmida	1690	110	-	31,3	34,7	4,0	2,6	6,0
Leca (saturados)	Húmida	1695	108	26,1	32,0	36,5	1,1	2,2	12,1
Leca (saturados)	Seca	1696	107	-	33,1	39,3	1,2	1,6	16,9
Lytag (saturados)	Húmida	1813	107	28,5	36,4	40,1	3,0	2,9	9,0
Stalite (saturados)	Húmida	1911	102	32,1	42,8	48,3	2,2	3,3	9,9
Brita I	Seca	2301	101	-	43,5	49,8	1,6	3,0	9,0
Brita I	Húmida	2302	102	33,0	42,8	51,2	2,4	3,7	5,7

Conforme inicialmente planeado, todos os betões foram produzidos com valores de abaixamento próximos, entre cerca de 100 e 110 mm, a que corresponde a classe de consistência S3. É possível verificar que os BEAL, regra geral, apresentaram valores de abaixamento ligeiramente superiores aos

BAN, apesar de terem sido produzidos com composições idênticas. Essa ligeira diferença deve-se à forma arredondada característica dos agregados leves de Leca e Lytag, que confere maior trabalhabilidade ao betão, comparativamente aos agregados naturais britados (Costa e Appleton 2002). O agregado leve Stalite, dado que é obtido por um processo de britagem, apresenta forma irregular, e como tal, conduziu a betões de trabalhabilidade semelhante à dos BAN. De notar ainda que, para iguais valores de abaixamento, os betões de menor massa volúmica estão associados a melhor trabalhabilidade.

Em relação à massa volúmica fresca, conforme esperado os betões produzidos com agregados leves mais porosos (Leca) conduziram a maiores reduções desta propriedade. Em geral, foi possível abranger betões de classes de massa volúmica D1,6 a D2,0, já tendo em conta valores estimados de massa volúmica seca.

4.2 Caracterização dos betões no estado endurecido

Nesta secção, pretende-se analisar o comportamento mecânico à compressão e à tracção de betões estruturais produzidos com diferentes tipos de agregado, bem como avaliar de forma qualitativa a qualidade das zonas de interface agregado-pasta (ITZ). Para tal, analisou-se a influência do tipo de agregado, a influência das condições de cura e a influência das condições de molhagem inicial dos agregados leves nestas propriedades. O comportamento dos BEAL face aos betões convencionais de composição idêntica é também avaliado.

4.2.1 Resistência à compressão (f_{cm})

Na Tabela 4.1, indicam-se os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão para as respectivas idades de ensaio. Na Figura 4.1 apresentam-se as curvas de evolução da resistência à compressão para os betões indicados na Tabela 4.1.

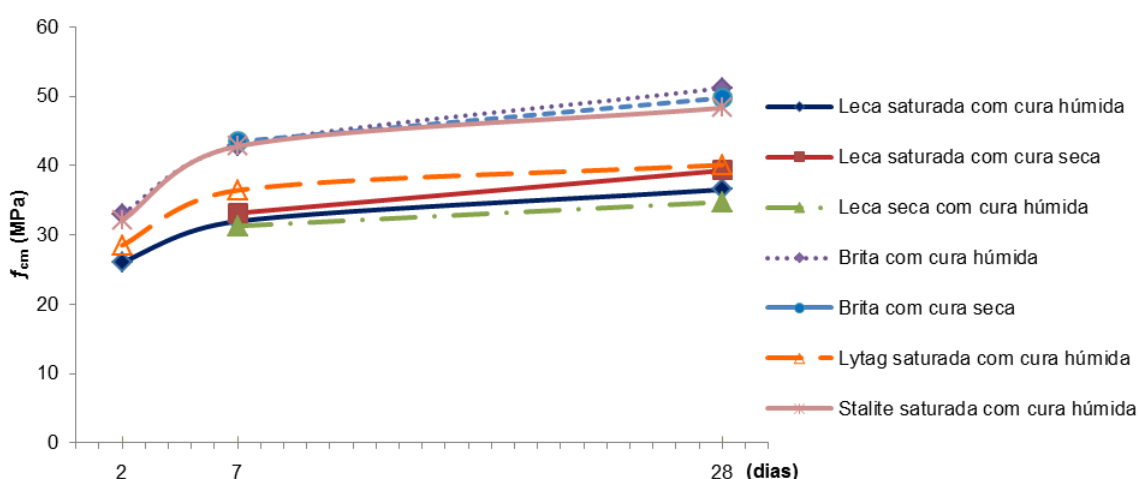


Figura 4.1 - Evolução da resistência média à compressão dos betões analisados

Na Figura 4.2, ilustram-se as percentagens de resistência obtidas nos BEAL em relação aos betões convencionais de igual composição, para cada uma das idades de ensaio.

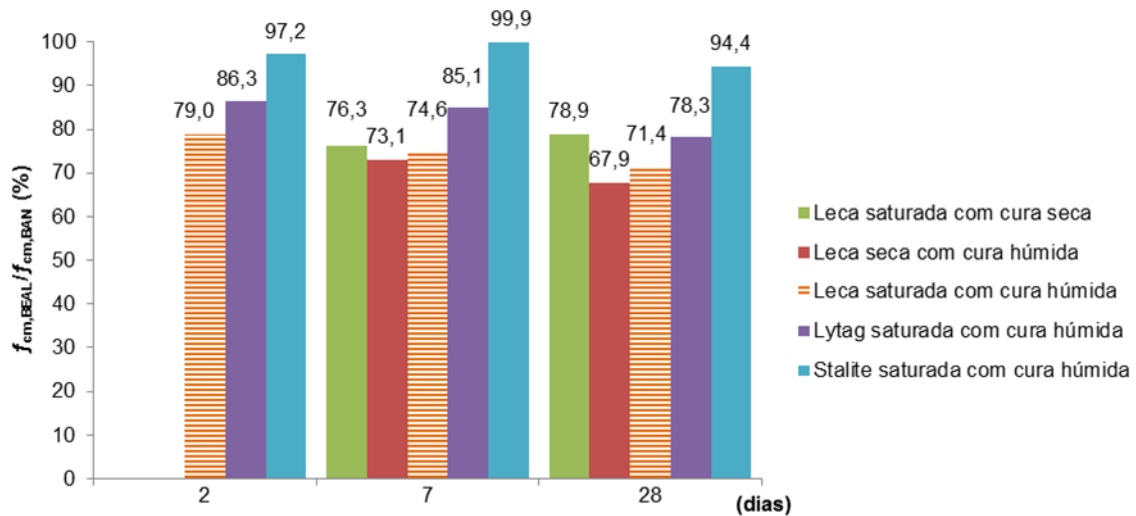


Figura 4.2 - Resistência à compressão relativa dos BEAL face aos betões convencionais de igual composição aos 28 dias

A resistência média à compressão, f_{cm} , nos BEAL variou entre 26,1 e 32,1 MPa, 31,3 e 42,8 MPa e 34,7 e 48,3 MPa, aos 2, 7 e 28 dias, respectivamente. Desse modo, foi possível abranger betões de classe de resistência LC25/28 a LC40/44.

Aos 28 dias de idade, verificou-se que os betões com Leca e Lytag dificilmente atingem valores superiores a 40 MPa, enquanto a Stalite permite a produção de betões com resistências próximas de 50 MPa, sendo semelhante aos valores máximos desenvolvidos nos BAN. Assim, tal como seria de esperar, em geral verifica-se uma redução de resistência dos BEAL face aos BAN, que tende a aumentar com o aumento de porosidade do agregado leve. A perda de f_{cm} nos BEAL relativamente aos BAN de igual composição variou em função do tipo de agregado, cura e condições de pré-molhagem dos agregados, entre cerca de 3 a 21%, 0 a 27% e 6 a 32% aos 2, 7 e 28 dias de idade, respectivamente. Naturalmente, esta diferença aumentou nos betões com agregados mais porosos ensaiados a idades mais avançadas. Independentemente das condições de cura, a produção de betões com agregados mais porosos, conduziu a resistências inferiores, confirmando-se que o tipo de agregado leve influencia a resistência dos betões. No entanto, tal como se discute no próximo ponto, os BEAL podem apresentar comportamentos bastante distintos face aos betões convencionais, dependendo do nível de resistência e idade de ensaio.

Em geral, os coeficientes de variação foram inferiores ao limite de 3,2 sugerido na NP EN 12390-3 (2003), não se verificando uma influência significativa do tipo de agregado. Os BEAL curados em água com Leca inicialmente seca apresentaram a variabilidade mais elevada, que pode estar relacionado com a maior dificuldade no controlo da estabilidade e absorção dos agregados durante a mistura do betão no estado fresco. A pré-saturação dos agregados leves contribuiu para um melhor

controlo da quantidade de água efectiva da mistura, o que justifica os baixos valores de CV obtidos nestes betões, sendo da mesma ordem de grandeza dos obtidos nos BAN.

4.2.1.1 Superfícies de fractura

Nos BEAL com Leca, independentemente das condições de cura ou de pré-molhagem, a superfície de fractura desenvolveu-se predominantemente através dos agregados, indicando que a resistência à compressão neste tipo de betões é governada pelos agregados (Figura 4.3 a Figura 4.5). Este fenómeno foi observado em todas as idades, o que sugere que a resistência limite do betão, para a qual a rigidez da pasta é superior à do agregado, foi ultrapassada. Raramente observaram-se superfícies de fractura através da ITZ, o que indicia tratarem-se de regiões de qualidade superior à do próprio agregado. Bogas et al. (2017b) sugerem valores de resistência limite de 26,7 MPa, que são da mesma ordem de grandeza dos valores de resistência obtidos aos 2 dias de idade nestes betões.

Nos BEAL com Lytag, a superfície de fractura nem sempre atravessou os agregados. Em idades mais jovens (2 dias de idade), a fractura ocorreu tanto pelos agregados como pela interface agregado-pasta. Nesta idade, a resistência atingida foi de 28,5 MPa que é ligeiramente inferior à resistência limite sugerida por Bogas et al. (2017b) para estes agregados (29,2 MPa). Porém, conforme seria de esperar, aos 28 dias verificou-se o desenvolvimento da superfície de fractura maioritariamente através dos agregados. Na Figura 4.6 ilustram-se as superfícies de fractura verificadas nos BEAL com Lytag para as diferentes idades de ensaio.

Em relação aos BEAL com agregados leves de melhor qualidade (Stalite), a superfície de fractura foi sinuosa e irregular, sendo semelhante à observada nos betões de massa volúmica normal, em especial nas primeiras idades. Mesmo nos ensaios aos 28 dias, a superfície de fractura nem sempre atravessou os agregados, salientando uma menor participação dos agregados na resistência à compressão destes betões face aos BEAL anteriormente referidos. De facto, a resistência à compressão dos betões, até 48 MPa, foi inferior aos valores de resistência limite indicados por Bogas et al. (2017b), para agregados idênticos (59-62 MPa). Na Figura 4.7, apresentam-se as superfícies de fractura observadas nos BEAL com Stalite para as diferentes idades de ensaio.

Nos BAN a fractura propagou-se maioritariamente pela periferia dos agregados, deixando-os expostos e ausentes de pasta na sua superfície (Figura 4.8 e Figura 4.9), o que sugere que a qualidade da interface agregado-pasta assume maior influência na resistência à compressão dos betões convencionais, sendo a fase mais fraca nestes betões. Nos betões curados em ambiente “seco”, o fenómeno sugerido foi mais evidente.

Importa salientar que quando a superfície de fractura nos BEAL se desenvolveu em torno dos agregados leves, foi possível observar a aderência de alguma pasta na sua superfície. Em oposição, nos agregados de massa volúmica normal, a sua superfície observou-se limpa e desprovida de material, indicando que a ligação agregado-pasta terá sido melhor nos BEAL.

Resumidamente, a análise das superfícies de fractura sugere que a participação da interface agregado-pasta foi mais preponderante na resistência dos betões convencionais, sendo inclusivamente sensível às condições de cura dos provetes. Nos BEAL, a influência da interface foi mais importante em idades jovens, em especial nos BEAL com agregados leves mais densos (Stalite). Ainda assim, mesmo nestes casos constata-se uma melhor aderência agregado-pasta na superfície dos agregados leves.

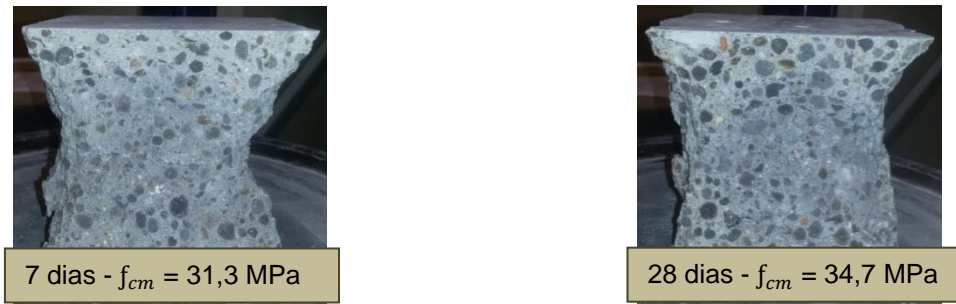


Figura 4.3 - Superfície de fractura de provetes de betão com Leca previamente seca curados em água e ensaiados à compressão para as respectivas idades de ensaio

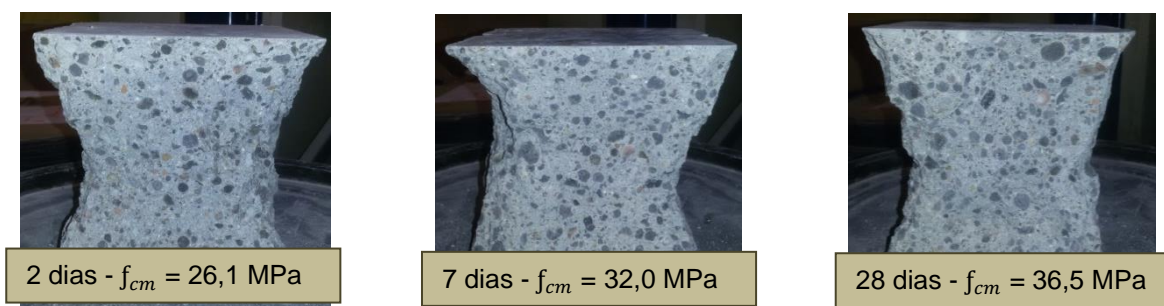


Figura 4.4 - Superfície de fractura de provetes de betão com Leca pré-saturada curados em água e ensaiados à compressão para as respectivas idades de ensaio

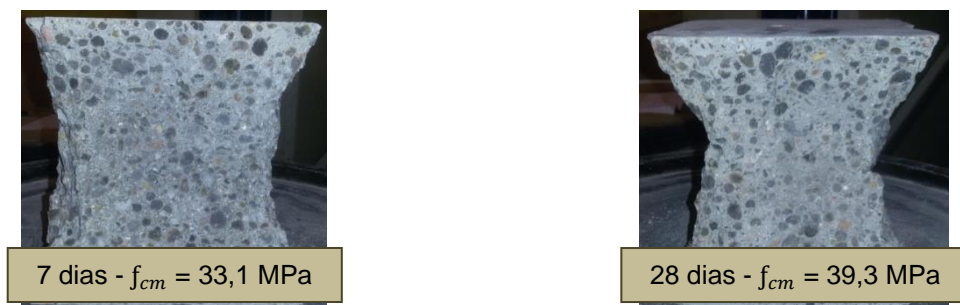


Figura 4.5 - Superfície de fractura de provetes de betão com Leca pré-saturada sujeitos a secagem e ensaiados à compressão para as respectivas idades de ensaio



2 dias - $f_{cm} = 28,5$ MPa



7 dias - $f_{cm} = 36,4$ MPa



28 dias - $f_{cm} = 40,1$ MPa

Figura 4.6 - Superfície de fractura de provetes de betão com Lytag pré-saturada curados em água e ensaiados à compressão para as respectivas idades de ensaio



2 dias - $f_{cm} = 32,1$ MPa



7 dias - $f_{cm} = 42,8$ MPa



28 dias - $f_{cm} = 48,3$ MPa

Figura 4.7 - Superfície de fractura de provetes de betão com Stalite pré-saturada curados em água e ensaiados à compressão para as respectivas idades de ensaio



7 dias - $f_{cm} = 43,5$ MPa

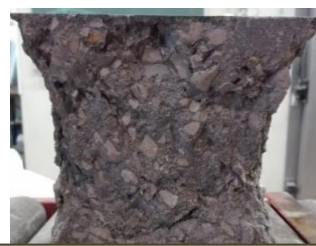


28 dias - $f_{cm} = 49,8$ MPa

Figura 4.8 - Superfície de fractura de provetes de betão com Brita calcária sujeitos a secagem e ensaiados à compressão para as respectivas idades de ensaio



2 dias - $f_{cm} = 33,0$ MPa



7 dias - $f_{cm} = 42,8$ MPa



28 dias - $f_{cm} = 51,2$ MPa

Figura 4.9 - Superfície de fractura de provetes de betão com Brita calcária curados em água e ensaiados à compressão para as respectivas idades de ensaio

4.2.1.2 Influência das condições de cura

Segundo Neville (1995), a cura do betão durante o seu endurecimento é essencial para a obtenção de um betão de boa qualidade. O betão deve manter-se saturado de forma a favorecer os processos de hidratação do cimento e consequentemente a capacidade resistente do betão.

Considerando o efeito das condições de cura em f_{cm} , verificam-se menores resistências à compressão nos BEAL curados continuamente em água, face aos betões de igual composição curados ao ar. Nos BEAL com Leca registaram-se reduções de 3 a 5% aos 7 dias e de 7 a 12% aos 28 dias (Tabela 4.1). Por sua vez, nos BAN a redução foi de 3% aos 28 dias, mas conduziu a um ligeiro aumento aos 7 dias.

A observação de resistências superiores em betões sujeitos a secagem é reportada por outros autores (Bogas 2011, Neville 1995, Mehta e Monteiro 2006). Neville (1995) sugere que a presença de água no betão afecta as forças de coesão entre as partículas sólidas, reduzindo a sua resistência. Como os provetes curados em água foram ensaiados completamente saturados, é natural que a sua resistência seja inferior à dos provetes conservados em ambiente “seco” até à data de ensaio. Assim, a influência da exposição dos provetes a diferentes condições de cura fica desta forma “mascarada” pelo estado de saturação do betão aquando do seu ensaio. Nos BEAL, acresce o facto de a resistência ser limitada pela resistência dos agregados (Bogas 2011). Assim, apenas se pode concluir que o grau de saturação dos provetes na altura do ensaio teve maior importância na resistência à compressão dos BEAL do que as melhorias que seriam de prever devido ao favorecimento dos processos de hidratação resultantes da cura em ambiente saturado.

No entanto, nos betões convencionais ocorre uma menor compensação destes efeitos, parecendo existir um maior agravamento da resistência com as condições de cura. Desse modo, conclui-se que os BAN são mais susceptíveis a diferentes condições de cura. Por um lado, a resistência destes betões é mais condicionada pela capacidade da argamassa do que nos BEAL. De facto, a argamassa ao ter menor influência na resistência dos BEAL, especialmente nos betões com agregados de menor massa volúmica, como é o caso da Leca, vai impedir que a quebra de hidratação devido ao défice de água disponível sobressaia nestes betões. Por outro lado, os BEAL são beneficiados pelo efeito de cura interna promovido pelos seus agregados, que permite reduzir a sensibilidade destes betões a ambientes de cura severos.

A análise das superfícies de fractura demonstrou que nos BAN sujeitos a secagem a fractura pela ITZ foi mais pronunciada face aos BAN saturados (4.2.1.1), o que sugere uma melhoria na ligação agregado-pasta atingida nos betões continuamente curados em água.

Em relação aos betões sujeitos a secagem, verifica-se que f_{cm} diminui cerca de 24% aos 7 dias e 21% aos 28 dias, ao substituir-se os agregados de brita calcária por agregados de Leca (neste caso pré-saturada) (Tabela 4.1). Assim, confirma-se que a resistência à compressão dos BEAL parece ser menos afectada pelas condições de cura.

4.2.1.3 Influência das condições de molhagem inicial dos agregados

A influência das condições de molhagem inicial dos agregados foi estudada nos BEAL com Leca curados continuamente em água (Tabela 4.1). Em geral, verifica-se que as condições de pré-molhagem tiveram pouca influência no desenvolvimento da resistência, sendo as diferenças da ordem de grandeza da variabilidade do ensaio. Ainda assim, ao considerar a Leca inicialmente seca,

verificou-se uma redução na resistência de 2% aos 7 dias e 5% aos 28 dias, face aos BEAL com Leca saturada (Tabela 4.1). Ao contrário do que seria previsto, a referida melhoria da ligação entre a pasta e os agregados que usualmente se verifica nos BEAL com agregados inicialmente secos, parece não afectar significativamente a resistência à compressão dos BEAL analisados no presente estudo. Tal pode ser justificado pelo facto de em ambos os casos a superfície de fractura ter atravessado os agregados sem mobilizar a capacidade da ITZ, conforme discutido em seguida.

Bogas (2011) também sugere que a resistência à compressão nos BEAL curados em água é pouco influenciada pelas condições de pré-molhagem. Ainda assim, em BEAL com agregados mais densos verifica que a resistência é superiores nos betões com agregados secos, devido a uma possível melhoria da ligação que se observa com agregados nesta condição. Segundo o autor as condições de saturação dos agregados tornam-se mais relevantes quando o betão “rompe” pela região de interface agregado-pasta, isto é, quando a argamassa contribui activamente para a resistência dos espécimes (idades mais jovens do betão e pastas mais fracas). Desta forma, e sabendo que as resistências atingidas nos BEAL produzidos neste estudo foram geralmente suficientes para que a superfície de fractura fosse predominantemente desenvolvida através dos agregados, é natural que a referida melhoria na ligação entre fases não se reflecta na resistência destes betões. Assim, apenas se pode concluir que para ambas as condições de pré-molhagem dos agregados, a ligação agregado-pasta foi superior à da resistência do próprio agregado.

4.2.2 Resistência à tracção por compressão diametral ($f_{ctm,sp}$)

Na Tabela 4.1, indicam-se os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tracção por compressão diametral, $f_{ctm,sp}$ aos 28 dias. Na Figura 4.10 ilustram-se as percentagens de resistência à tracção por compressão diametral obtidas nos BEAL em relação aos betões convencionais de igual composição, aos 28 dias de idade. Na Figura 4.11 ilustra-se o modo de fractura típico verificado neste ensaio.

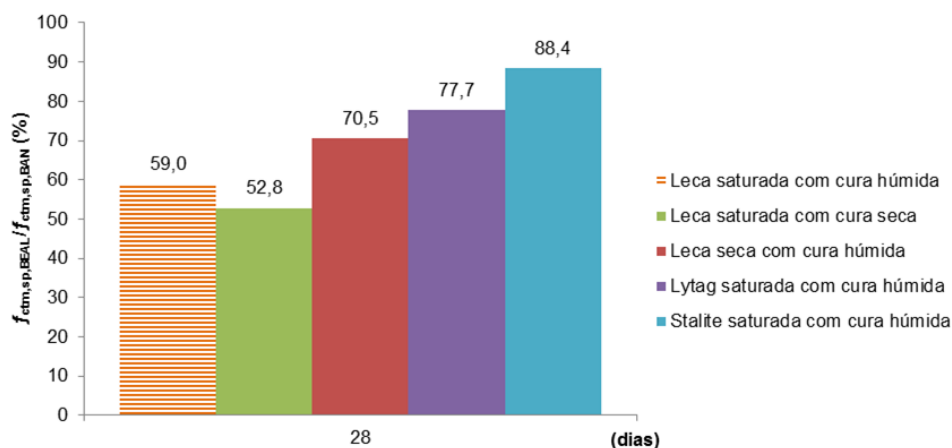


Figura 4.10 - Resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias, nos BEAL face aos betões convencionais de igual composição, para diferentes condições de cura

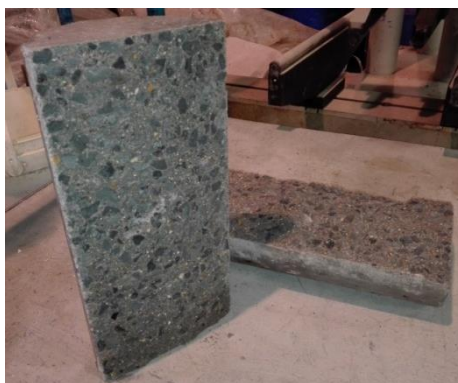


Figura 4.11 - Superfície de fractura típica de um provete com Stalite ensaiado à tracção por compressão diametral

A resistência média à tracção por compressão diametral, $f_{ctm,sp}$, aos 28 dias variou entre 1,6 e 3,3 MPa nos BEAL e entre 3,0 e 3,7 MPa nos BAN. Considerando os betões curados em ambiente saturado, observaram-se perdas de resistência de cerca de 29%, 41%, 22% e 12% quando se substituem os agregados de massa volúmica normal por Leca seca, Leca saturada, Lytag e Stalite, respectivamente. Tal como o observado na resistência à compressão, ocorreu uma maior redução de resistência à tracção nos BEAL com agregados mais porosos. Mais uma vez, os BEAL com Stalite apresentaram resistências próximas da dos BAN. No entanto, as diferenças entre betões foram superiores às observadas para a resistência à compressão. A maior perda de resistência à tracção do que à compressão deve-se ao facto da resistência limite ser inferior à tracção (Bogas 2011). Isso resulta do facto dos agregados não serem beneficiados pelo confinamento da pasta quando são sujeitos à tracção (Bogas et al. 2014).

Conforme apresentado na Tabela 4.1, verificam-se coeficientes de variabilidade elevados na resistência à tracção por compressão diametral, independentemente do tipo de agregado. O mesmo foi observado por Bogas (2011), que atribui esta maior variabilidade ao facto da superfície de fractura ser limitada a um único plano. Desta forma, a resistência é influenciada pela composição dessa região do betão, aumentando a dispersão de resultados (Bogas 2011). A maior variabilidade foi observada nos betões sujeitos a secagem, onde a forma como se desenvolve o gradiente de humidade em cada provete pode afectar significativamente a resistência. Um ligeiro aumento da variabilidade nos betões com Leca foi também observado por Bogas (2011), tendo sido atribuído à heterogeneidade entre partículas (inclusivamente entre partículas da mesma remessa), às maiores variações no teor de humidade dos betões e principalmente à maior dificuldade na estabilização destes betões no estado fresco. Ainda assim, em face dos resultados obtidos, pode-se concluir que a variabilidade nos BEAL foi da mesma ordem de grandeza da dos BAN.

4.2.2.1 Superfícies de fractura

A superfície de fractura nos BEAL ensaiados à tracção por compressão diametral foi regular, desenvolvendo-se predominantemente através dos agregados, o que demonstra que a resistência à tracção é limitada pela capacidade resistente dos agregados (Figura 4.12 a Figura 4.16). Ainda

assim, nos betões com Stalite ou Leca pré-saturada foi possível constatar em alguns casos o desenvolvimento da superfície de fractura através da ITZ (Figura 4.16 e Figura 4.14, respectivamente). Nestas situações, por motivos diferentes, a região de interface teve influência na resistência à tracção dos betões. No caso dos BEAL com Stalite, a capacidade resistente do agregado foi suficientemente elevada para se sobrepor à capacidade da pasta. Nos BEAL com Leca pré-saturada sujeitos a secagem, apesar dos agregados leves serem mais fracos do que a argamassa, a ligação agregado-pasta pode ter sido prejudicada pelos efeitos de microfendilhação introduzidos pela secagem diferencial dos betões. Nos betões convencionais observou-se que a superfície de fractura propagou-se tanto pelos agregados como pela zona de interface agregado-pasta, observando-se com frequência agregados intactos com ausência de pasta na sua superfície (Figura 4.17 e Figura 4.18). Tal como verificado na resistência à compressão, a zona de transição nos BEAL assume um papel menos relevante do que nos BAN.

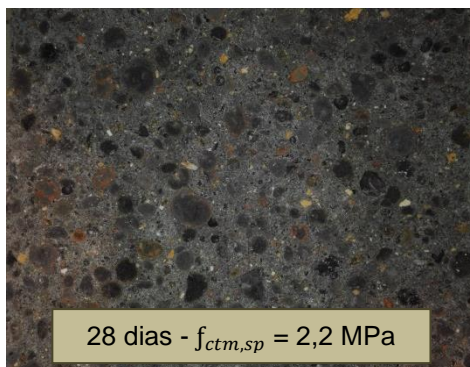


Figura 4.12 - Superfície de fractura de betão com Leca pré-saturada curado em água e ensaiado à tracção por compressão diametral aos 28 dias

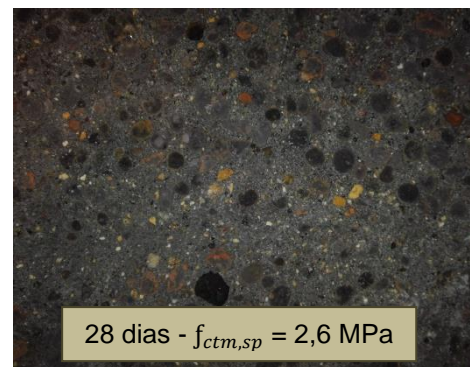


Figura 4.13 - Superfície de fractura de betão com Leca inicialmente seca curado em água e ensaiado à tracção por compressão diametral aos 28 dias

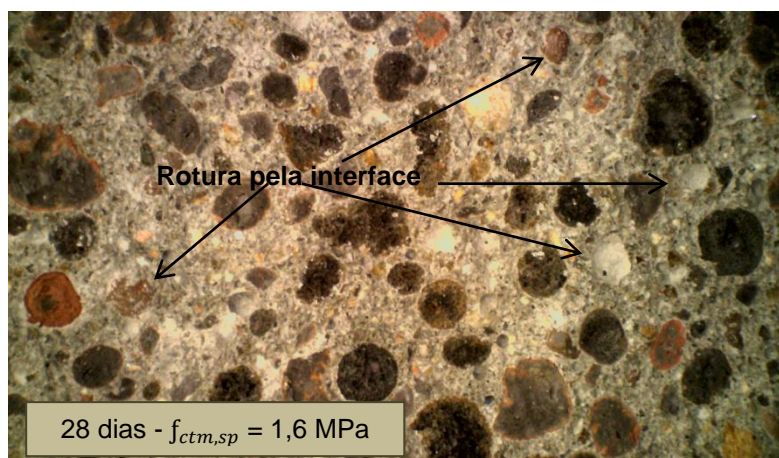


Figura 4.14 - Superfície de fractura de betão com Leca pré-saturada sujeito a secagem e ensaiado à tracção por compressão diametral aos 28 dias

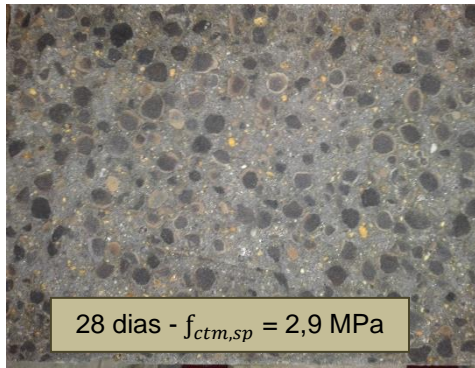


Figura 4.15 - Superfície de fractura de betão com Lytag pré-saturada curado em água e ensaiado à tracção por compressão diametral aos 28 dias



Figura 4.16 - Superfície de fractura de betão com Stalite pré-saturada curado em água e ensaiado à tracção por compressão diametral aos 28 dias

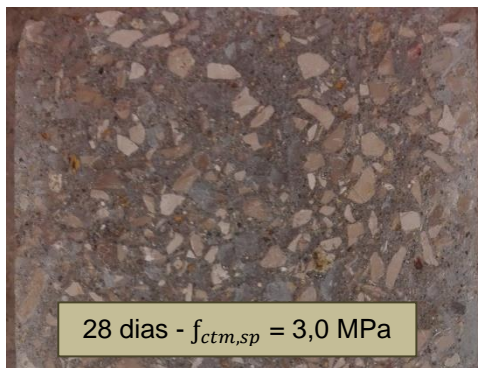


Figura 4.17 - Superfície de fractura de betão com Brita calcária sujeito a secagem e ensaiado à tracção por compressão diametral aos 28 dias



Figura 4.18 - Superfície de fractura de betão com Brita calcária curado em água e ensaiado à tracção por compressão diametral aos 28 dias

4.2.2.2 Influência das condições de cura

Contrariamente ao observado para a resistência à compressão (f_{cm}) verificou-se um decréscimo generalizado de $f_{ctm,sp}$ nos betões sujeitos a cura seca. Tendo em consideração as diferentes condições de cura, observaram-se reduções da resistência à tracção de 27 a 38% nos BEAL com Leca, em função das condições de molhagem inicial dos agregados, ao passo que nos betões convencionais, essas reduções foram de cerca de 19%. Desse modo conclui-se que os betões com agregados leves foram mais sensíveis às condições de cura do que os betões convencionais. Conclusões semelhantes foram reportadas na literatura (Neville 1995, ACI213R 2003, Bogas et al. 2014).

De acordo com o ACI213R (2003), essa perda de resistência advém do facto de o betão não secar uniformemente. As faces exteriores do betão, por estarem mais expostas, são mais afectadas pela perda de humidade comparativamente ao interior, instalando-se tensões nas imediações dos agregados que resultam em microfendilhação na sua periferia. Essas tensões, à partida já instaladas, sobrepõem-se às tensões de tracção originadas pelo carregamento do provete durante o ensaio (Bogas 2011). Os agregados, ao serem introduzidos previamente saturados, vão retardar a secagem do interior do betão e assim promover um maior gradiente de humidade entre o interior e o exterior,

que conduz a maiores reduções de resistência à tracção, face aos betões convencionais. De facto, como a Leca é um agregado bastante poroso, a troca de água entre o agregado e a pasta é facilitada, retardando a secagem do interior. Desse modo, ocorre uma maior diferença de humidade entre o interior e o exterior, o que segundo os autores supracitados conduz à redução de resistência dos betões. Embora não seja relevante para a dimensão considerada nos provetes de ensaio, os BEAL são ainda sujeitos ao desenvolvimento de maiores gradientes térmicos, devido ao melhor isolamento do calor de hidratação, o que agrava a perda de resistência (Bogas 2011).

Assim, as tensões instaladas na vizinhança dos agregados resultantes da secagem dos betões e a posterior microfendilhação dessa região aparenta ser a justificação para as reduções de resistência registadas. A fractura pela zona de transição ocasionalmente observada nos BEAL com Leca sujeitos a cura seca sugere que esta região apresentou características mecânicas inferiores nestes betões face aos betões homólogos curados em água.

4.2.2.3 Influência das condições de molhagem inicial dos agregados

Relativamente à influência das condições de molhagem inicial dos agregados, registaram-se reduções de resistência à tracção por compressão diametral nos BEAL com Leca pré-saturados, independentemente das condições de cura. Nos betões curados em ambiente saturado, as reduções nos BEAL com agregados de Leca inicialmente saturados foram de 16% face aos BEAL com Leca inicialmente seca.

Bogas (2011) também reporta ligeiros aumentos de resistência à tracção (5 e 15% nos betões com Arlita e Leca, respectivamente) ao introduzir agregados inicialmente secos. As diferenças de resistência observadas podem estar relacionadas com a melhoria das características da zona de interface. Como as condições de pré-molhagem foram estudadas com betões curados continuamente em água, o fenómeno de cura interna perde importância, uma vez que a perda de água que ocorre no interior dos provetes devido a reacções de hidratação é compensada pela entrada de água provinda do exterior. Assim, o facto de se introduzir agregados saturados pode ser prejudicial, pois a Leca comportar-se-á como um agregado de massa volúmica normal, na medida em que impede a interpenetração de pasta para o interior do agregado e não elimina os fenómenos de exsudação na sua superfície. Por outro lado, a Leca ao ser introduzida inicialmente seca promove a diminuição de porosidade e microfendilhação na ITZ, como consequência da menor concentração de água em torno dos agregados, conforme referido por outros autores (Bogas 2011, Chandra e Berntsson 2003, Wasserman e Bentur 1996, Lo et al. 2007). Contudo, como a superfície de fractura atravessou maioritariamente os agregados, pode considerar-se que a resistência à tracção não deverá ser significativamente afectada pelo teor de saturação inicial dos agregados. De facto, segundo Bogas (2011), em condições de cura contínua em água, a resistência à tracção dos BEAL não é significativamente influenciada por níveis de pré-saturação dos agregados inferiores a 48 horas em água e cuja superfície de fractura ocorra preferencialmente pelos agregados.

No entanto, no presente estudo, apesar da superfície de fractura ocorrer maioritariamente através dos agregados, verificou-se esporadicamente a fractura pela ITZ nos BEAL com Leca inicialmente saturada (Figura 4.19). Inclusivamente, comparando os resultados de resistência à tracção com os obtidos na resistência à compressão, observa-se que as condições de molhagem inicial dos agregados assumem maior importância na resistência à tracção. Desta forma, conclui-se que a incorporação de agregados inicialmente secos terá promovido uma melhor ligação agregado-pasta que conduziu a um ligeiro aumento da resistência à tracção dos BEAL.

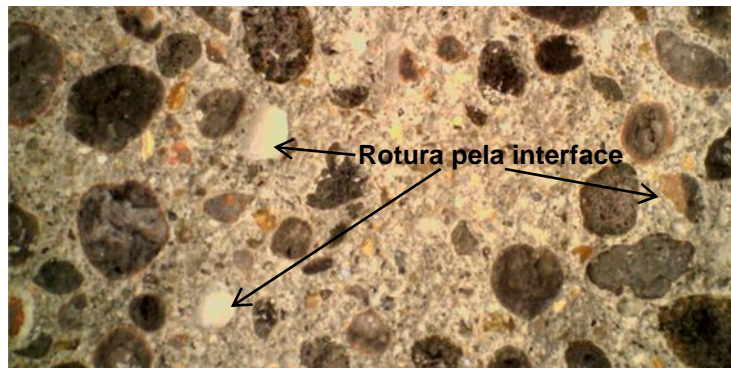


Figura 4.19 - Superfície de fractura de betão com Leca pré-saturada pela ITZ

4.2.3 Caracterização da interface agregado-pasta

Com o objectivo de se compreender melhor a influência do tipo de agregado na ligação agregado-pasta e dessa forma interpretar algumas das tendências verificadas nas secções anteriores, foram realizados ensaios complementares de tracção directa, inicialmente em prismas de argamassa e numa segunda etapa, em provetes de resina e argamassa onde se procedeu à caracterização directa da aderência agregado-pasta. Complementarmente foi ainda efectuada uma análise qualitativa da ITZ, recorrendo à microscopia de varrimento electrónico, apresentada na secção 4.2.5.

Importa referir que os ensaios de tracção directa e de aderência estão associados a grande variabilidade, resultantes das várias dificuldades inerentes à sua instrumentalização e realização. Desde logo, os resultados obtidos são fortemente afectados pelo perfeito alinhamento dos provetes de betão com a direcção da carga de tracção imposta pelo equipamento de ensaio, de modo a evitar o desenvolvimento indesejável de excentricidades e momentos flectores secundários (Neville 1995, Canovas 2004). Por outro lado, a formação da primeira fenda (na região mais fraca do provete), não ocorre de forma espontânea, propagando-se instantaneamente a toda a secção transversal. Neste caso, parte da carga passa a ser sustentada pela região não fendilhada do provete e ocorre uma excentricidade na força que é aplicada no centro da secção, gerando-se um momento secundário que vai conduzir à fractura precoce do provete. Acrescente-se ainda que este ensaio é muito susceptível a diferenças de nivelamento entre o topo e a base dos provetes. Dessa forma, conclui-se que estes ensaios são facilmente susceptíveis ao desenvolvimento de gradientes de tensões durante a aplicação da carga, o que conduz a valores subestimados da resistência à tracção ou da tensão de

aderência. Assim, este fenómeno, que é corrente e difícil de evitar neste tipo de ensaios, dificulta a interpretação dos resultados obtidos.

4.2.3.1 Resistência à tracção axial em provetes de reduzida dimensão (f_{ctm})

Nesta secção procede-se à caracterização do comportamento à tracção axial, f_{ctm} , dos betões produzidos com os diferentes tipos de agregados utilizados no presente trabalho e cuja composição é indicada na Tabela 3.7 em 3.4.2.1. A resistência média à tracção axial foi determinada de acordo com os procedimentos descritos em 3.5.3, a partir do ensaio de três prismas de 160x40x40 mm³, previamente curados em câmara condicionada, de humidade relativa superior a 95%, até à data de ensaio.

Conforme referido no capítulo 3, foram consideradas misturas complementares com o objectivo de tornar o estudo da influência do tipo de agregado nas características da ITZ mais abrangente. Para tal, foram adicionalmente produzidos betões com agregados de brita granítica, bem como betões de referência com esferas de vidro ou constituídos apenas por argamassa. Os betões de referência com esferas de vidro visam simular condições mínimas de ligação entre o agregado e a pasta. Por sua vez, os provetes apenas com argamassa visam quantificar a capacidade máxima à tracção dos betões, caso estes não sejam afectados pela presença de ITZs ou agregados mais fracos.

Na Tabela 4.2 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tracção axial, f_{ctm} , bem como a sua relação face à resistência à tracção por compressão diametral, $f_{ctm} / f_{ctm,sp}$, quando aplicável. Nesta tabela é ainda indicado o coeficiente de variação, CV_{fct} e o desvio máximo entre os valores extremos e os valores médios da resistência à tracção axial para cada betão (f_{ctm}).

Tabela 4.2 - Resultados aos 28 dias dos ensaios de tracção axial

Tipo de agregado (molhagem inicial dos agregados)	f_{ctm} (MPa)	CV_{fct} (%)	$ f_{cti} - f_{ctm} _{max}$	$(f_{ctm} / f_{ctm,sp})$	Idade dos betões (dias)	Processo de cura do betão
Leca (saturados)	1,4	7,3	0,1	0,64	28	Húmida
Leca (secos)	1,8	3,2	0,1	0,69		
Lyttag (saturados)	2,0	4,1	0,1	0,69		
Stalite (saturados)	2,2	5,0	0,1	0,67		
Brita calcária	3,3	11,8	0,5	0,89		
Brita granítica	2,0	3,0	0,1	-		
Esferas de vidro	1,0	4,7	0,1	-		
Apenas areia - argamassa	3,1	1,2	0,0	-		

Na Figura 4.20 indicam-se os valores relativos da resistência à tracção axial aos 28 dias, face aos betões de referência produzidos com agregados de origem calcária de igual composição. Na Figura 4.21 ilustra-se o modo de fractura tipicamente observado neste ensaio.

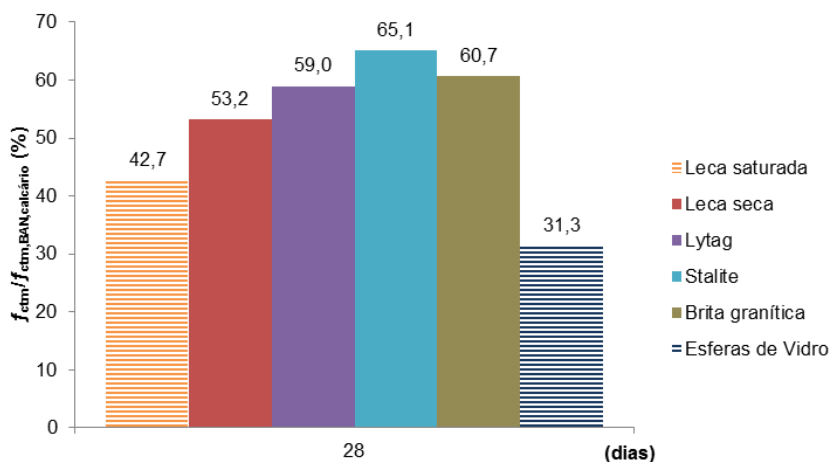


Figura 4.20 - Resistência à tracção axial aos 28 dias face aos betões convencionais com brita calcária de igual composição

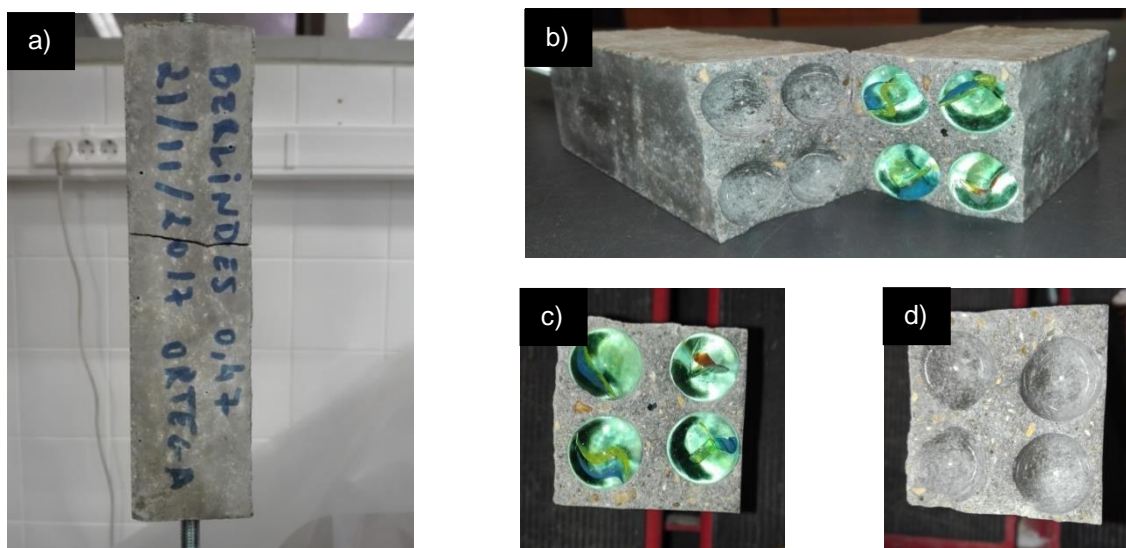


Figura 4.21 - Fractura típica dos betões à tracção axial: a) fractura pela zona central do provete; b), c) e d) fractura pela ITZ em provete com esferas de vidro

A resistência média à tracção axial, f_{ctm} , aos 28 dias variou entre 1,4 e 2,2 MPa nos BEAL, sendo naturalmente menor nos BEAL com agregados leves mais porosos (Leca) e maior nos BEAL com agregados de maior massa volúmica (Stalite). Conforme é discutido em 4.2.3.1.1 a superfície de fractura nestes betões envolve a participação dos agregados, estando os de maior porosidade associados a menor resistência mecânica. Face aos BAN com brita calcária, a redução de resistência foi de 47%, 57%, 41% e 35% nos BEAL com Leca seca, Leca saturada, Lytag e Stalite,

respectivamente. A resistência desenvolvida nos BEAL foi inferior à da argamassa de referência, demonstrando que, independentemente do tipo de agregado, a incorporação de agregado leve conduz a uma redução da resistência à tracção.

Mesmo nos betões com agregados leves menos porosos a redução de resistência foi significativa, tendo sido superior à observada nos ensaios mecânicos de resistência à compressão e resistência à compressão diametral. Para além da menor capacidade resistente do agregado, que se reflecte de forma mais importante nos ensaios de tracção axial, os resultados dos ensaios são afectados pela posição e forma como os agregados se distribuem na superfície de fractura. Por um lado, as superfícies de fractura que atravessam um maior número de agregados ou interfaces estão associadas a menores resistências à tracção. Por outro lado, nos betões em que a distribuição de agregado não é uniforme ao longo da secção podem gerar-se excentricidades durante o ensaio que promovem a fractura precoce destes betões. Por exemplo, nos betões com granito verificou-se que a superfície de fractura teve um desenvolvimento diagonal, demonstrando a heterogeneidade e comportamento diferencial destes betões (Figura 4.28).

Nos BAN, a resistência à tracção foi de 2,0 a 3,3 MPa, para os betões com brita granítica e brita calcária, respectivamente. Conforme discutido em 4.2.3.1.1 estes betões desenvolveram superfícies de fractura diferentes. No caso dos BAN com agregado calcário foi possível mobilizar maiores tensões de tracção sem que ocorresse fractura precoce pela interface. Neste caso, a ligação agregado-pasta terá sido mais forte, permitindo inclusivamente que a capacidade máxima resistente do agregado fosse atingida. Dado que a resistência foi condicionada pelo agregado e este apresenta uma maior capacidade resistente do que a matriz cimentícia envolvente, foi possível atingir resistências à tracção ligeiramente superiores às da argamassa de referência. Por sua vez, nos betões com granito a resistência fica limitada pela fraca capacidade de ligação entre a matriz e a superfície pouco porosa destes agregados de natureza siliciosa. Isso permitiu inclusivamente que os BEAL com agregados mais fracos de Lytag e Stalite fossem capazes de desenvolver ligações agregado-pasta de melhor qualidade, apresentando resistências à tracção semelhantes (Lytag) a ligeiramente superiores (Stalite - 9%) às do BAN com granito. De facto, vários autores reportam uma melhoria da ITZ nos BEAL (Chandra e Berntsson 2003, Wasserman e Bentur 1996, Bogas 2011), atribuída à mais fácil interpenetração da pasta nos agregados leves e ao melhor equilíbrio de humidade entre as duas fases. Por outro lado, os BEAL beneficiam de uma maior compatibilidade elástica entre os agregados e a matriz cimentícia (Bogas 2011). Devido à maior proximidade entre os módulos de elasticidade das duas fases, nos BEAL desenvolve-se menos microfendilhação nas regiões de interface sob acções mecânicas ou diferidas, que contribui para uma melhoria destas regiões (Bogas 2011).

Nos betões com esferas de vidro a resistência atingida foi de apenas 1,0 MPa, dado que a ligação agregado-pasta foi fracamente mobilizada, ficando mais distante da capacidade resistente máxima da argamassa.

4.2.3.1.1 Superfícies de fractura

Em função do tipo de agregado analisado, observaram-se superfícies de fractura bastante distintas. Nos BEAL com Leca, a superfície de fractura desenvolveu-se preferencialmente através dos agregados (Figura 4.23 e Figura 4.24), indicando que a resistência à tracção nestes betões foi limitada pela capacidade resistente dos agregados. Contudo, nos provetes com Leca inicialmente saturada foi possível observar casos em que a superfície de fractura contornou os agregados, indicando que a ligação agregado-pasta pode ter sido prejudicada (Figura 4.23). Em relação aos BEAL com Lytag ou Stalite (Figura 4.25 e Figura 4.26, respectivamente), verificou-se que a superfície de fractura ocorreu tanto pela região de interface como através dos agregados, sugerindo que a resistência à tracção axial foi afectada por estas duas fases. Conforme seria esperado, a interface agregado-pasta teve maior influência na resistência à tracção dos betões com agregados leves saturados e de maior massa volúmica, em especial no caso da Stalite em que a capacidade resistente do agregado é superior e a ligação agregado-pasta é dificultada pela menor porosidade superficial destes agregados.

Nos betões com agregados de massa volúmica normal também se verificaram comportamentos distintos em função do tipo de agregado. Nos betões com agregados de origem calcária (Figura 4.27), a superfície de fractura desenvolveu-se preferencialmente pelos agregados, indicando que a resistência à tracção foi limitada pela sua resistência. Nestes casos, aparentemente foi atingida uma boa resistência na ligação agregado-pasta. Por outro lado, nos betões com granito, a superfície de fractura propagou-se tendencialmente pela ITZ (Figura 4.28), sugerindo uma menor capacidade de ligação atingida entre o agregado e a pasta, pelo menos face à capacidade à tracção destes agregados.

Em tracção directa, dado que a rigidez dos agregados normais é superior à da argamassa circundante, as linhas de acção da tracção tendem a concentrar-se no agregado, promovendo a sua fractura precoce (Figura 4.22a). Por outro lado, nos BEAL a rigidez do agregado é inferior à da pasta, o que faz com que as linhas de tracção contornem o agregado e promovam uma maior acção sobre a ITZ (Figura 4.22b).

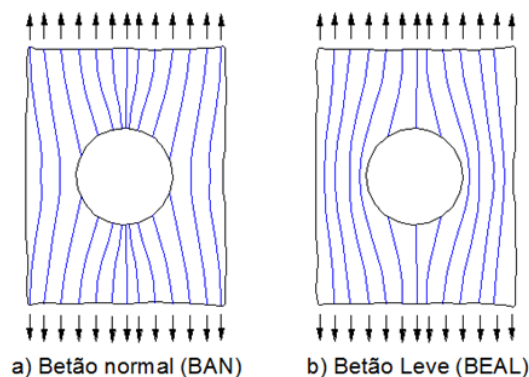


Figura 4.22 - Transferência de tensões de tracção: a)Nos BAN; b)Nos BEAL

Finalmente, nos provetes de referência com esferas de vidro verificou-se, como previsto, que a superfície de fractura propagou-se através da ITZ (Figura 4.29), verificando-se inclusivamente o destacamento das esferas. Neste caso, a ausência de porosidade no agregado aumenta a sua capacidade resistente e dificulta a sua ligação com a pasta. Nestes agregados de reduzida porosidade deverá também ocorrer um efeito de parede que contribui para uma maior acumulação de água e aumento de porosidade na região da ITZ.

Importa salientar que quando a superfície de fractura nos BEAL se desenvolveu pela ITZ observou-se sempre a presença de material cimentício aderido na superfície dos agregados. Ao passo que nos betões com granito ou esferas de vidro, a superfície dos agregados apresentou-se limpa, sem vestígios significativos de pasta, o que indicia uma pior ligação agregado-pasta.

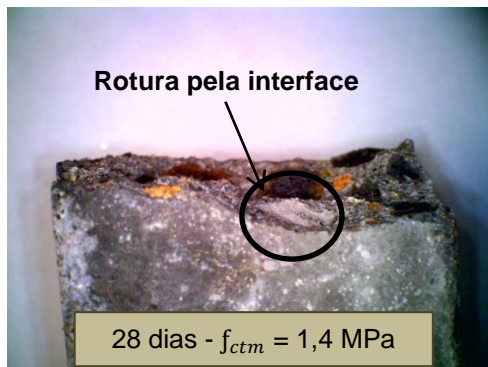


Figura 4.23 - Superfície de fractura de provete com Leca pré-saturada ensaiado à tracção axial (fractura maioritariamente através do agregado, mas também em situações esporádicas envolvendo a ITZ)

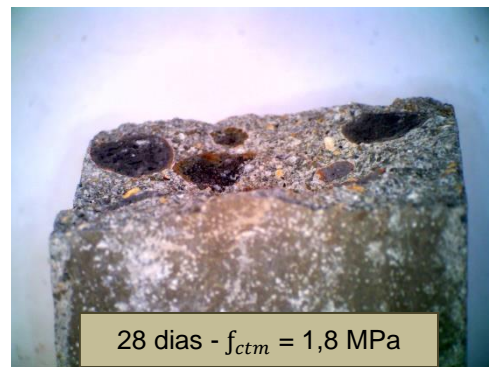


Figura 4.24 - Superfície de fractura de provete com Leca inicialmente seca ensaiado à tracção axial (fractura através do agregado)

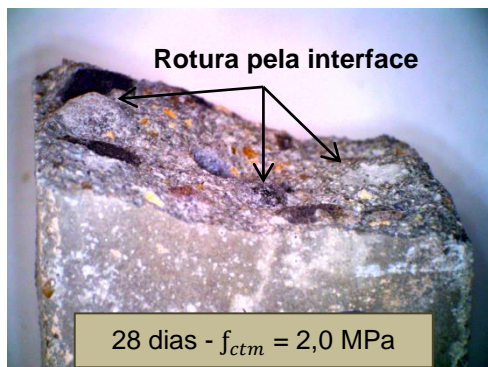


Figura 4.25 - Superfície de fractura de provete com Lytag pré-saturada ensaiado à tracção axial (superfícies de fractura envolvendo regiões em que esta atravessa o agregado, e outras em que atravessa a ITZ)

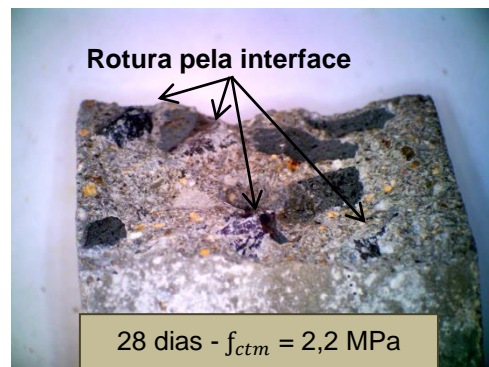


Figura 4.26 - Superfície de fractura de provete com Stalite pré-saturada ensaiado à tracção axial (superfícies de fractura envolvendo regiões em que esta atravessa o agregado, e outras em que atravessa a ITZ)

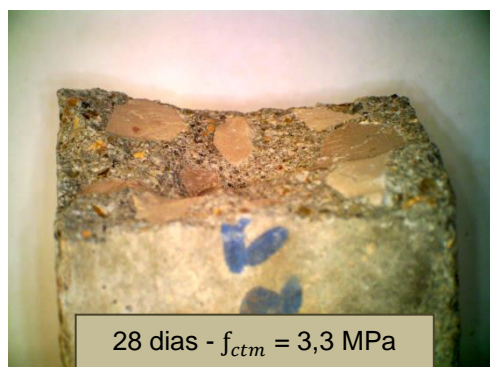


Figura 4.27 - Superfície de fractura de provete com Brita calcária ensaiado à tracção axial (fractura através do agregado)

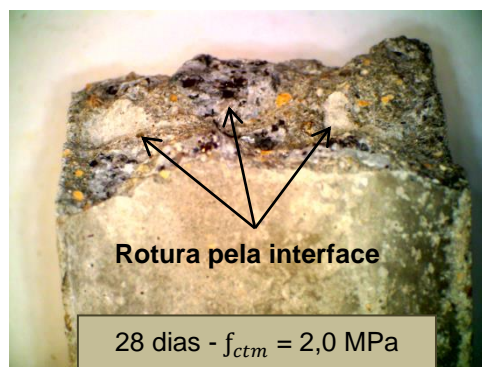


Figura 4.28 - Superfície de fractura de provete com Brita granítica ensaiado à tracção axial (superfícies de fractura envolvendo maioritariamente a ITZ)

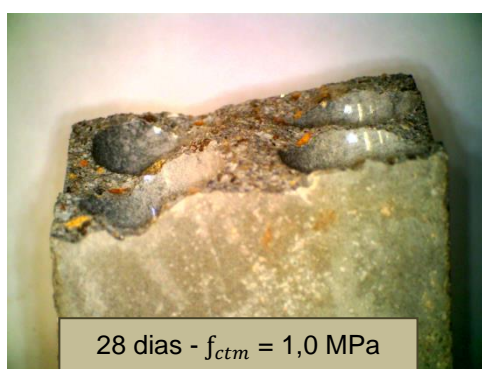


Figura 4.29 - Superfície de fractura de provete com esferas de vidro ensaiado à tracção axial (Fractura através da ITZ, com destaque dos agregados)

4.2.3.1.2 Influência das condições de molhagem inicial dos agregados

Tal como observado para a resistência à compressão diametral, a incorporação de Leca previamente saturada conduziu a maiores reduções de resistência à tracção do que a Leca seca. Os BEAL com Leca saturada apresentaram uma redução de 22% na resistência aos 28 dias face aos BEAL com Leca seca. Desse modo, confirma-se que as condições de molhagem inicial do agregado afectam o comportamento mecânico dos BEAL. Pelas razões referidas em 4.2.2.3., o aumento de resistência verificado nos BEAL com agregados previamente secos indica que a qualidade da ITZ nestes betões foi superior em relação aos BEAL de igual composição com agregados pré-saturados.

De facto, dado que a Leca é um agregado com grande capacidade de absorção, se for introduzida inicialmente seca, facilita o equilíbrio de humidade entre fases, promovendo a aderência mecânica entre estas. Assim, eventuais fenómenos de exsudação que conduzam uma maior porosidade e microfendilhação da ITZ são eliminados. Na análise das superfícies de fractura em 4.2.3.1.1, confirma-se que os betões com Leca saturada foram capazes de desenvolver fracturas parciais pela interface. Conforme referido por vários autores, o melhoramento da ITZ nos BEAL só se deverá tornar efectivo quando os agregados são introduzidos previamente secos (Chandra e Berntsson 2003, Wasserman e Bentur 1996, Bogas 2011).

4.2.3.2 Ensaios de aderência agregado-pasta

Nesta secção é caracterizada a aderência entre os diferentes tipos de agregado estudados e a pasta cimentícia, cujas composições se indicam na Tabela 3.8 em 3.4.4.1. Os ensaios de aderência foram realizados aos 28 dias de acordo com os procedimentos descritos em 3.5.3. Para cada composição, foram ensaiados quatro provetes cúbicos de 40 mm de aresta, curados em ambiente de cura húmida até à idade de ensaio. Estes ensaios foram efectuados em duas fases, prevendo inicialmente pasta de a/c corrente ($a/c=0,47$) e num estudo complementar, pastas com a/c de 0,70. A realização de ensaios sobre provetes com matrizes cimentícias mais fracas teve como objectivo permitir que a capacidade resistente do agregado tivesse menor influência nos resultados obtidos. Dessa forma, existiu uma maior probabilidade da superfície de fractura desenvolver-se através da ITZ, sendo possível estimar a tensão de aderência agregado-pasta.

Para que a fractura ocorra pela ITZ, a força de aderência (F_b), que depende da tensão média de aderência agregado-pasta (f_b) e da área superficial do agregado em contacto com a pasta (A_b), tem de ser menor do que a resistência do agregado (F_r), dado pela tensão resistente do mesmo (f_r), multiplicada pela sua área de secção transversal (A_a) (Figura 4.30).

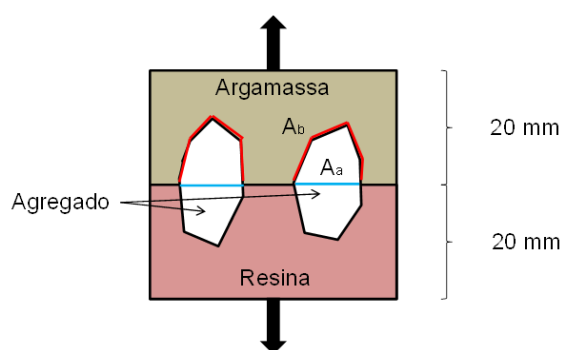


Figura 4.30 - Acção sobre as partículas de agregado durante os ensaios de aderência

4.2.3.2.1 Composições com relação a/c de 0,47

Na Tabela 4.3, indicam-se os resultados obtidos nos ensaios de aderência para as composições com relação a/c igual a 0,47. Nesta tabela é indicada a tensão de fractura no agregado ou na ITZ, consoante o modo de fractura do provete, bem como o coeficiente de variação, $CV_{fct,agr}$ e o desvio máximo entre os valores extremos e os valores médios da resistência à tracção medida no agregado ($f_{ctm,agr}$). Tal como efectuado para a resistência à tracção axial, para efeitos de comparação foram ensaiados também provetes apenas com argamassa, que dão uma ideia da tensão de aderência resina-pasta.

Nesta fase, envolvendo argamassas mais compactas de relação a/c de 0,47, a superfície de fractura atravessou os agregados, independentemente do tipo de agregado. Dessa forma, obteve-se informação sobre a sua capacidade resistente e não sobre a ligação agregado-pasta, conforme inicialmente pretendido. Visto que os resultados reflectem a capacidade resistente dos agregados, confirma-se que os agregados de maior massa volúmica estão associados a maiores resistências à

tracção. Como seria de esperar, os agregados de granito, essencialmente de natureza siliciosa, atingiram maior resistência do que o calcário à base de calcite. Por sua vez, é possível constatar uma boa correlação entre a resistência e a massa volúmica dos agregados leves (Figura 4.31), dado que estas propriedades são ambas afectadas pela porosidade dos agregados.

Tabela 4.3 - Resultados aos 28 dias dos ensaios de aderência agregado-pasta para argamassas com relação a/c de 0,47

Tipo de agregado (molhagem inicial dos agregados)	$f_{ctm,agr}$ (MPa)	$CV_{fct,agr}$ (%)	$ f_{cti,agr} - f_{ctm,agr} _{max}$	$f_{ctm,aderencia}$ (MPa)	Idade dos provetes (dias)	Processo de cura
Leca (saturados)	1,6	33,6	0,9	-	28	Húmida
Leca (secos)	1,4	32,0	0,7	-		
Lyttag (saturados)	3,2	4,0	0,2	-		
Stalite (saturados)	4,0	17,1	1,0	-		
Brita calcária	4,8	5,9	0,4	-		
Brita granítica	5,3	8,6	0,7	-		
Apenas areia – argamassa 0,47	-	-	-	0,2		

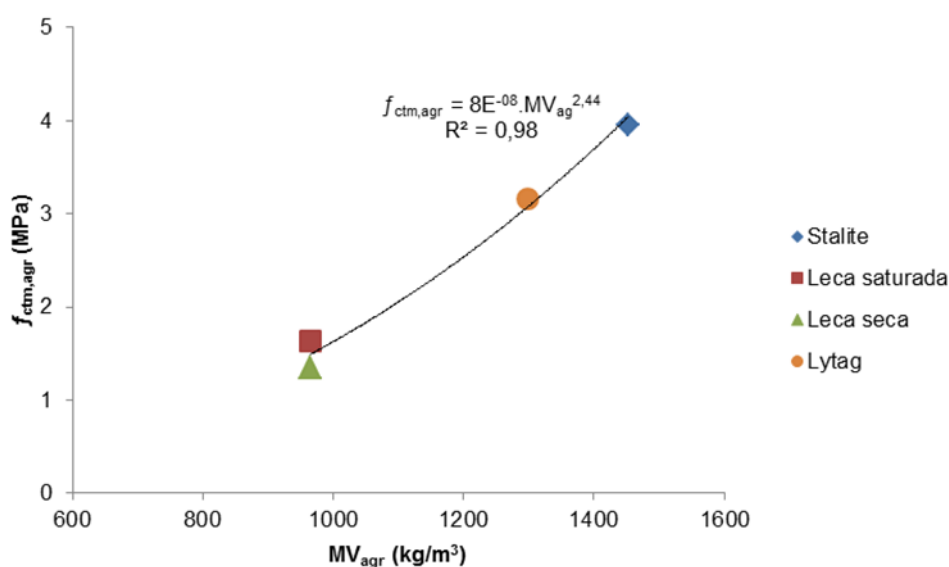


Figura 4.31 - Relação entre a resistência à tracção dos agregados ($f_{ctm,agr}$) e a sua massa volúmica (MV_{agr})

Dado que ocorreu a fractura dos agregados, as condições de molhagem inicial tiveram pouca influência nos resultados obtidos. De facto, de acordo com Bogas (2011) a resistência mecânica do agregado não é afectada de forma significativa pelo seu teor de humidade.

Na Figura 4.32 ilustra-se a superfície de fractura tipicamente observada nos ensaios de aderência realizados durante esta primeira fase. Conforme previsto, a fractura iniciou-se sempre pela zona de interface argamassa-resina, que tal como indicado na Tabela 4.3 está associada às menores tensões resistentes de aderência. Comparando estes resultados com os obtidos nos ensaios realizados em provetes com apenas argamassa (Tabela 4.2 em 4.2.3.1), confirma-se que a tensão de aderência argamassa-resina é muito inferior à tensão resistente da argamassa, evitando-se, como era desejável, o desenvolvimento de fracturas por coesão na argamassa.

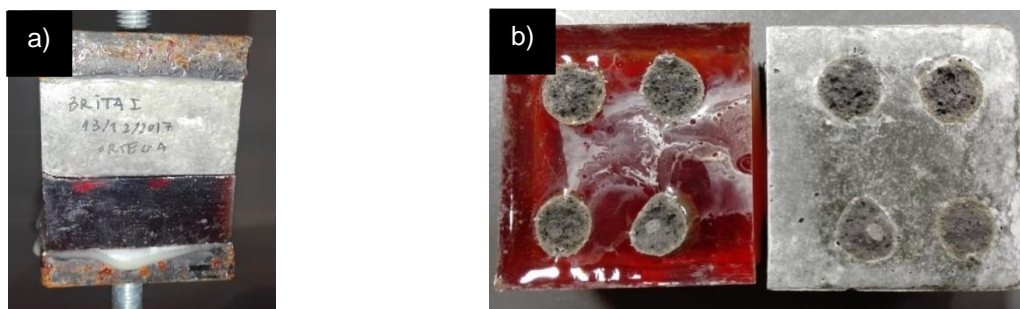


Figura 4.32 - Fractura típica observada no ensaio de aderência: a)fractura pela zona de contacto resina-argamassa em provete com agregados calcários; b)superfície de fractura através dos agregados num provete com incorporação de Leca

Como referido, nas condições em que foram realizados os ensaios, a força resistente de aderência agregado-pasta (F_b) terá sido superior à da força resistente do agregado (F_R). O posicionamento e a forma alongada dos agregados, principalmente no caso dos agregados de massa volúmica normal (Brita calcária e granítica), contribuíram para que ocorresse este modo de fractura. De facto ao se ter optado por colocar os agregados igualmente emergidos na resina e na pasta, acrescido à forma alongada dos mesmos (de natureza britada), fez com que a área de contacto ente os agregados e a pasta (A_b) fosse consideravelmente superior à área traccionada dos agregados (A_a) (Figura 4.30). Desse modo, apesar da tensão de aderência ser inferior à tensão resistente dos agregados (f_R), a fractura ocorreu preferencialmente pelos agregados. Adicionalmente, conforme discutido na próxima secção (Ver Figura 4.45), agregados com a configuração indicada na Figura 4.33 estão mais sujeitos a acções de corte agregado-pasta do que a tensões de tracção agregado-pasta.

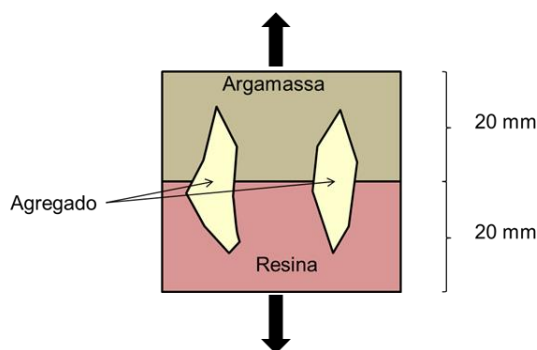


Figura 4.33 - Incremento da área de aderência agregado-pasta devido ao posicionamento e forma alongada dos agregados

Por outro lado, tal como referido, é difícil evitar o desenvolvimento de excentricidades durante a realização destes ensaios de tracção pura. Desse modo, poderão ser introduzidos momentos flectores secundários que colocam o agregado em flexão e precipitam a sua fractura. Neste caso, devido à elevada esbelteza dos agregados (Figura 4.33), a fractura pela ITZ é dificultada.

Face aos agregados de massa volúmica normal (granito), verificaram-se reduções médias de resistência de aproximadamente 71,9%, 40,4% e 25,4% para os agregados Leca, Lytag e Stalite, respectivamente. Estas diferenças entre agregados não corroboram com as tendências observadas nos ensaios de tracção axial em 4.2.3.1, o que demonstra a importância da ITZ na resistência mecânica dos betões. Este aspecto torna-se evidente quando se compara o comportamento relativo dos betões com calcário e com granito, em que apesar dos primeiros apresentarem menor capacidade resistente, permitem o desenvolvimento de betões de maior resistência à compressão e tracção, devido à melhor qualidade atingida na ITZ.

Como referido, nos ensaios de aderência a fractura atravessou preferencialmente os agregados, independentemente do tipo de agregado. Na Figura 4.34 a Figura 4.39 ilustram-se as superfícies de fractura observadas para cada tipo de provete nos ensaios de aderência realizados nesta fase, que envolveu pastas de maior compacidade. A análise das superfícies de fractura permite observar um bom envolvimento entre a pasta e os agregados na generalidade dos provetes. A argamassa apresenta um aspecto homogéneo e uniforme, sem presença de vazios significativos que indiciem condições deficientes de compactação. Nem sempre foi possível garantir um posicionamento simétrico dos agregados, o que contribui para o desenvolvimento de excentricidades durante a realização dos ensaios, podendo conduzir a valores subestimados da capacidade resistente à tracção dos agregados.



Figura 4.34 - Superfície de fractura de provete através dos agregados de Leca pré-saturada



Figura 4.35 - Superfície de fractura de provete através dos agregados de Leca inicialmente seca



Figura 4.36 - Superfície de fractura de provete através dos agregados de Lytag pré-saturada



Figura 4.37 - Superfície de fractura de provete através dos agregados de Stalite saturada



Figura 4.38 - Superfície de fractura de provete através dos agregados de Brita calcária



Figura 4.39 - Superfície de fractura de provete através dos agregados de Brita granítica

É possível também observar variações importantes de porosidade entre as diferentes partículas de Leca, o que contribui para uma maior variabilidade nos resultados obtidos para este tipo de agregado. De facto, verifica-se que a dispersão dos resultados tende a aumentar com o aumento de porosidade dos agregados ($CV_{fct,agr}$ na Tabela 4.3). A heterogeneidade entre agregados foi superior na Leca, conduzindo a variações na tensão resistente. Na Figura 4.40 ilustram-se duas partículas de Leca provenientes da mesma remessa, em que se confirmam as diferenças significativas de porosidade, com influência na sua capacidade resistente.

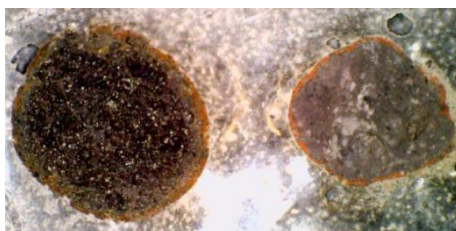


Figura 4.40 - Diferenças de porosidade entre partículas de Leca provenientes da mesma remessa

4.2.3.2.2 Composições com relação a/c de 0,7

Na Tabela 4.4 indicam-se os resultados obtidos na segunda fase dos ensaios de aderência para as composições com relação a/c igual a 0,7, nomeadamente a tensão de rotura nos agregados ($f_{ctm,agr}$) ou na ITZ ($f_{ctm,ader}$), consoante o modo de fractura do provete. Nesta fase, apenas foram realizados ensaios sobre provetes produzidos com incorporação de Leca, Stalite, calcário e granito.

Tabela 4.4 - Resultados aos 28 dias dos ensaios de aderência agregado-pasta para argamassas com relação a/c de 0,7

Tipo de agregado (molhagem inicial dos agregados)	$f_{ctm,agr}$ (MPa)	$\frac{f_{cti,agr}}{f_{ctm,agr} _{max}}$	$f_{ctm,ader}$ (MPa)	$\frac{f_{cti,ader}}{f_{ctm,ader} _{max}}$	Idade dos provetes (dias)	Processo de cura dos provetes
Leca (saturados)	1,2	0,1	-	-	28	Húmida
Stalite (saturados)	3,6	-	1,3 ⁽¹⁾	-		
Brita calcária	-	-	2,3	0,1		
Brita granítica	4,8	-	1,2	-		

(1) - Neste caso a superfície de fractura desenvolveu-se pela ITZ e pelos agregados

Foram ensaiados apenas dois provetes por cada composição, devido aos constrangimentos existentes na produção dos provetes e realização dos ensaios. A baixa representatividade dos ensaios condicionou, como tal, a interpretação dos resultados. Apenas nos provetes com Leca ou calcário foi verificado o mesmo modo de fractura nos dois provetes. Nos restantes casos, num dos provetes a superfície de fractura ocorreu através dos agregados e no outro a fractura foi essencialmente condicionada pela ITZ. Conforme desejado, a tensão de aderência resina-pasta foi muito baixa, não contribuindo de forma significativa para as tensões de rotura determinadas nos

provetes com diferentes tipos de agregado. Assim, no cálculo da tensão de aderência assume-se que a zona de ligação resina-pasta não contribui para a força de rotura, visto que quando ocorre a separação entre a argamassa e a resina, a totalidade da carga é imediatamente transmitida e suportada pelos agregados.

Nas Figura 4.41 a Figura 4.44 ilustram-se as superfícies de fractura obtidas para os diferentes tipos de agregado, envolvendo pastas de baixa compacidade. Pela análise das superfícies de fractura pode verificar-se que, na generalidade dos provetes, a argamassa apresenta um aspecto homogéneo e uniforme, sem grandes vazios que sugiram condições de compactação deficientes. Como referido em 4.2.3.2.1, nem sempre foi possível garantir um posicionamento simétrico dos agregados, que pode contribuir para o desenvolvimento de excentricidade durante a aplicação do carregamento.



Figura 4.41 - Superfície de fractura de provete a atravessar o agregado Leca pré-saturada com argamassa de a/c de 0,7



Figura 4.42 - Superfície de fractura atravessando o agregado e a ITZ. Stalite pré-saturada com argamassa de a/c de 0,7



Figura 4.43 - Superfície de fractura atravessando a ITZ. Brita calcária com argamassa de a/c de 0,7



Figura 4.44 - Superfície de fractura atravessando a ITZ. Brita granítica com argamassa de a/c de 0,7

Mesmo tendo em consideração argamassas de fraca qualidade com elevada relação a/c , nos provetes com Leca a superfície de fractura atravessou o agregado. A fraca capacidade resistente do agregado, aliado à boa qualidade atingida na ITZ, promoveu este modo de fractura. Por esse motivo, uma vez mais este ensaio permitiu apenas obter uma estimativa da resistência à tracção da Leca. Neste caso, a resistência deste agregado foi ligeiramente inferior à observada em 4.2.3.2.1. Estes resultados são afectados pela porosidade do agregado, que conforme referido em 4.2.3.2.1 pode variar de partícula para partícula, no mesmo tipo de agregado. Conforme se observa na Figura 4.40, as partículas de Leca consideradas neste ensaio apresentavam grande porosidade. Para os restantes agregados (Stalite, Brita calcária e Brita granítica), em pelo menos um dos provetes, a superfície de fractura atravessou a ITZ, sendo possível estimar as respectivas tensões médias de aderência (Tabela 4.4).

A superfície de fractura neste ensaio, à semelhança do que se tinha observado em 4.2.3.2.1 principiou-se sempre pela zona de interface resina-argamassa. Contudo, nesta fase o seu desenvolvimento variou consoante o tipo de agregado considerado. Nos provetes com Leca inicialmente saturada a fractura atravessou novamente os agregados. Desta forma, apenas se pode concluir que a força de aderência agregado-pasta (F_b) foi superior à força de rotura destes agregados (F_R). Em relação à Stalite, num dos provetes a superfície de fractura desenvolveu-se apenas através do agregado. No outro provete, observou-se uma fractura mista, isto é, em duas partículas a superfície de fractura desenvolveu-se através do agregado e nas restantes duas partículas através da região de interface. Na Figura 4.42 verifica-se que os agregados de Stalite que se mantêm intactos apresentam maior porosidade do que os agregados fracturados. Esta heterogeneidade marcante entre partículas do mesmo agregado justifica o diferente modo de fractura observado. Por um lado, nos agregados de maior compacidade a ITZ tende a apresentar pior qualidade, nomeadamente no que se refere à menor interpenetração de pasta e ao aumento da relação a/c local na superfície dos agregados. Por outro, os agregados mais porosos apresentam menor resistência mecânica. No provete ensaiado confirmou-se que nas regiões em que a superfície de fractura atravessou a ITZ, a porosidade era maior e a superfície dos agregados encontrava-se relativamente limpa, sugerindo uma má ligação entre a pasta e o agregado.

Nos betões com Stalite, para os quais se desenvolveu um modo misto de rotura, a tensão de aderência pode ser calculada de acordo com a equação Eq.(4.1), tendo em conta os valores de $f_{ctm,agr}$ estimados em 4.2.3.2.1 e indicados na Tabela 4.3.

$$f_{ctm,ader} = \frac{F - (A_a \times f_{ctm,agr})}{A_b}, \quad (4.1)$$

Em que:

- $f_{ctm,ader}$ – Tensão de aderência agregado-pasta, (MPa);
- F – Força de rotura, (N);
- A_a – Área de agregado atravessada, (mm²);
- $f_{ctm,agr}$ – Tensão de rotura média no agregado, (MPa);
- A_b – Área de contacto resina-pasta, (mm²);
- A_b – Área superficial do agregado, (mm²).

Dado que a fractura não ocorreu uniformemente pelos agregados, pode ter induzido o aparecimento de excentricidades e o desenvolvimento da fractura em duas fases, o que conduz a valores subestimados da tensão de aderência. Em face da baixa ductilidade destes materiais, a última região a ceder (agregado ou ITZ) poderá suportar toda a força de rotura. Tendo em conta os valores de $f_{ctm,agr}$ indicados na Tabela 4.3, muito superiores aos valores estimados de $f_{ctm,ader}$, para pastas de a/c elevado pode-se concluir que a capacidade resistente dos agregados tende a ser superior à da ligação agregado-pasta.

No caso dos provetes com agregados de massa volúmica normal, a fractura ocorreu na região de interface agregado-pasta, como era pretendido. A superfície dos agregados apresentava-se limpa, sem presença de pasta aderida, o que sugere uma fraca ligação agregado-pasta (Figuras 4.43 a 4.44). Verifica-se, como esperado, uma diminuição da tensão de aderência de cerca de 45,6% ao substituir os agregados calcários pelos agregados graníticos. Desse modo, confirma-se uma melhor aderência entre os agregados de origem calcária e a pasta do que no caso dos agregados de origem granítica, tal como sugerido em 4.2.3.1.

Um aspecto muito relevante nestes ensaios, e que importa referir, é o facto da tensão de aderência ser condicionada pelo posicionamento e forma do agregado. De facto, em função do ângulo de contacto da superfície do agregado com a pasta face à direcção de aplicação da carga, a fractura pode-se desenvolver mais por tracção ou por corte, existindo sempre uma contribuição destas duas componentes (Ver Figura 4.45). Por exemplo, se um agregado for posicionado de acordo com a configuração A da Figura 4.45, vai ser sujeito a diferentes contribuições das componentes de corte e de tracção face a um agregado disposto de acordo com a configuração B. Neste caso, a componente de corte vai ser mais importante em A do que em B, o que contribui para a obtenção de maiores tensões médias de aderência em A. Assim, apesar de se ter procurado considerar partículas de dimensão semelhante e posicionadas de forma idêntica entre a resina e a argamassa, vão existir sempre diferenças de comportamento entre as diferentes partículas dos vários tipos de agregado. Como tal, a interpretação dos resultados torna-se mais difícil, ficando limitada pelos vários condicionantes inerentes à execução deste tipo de ensaios.

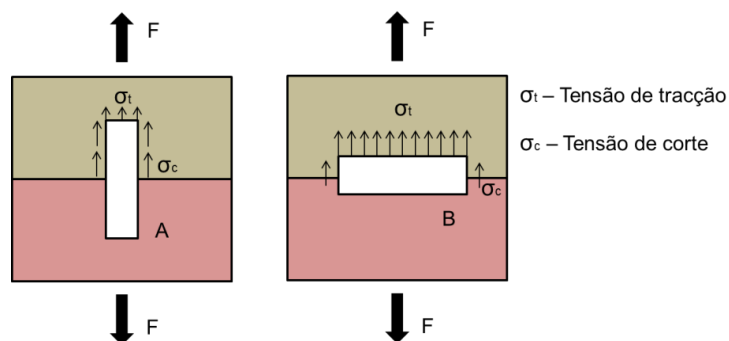


Figura 4.45 - Influência da forma e posicionamento do agregado no desenvolvimento das tensões média de aderência, que envolvem componentes de corte e de tracção

Ainda assim, verificou-se que a tensão de aderência entre a argamassa e os agregados Stalite foi ligeiramente superior à tensão de aderência obtida com os agregados de origem granítica (cerca de 8% superior). As diferenças obtidas foram semelhantes às observadas em 4.2.3.1 nos ensaios de resistência axial, em que a participação da ITZ foi notória no comportamento mecânico. Embora não tenha sido possível prever a tensão de aderência desenvolvida na ligação agregada-pasta dos provetes com Leca, prevê-se que esta seja pelo menos superior à dos betões com Stalite e agregado granítico. No entanto, apenas se pode concluir que, mesmo em condições fracas de aderência, a força de aderência Leca-pasta foi superior à capacidade resistente do agregado. A maior tensão de

aderência aparentemente desenvolvida nos betões com calcário, face aos restantes betões, resulta da maior mobilização da força de rotura por parte dos agregados calcários, de elevada capacidade resistente, e da adequada qualidade atingida na ITZ.

4.2.4 Relação entre resistências mecânicas

Na Figura 4.46 apresenta-se a relação entre a resistência à tracção por compressão diametral e a resistência à compressão obtida nos BEAL analisados.

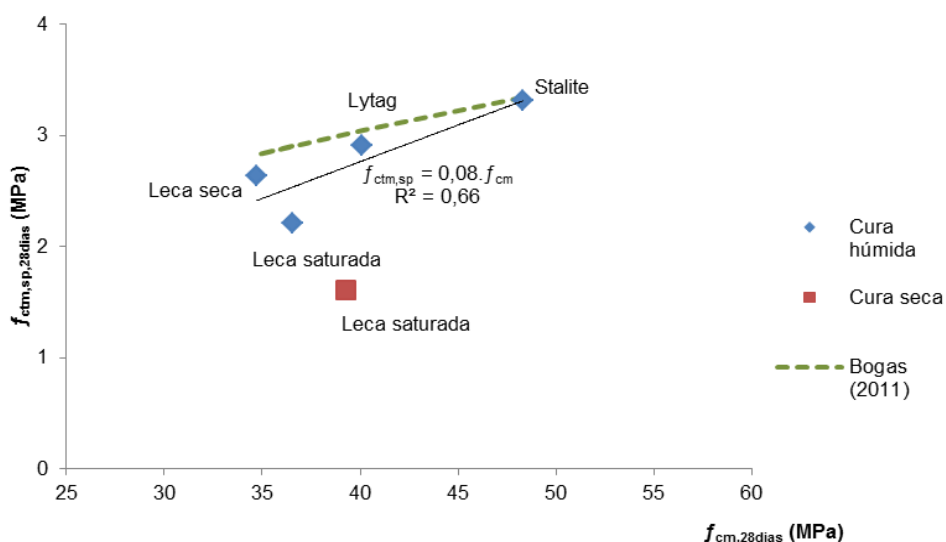


Figura 4.46 - Relação entre a resistência à tracção por compressão diametral e a resistência à compressão para os BEAL

Tal como seria de esperar, a resistência à tracção tende a aumentar com a resistência à compressão, visto que ambas as propriedades dependem da porosidade do betão. No entanto, a correlação observada foi fraca, nomeadamente quando se tem em conta, em simultâneo, betões sujeitos a diferentes condições de cura. Conforme referido, a secagem dos betões promove o aumento da resistência à compressão, mas conduz a uma redução da resistência à tracção, devido às tensões de tracção adicionais introduzidas pelos gradientes de humidade.

Bogas (2011) reporta correlações razoáveis quando considera apenas os BEAL curados em ambiente saturado, sugerindo inclusivamente que a resistência à compressão diametral pode ser estimada através da equação: $f_{ctm,sp} = 0,48 \cdot f_{cm}^{1/2}$. À excepção dos BEAL com Leca inicialmente saturada, constata-se que a estimativa proposta por Bogas (2011) ajusta-se aos resultados obtidos neste estudo (Figura 4.46).

Os BEAL com Leca previamente saturada apresentaram resistência média à tracção inferior à dos BEAL com Leca pré-seca, apesar de apresentarem semelhante resistência à compressão. De acordo com Bogas (2011) esta tendência pode ser justificada pelo facto dos agregados leves não beneficiarem do efeito de confinamento na resistência à tracção e a qualidade da ITZ, que é pior nos betões com Leca saturada, assumir maior relevância.

Em geral, a resistência à tracção por compressão diametral nos BEAL foi cerca 6,0 a 7,5% da resistência à compressão, para os betões curados em água e 4,1% para os betões sujeitos a secagem. Nos BAN essa relação foi cerca de 7,3% e 6,1%, respectivamente. Estes valores estão de acordo com a gama reportada na literatura, em que se referem intervalos usuais de 5-10%, dependendo da resistência dos betões (ACI363 R-92 1992, Mehta e Monteiro 2006). A relação entre a resistência à tracção por compressão diametral e a resistência à compressão em betões convencionais pode ser considerada na ordem de 8 a 10% (Bogas 2011).

Na Figura 4.47 indica-se a relação entre a resistência à tracção axial e a resistência à compressão obtida para os BEAL analisados. Em geral, a resistência à tracção axial foi cerca 3,8 a 5,2% da resistência à compressão nos BEAL e cerca de 6,4% nos BAN. Como referido, nos ensaios de tracção axial verifica-se uma maior contribuição das regiões de interface nos BEAL com agregados menos porosos (Lytag e Stalite). Para tal, poderá ter ajudado o facto de os agregados terem sido introduzidos previamente saturados.

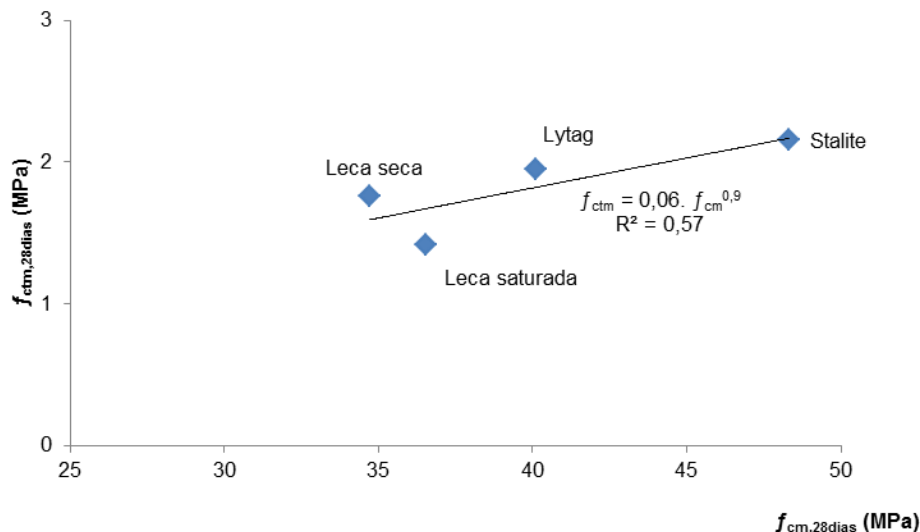


Figura 4.47 - Relação entre a resistência à tracção axial e a resistência à compressão para os BEAL

Verifica-se mais uma vez uma fraca correlação entre a resistência à tracção e a resistência à compressão, mesmo quando se tem em conta apenas betões curados continuamente em água. A tendência foi semelhante à observada para a resistência à compressão diametral, o que sugere uma boa relação entre esta propriedade e a resistência à tracção axial. Na Figura 4.48 confirma-se uma elevada correlação entre estas propriedades ($R^2=0,99$), o que de certa forma permite validar os resultados obtidos nos ensaios de tracção axial. Note-se que conforme referido em 4.2.3, devido às dificuldades inerentes à realização do ensaio de tracção axial, os resultados obtidos neste ensaio estão sujeitos a maior erro.

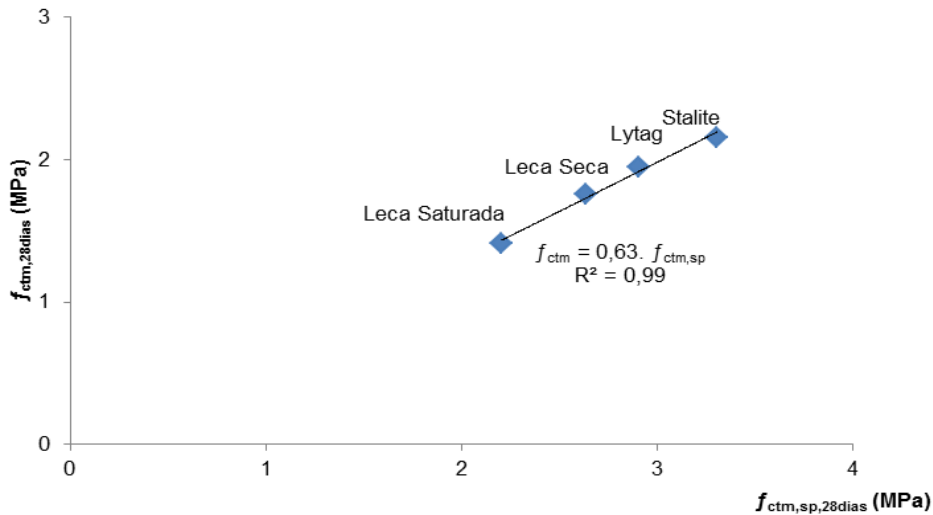


Figura 4.48 - Relação entre a resistência à tracção axial e a resistência à tracção por compressão diametral para os BEAL

Neste caso, obtém-se a relação entre a resistência à tracção axial e a resistência à compressão diametral nos BEAL dada pela equação Eq. (4.2).

$$f_{ctm} = 0,63 \times f_{ctm,sp} , \quad (4.2)$$

Em que:

- f_{ctm} – Resistência média à tracção axial aos 28 dias, (MPa);
- $f_{ctm,sp}$ – Resistência média à tracção por compressão diametral aos 28 dias, (MPa).

A relação verificada entre a resistência à tracção axial e a resistência à compressão diametral é inferior à sugerida na literatura. Segundo Canovas (2004) a resistência à tracção pura deverá ser cerca de 85 a 100% da resistência à tracção por compressão diametral e, de acordo com o FIP (1983) e EN1992-1-1 (2004) (Eurocódigo 2) de aproximadamente 90%. No entanto, para os BAN foi obtida uma relação de 0,89, que está de acordo com o sugerido no Eurocódigo 2.

Devido à dificuldade de realização dos ensaios pode ter ocorrido uma subestimativa da capacidade resistente à tracção dos BEAL (4.2.3). O diferente modo de fractura desenvolvido pelos BEAL nos ensaios de compressão diametral e tracção axial justificam a menor relação entre f_{ctm} e $f_{ctm,sp}$. Conforme observado em 4.2.3.1.1, em especial nos betões com agregados leves menos porosos (Stalite), a resistência à tracção axial foi também condicionada pelas características da ITZ, ao contrário do sucedido para a resistência à compressão diametral, que foi governada pela capacidade mecânica do agregado. Nos BAN, o modo de fractura foi semelhante na tracção axial e na compressão diametral, o que contribuiu para uma maior proximidade dos resultados.

4.2.5 Análise qualitativa da ITZ

Nesta secção analisa-se qualitativamente a zona de transição agregado-pasta dos betões ensaiados à tracção axial. Para tal, foram recolhidas sete amostras referentes a cada tipo de agregado estudado (Granito, Calcário, Leca seca, Leca saturada, Stalite, esfera de vidro e Lytag), e observadas por microscopia electrónica de varrimento (MEV) (conforme secção 3.5.5).

Nas Figura 4.49 a Figura 4.55 ilustram-se as zonas de transição agregado-pasta para as diferentes composições estudadas. Importa referir que os betões estudados nesta fase do trabalho foram sujeitos a cura saturada, pelo que não serão consideradas as condições de cura para a presente análise.

Constatam-se diferenças entre as ITZs desenvolvidas nos vários betões. Aparentemente os agregados com menor massa volúmica (*i.e.*, maior porosidade), Leca (Figura 4.49 e Figura 4.50) e Lytag (Figura 4.52), apresentam aparentemente ligação mais eficiente à pasta, já que a transição entre agregados e a pasta ocorre de forma gradual, sendo difícil distinguir a fronteira de separação. No sistema que contém Leca a interpenetração pasta-agregado é aparentemente superior quando a Leca é introduzida no estado seco (Figura 4.50), em que a interface apresenta menor porosidade, menor microfendilhação, menor quantidade de AFt e de menor dimensão (Figura 4.50c) do que na interface com Leca saturada (Figura 4.49c). Em qualquer dos casos, devido à porosidade superficial característica dos agregados Leca, observou-se com frequência a penetração de pasta para o interior dos agregados, fortalecendo mecanicamente a ligação agregados-pasta. O mesmo fenómeno é observado por Bogas (2011), que verifica a interpenetração em betões com agregados idênticos ao do corrente trabalho, confirmando inclusivamente a formação de partículas de hidratação na região interna da orla superficial dos agregados.

A utilização de Leca seca (Figura 4.50) e Leca pré-saturada (Figura 4.49) permitiu avaliar o efeito das condições de pré-molhagem dos agregados na ligação desenvolvida com a pasta. Aparentemente não se verificaram diferenças acentuadas. Contudo, é possível observar a formação de pequenos poros junto da superfície dos agregados previamente saturados (Figura 4.49b), que podem estar associados a “efeito de parede” ou a exsudação localizada (Ollivier et al. 1995, Mehta e Monteiro 2006, Maso 1996, Chandra e Berntsson 2003). Como as partículas foram previamente saturadas antes da sua introdução na pasta, não têm capacidade para impedir a acumulação de água na sua superfície e conseqüente a formação de zonas de maior a/c, ao contrário dos agregados introduzidos no estado seco. Assim, a formação de mais e maiores cristais de AFt é favorecida devido ao aumento de porosidade destas regiões.

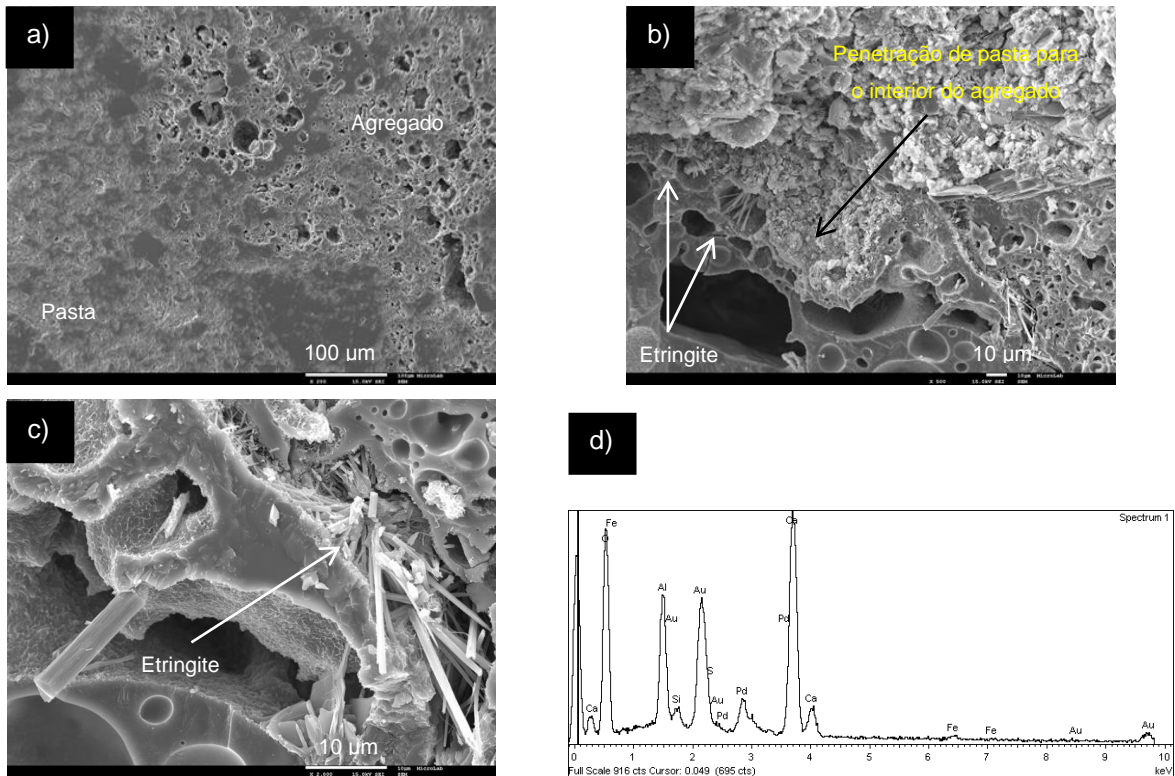


Figura 4.49 - Betão com Leca saturada: a) superfície polida; b) e c) superfície de fractura; d) EDS demonstrando a presença de etringite (AFt) assinalada em c)

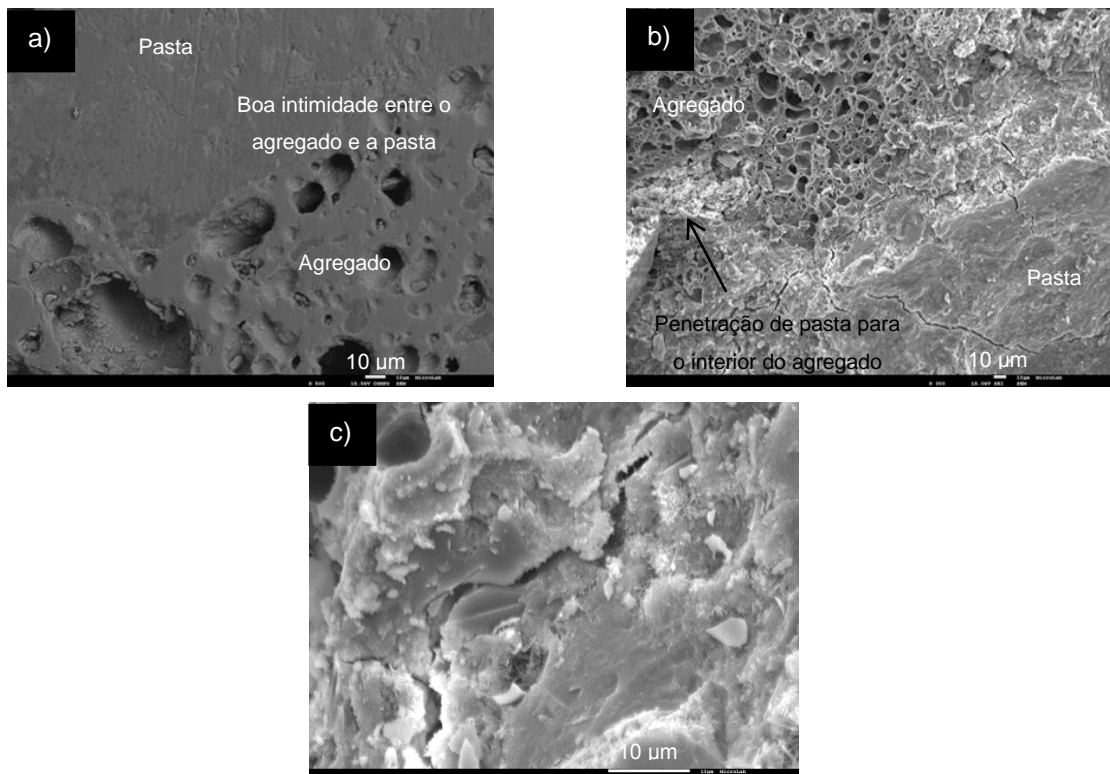


Figura 4.50 - Betão com Leca seca: a) superfície polida; b) e c) superfície de fractura

Em relação aos agregados de Stalite (Figura 4.51), aparentemente a aderência entre os agregados e a matriz cimentícia não é tão eficiente quanto observada nos restantes agregados leves, sendo visível o limite bem definido entre as fases. O comportamento destes agregados aproxima-se do verificado nos agregados naturais, em que a ligação interfacial com a pasta é menos eficiente. Nos agregados de Brita calcária (Figura 4.53), a coesão na ITZ parece ser superior face a betões convencionais com brita granítica (Figura 4.54). Porém, em ambos os casos é possível identificar a fronteira que separa os agregados da pasta, ao contrário do que se verifica com os agregados leves mais porosos. Verifica-se ainda a presença de microfendilhação e porosidade em torno dos agregados, que indiciam uma pior qualidade da sua ITZ (Figura 4.54). Ainda assim, no caso da brita calcária, verifica-se existir uma boa intimidade entre a pasta e o agregado. De facto, por exemplo na Figura 4.53a observa-se o desenvolvimento de uma fissura através dos agregados e da pasta cimentícia, sugerindo uma boa ligação entre a pasta e o agregado.

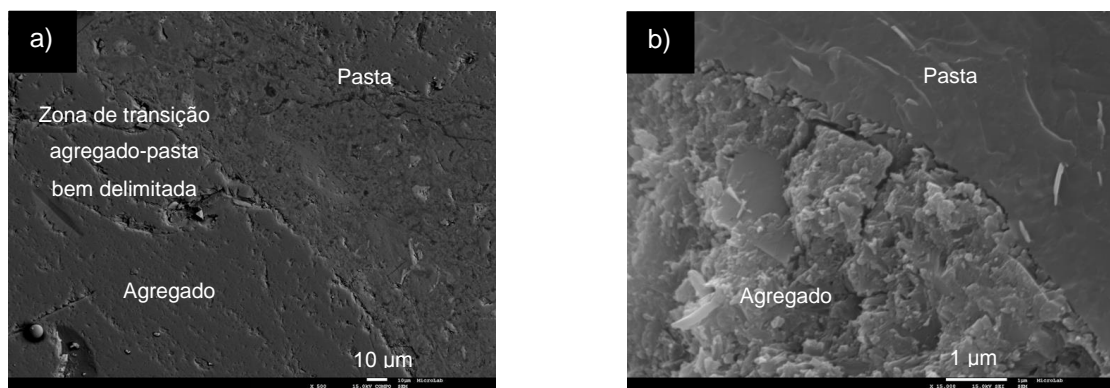


Figura 4.51 - Betão com Stalite: a) superfície polida; b) superfície de fractura

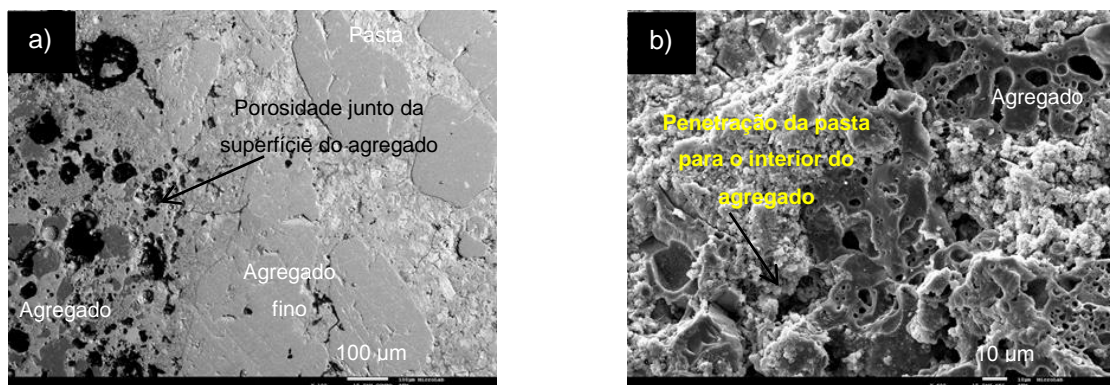


Figura 4.52 - Betão com Lytag: a) superfície polida; b) superfície de fractura

Entre os agregados estudados os agregados de Brita granítica são aparentemente os que apresentam menor ligação à pasta, sendo possível observar uma clara fronteira de separação (Figura 4.54a). Verifica-se também a formação de poros de considerável dimensão e fendilhação junto da superfície do agregado ao longo da sua extensão (Figura 4.54b), o que sugere o desligamento das fases durante a solitação mecânica.

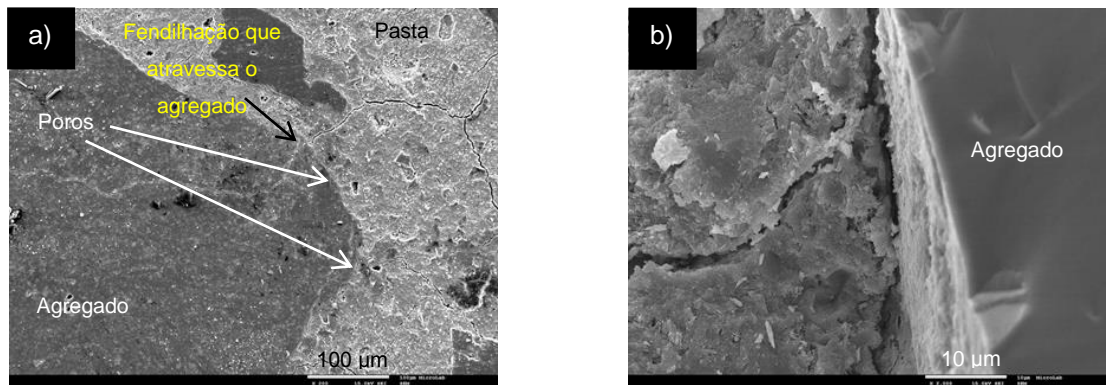


Figura 4.53 - Betão com Brita calcária: a) superfície polida; b) superfície de fractura

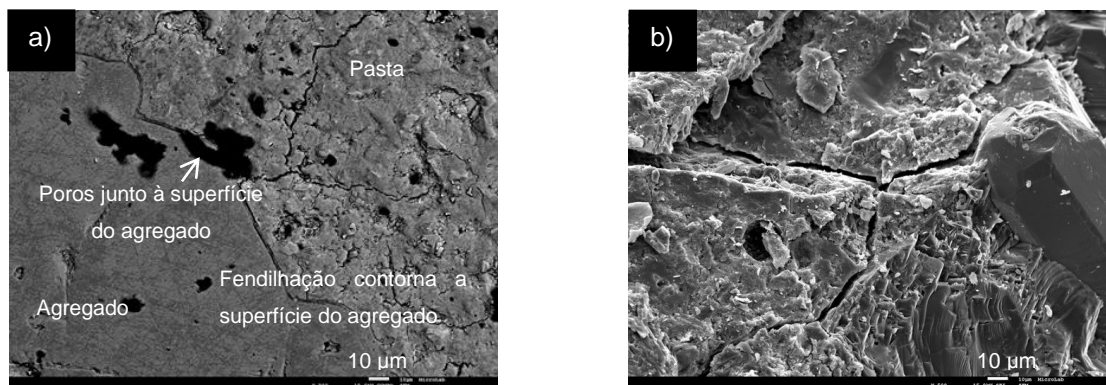


Figura 4.54 - Betão com Brita granítica: a) superfície polida; b) superfície de fractura

A ITZ desenvolvida nos betões em estudo parece assim variar de acordo com as características dos agregados, ocorrendo uma interacção sucessivamente mais eficiente com a incorporação de agregados naturais (calcário e granito), agregados leves de menor porosidade (Stalite), e agregados leves porosos (Leca, Lytag). De facto, a ligação pasta-agregado parece ser eficiente quando se utilizam agregados leves, nomeadamente quando o agregado apresenta suficiente porosidade superficial, capaz de promover a interpenetração de pasta, como é o caso da Leca. A presença inicial de água nos vazios do agregado (Leca saturada) parece no entanto conduzir à formação de maior porosidade na interface (Figura 4.49b). Os agregados de vidro de sílica, dada a sua porosidade extremamente reduzida (Figura 4.55a), promovem o efeito de parede, aumentando localmente a relação a/c na superfície. Como consequência, verifica-se a formação de grandes aglomerados de AFt (Figura 4.55b) e uma ligação fraca agregado-pasta. Desse modo, a fractura destes provetes ocorre preferencialmente na interface, como verificado nos ensaios mecânicos a que foram submetidos estes provetes.

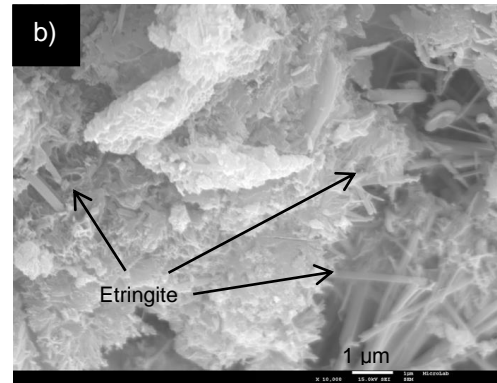
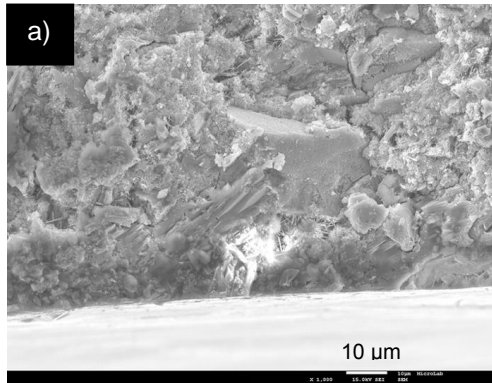


Figura 4.55 - Superfície de fractura de betão com esferas de vidro: a) vista geral da zona de contacto com o berlinde; b) ampliação mostrando a grande concentração de cristais de etringite (AFt) na ITZ

5 Conclusões

5.1 Considerações finais

O presente trabalho teve como principal objectivo o estudo da influência da região de interface agregado-pasta no comportamento mecânico de betões estruturais produzidos com diferentes tipos de agregado leve, analisando ainda o seu desempenho face a betões convencionais com agregados de massa volúmica normal correntes. De forma a aumentar a validade do estudo, foram considerados três tipos de agregados leves com porosidade e massa volúmica bastante distinta (Leca, Lytag e Stalite), dois tipos de agregados de massa volúmica normal (natureza calcária e granítica), um agregado de referência de vidro e pastas de diferentes compacidades. Foi igualmente analisada a contribuição das condições de cura dos provetes até à data de ensaio, bem como as condições de molhagem inicial dos agregados, nas características da ITZ. Os betões foram caracterizados mecanicamente em termos de resistência à compressão, resistência à tracção por compressão diametral e resistência à tracção axial. Foram ainda realizados ensaios de aderência agregado-pasta e estimada a resistência à tracção dos diferentes agregados considerados. Complementarmente foi efectuada uma análise qualitativa da ITZ através de microscópio electrónico de varrimento (MEV).

De seguida, apresentam-se as principais conclusões referentes ao comportamento mecânico dos diferentes betões produzidos e ensaiados ao longo do trabalho experimental, destacando-se a importância da interface agregado-pasta. São ainda sugeridas algumas propostas de desenvolvimento futuro no final do presente capítulo de modo a enriquecer o conhecimento sobre a importância da região de interface no comportamento de betões leves e de massa volúmica normal.

5.2 Conclusões gerais

Tendo em conta os diferentes tipos de agregados analisados neste estudo foi possível produzir betões correntes com classe de resistência entre LC25/28 e LC40/44, no caso dos BEAL, e entre C35/45 e C40/50, no caso dos betões convencionais. Conforme seria de esperar, os betões produzidos com agregados de maior massa volúmica conduziram a resistências superiores. No entanto, a utilização de agregados leves menos porosos (Stalite) permitiu a produção de betões com resistência à compressão aos 28 dias muito próxima da resistência dos betões convencionais, atingindo-se soluções de maior eficiência estrutural. Por sua vez, os betões com agregados mais porosos, Leca ou Lytag, apresentaram 22-32% menor resistência do que os BAN.

Em função do tipo de agregado e idade de ensaio, a resistência à compressão dos BEAL foi mais condicionada pela pasta ou pelo agregado, revelando uma boa qualidade atingida na zona de interface agregado-pasta. Nos BAN, a superfície de fractura desenvolveu-se preferencialmente pela região da interface, manifestando ausência de pasta aderida na superfície do agregado, o que sugere uma pior ligação agregado-pasta atingida nestes betões. Mesmo em situações em que a superfície de fractura dos BEAL não ocorreu através do agregado, verificou-se uma boa ligação agregado-

pasta, com presença de pasta na superfície do agregado. O mesmo se confirmou nos ensaios de tracção axial.

O comportamento dos BEAL à tracção por compressão diametral foi fortemente condicionado pela capacidade resistente dos agregados leves, confirmando-se novamente que os agregados de maior massa volúmica permitem a produção de betões de maior resistência. No entanto, em comparação com a resistência à compressão, a redução de resistência à tracção face aos BAN foi mais elevada. Para tal, deverá contribuir o facto dos agregados leves não beneficiarem do efeito de confinamento da pasta quando ensaiados à tracção. Nos ensaios de aderência realizados com argamassas de menor a/c, foi possível estimar e confirmar maiores capacidades resistentes nos agregados leves de maior massa volúmica. Foram escassos os casos em que a superfície de fractura dos BEAL desenvolveu-se através da ITZ, com a qualidade da interface agregado-pasta a assumir menor relevância na resistência à tracção do que no caso dos BAN.

Aparentemente, a capacidade resistente dos BEAL à compressão foi pouco afectada pelas diferentes condições de cura. O efeito de cura interna dos agregados leves permite reduzir a sensibilidade destes betões a condições de cura severas. Em contrapartida, verificou-se que o comportamento dos betões à tracção por compressão diametral foi significativamente influenciado pelas condições de cura dos provetes, ocorrendo reduções de resistência generalizadas nos betões sujeitos a secagem. Essa redução resulta de se gerarem gradientes de humidade durante a secagem, que promovem o desenvolvimento de microfendilhação no betão. Neste caso, os BEAL ao serem sujeitos a secagens mais lentas, podem conduzir a maiores gradientes de humidade.

O comportamento à compressão dos BEAL foi pouco afectado pelas condições de pré-molhagem dos agregados, uma vez que a sua resistência foi limitada pelos próprios agregados. Porém, a resistência à tracção parece ter sido susceptível a esta variação. Verificou-se que a utilização de agregados de Leca previamente secos conduziu a maiores resistência à tracção, quer nos ensaios de tracção por compressão diametral, quer nos ensaios de tracção axial (cerca de 16 e 22%, respectivamente). Este incremento de resistência poderá estar relacionado com uma possível melhoria da ligação entre fases nos BEAL com Leca previamente seca, uma vez que nos betões com Leca previamente saturada verificou-se o desenvolvimento esporádico da superfície de fractura através da ITZ. Isso foi confirmado nas análises MEV, embora se tenha verificado uma boa ligação agregado-pasta, tanto nos BEAL com Leca seca como nos BEAL com Leca pré-saturada. Por sua vez, nos ensaios de aderência, a capacidade resistente do agregado foi inferior à resistência da ligação agregado-pasta, independentemente das condições de molhagem inicial.

Verificou-se uma fraca correlação entre a resistência à tracção e a resistência à compressão dos BEAL, sobretudo quando se tiveram em consideração betões produzidos com diferentes condições de cura e diferentes pré-condicionamentos dos agregados. Contudo, observou-se uma elevada correlação ($R^2 = 0,99$) entre a resistência à tracção axial e a resistência à tracção por compressão diametral nos BEAL, o que permite validar a qualidade dos resultados obtidos nestes ensaios. A relação entre estes ensaios foi em média 0,67 e 0,89 para os BEAL e para os BAN, respectivamente,

sugerindo que poderá ter ocorrido uma subestimativa da resistência à tracção axial nos BEAL devido à heterogeneidade dos agregados leves e à dificuldade de execução deste ensaio.

Em oposição ao observado nos ensaios de compressão diametral, excepto para os BEAL com Leca, a resistência à tracção axial foi afectada pelas características da ITZ. Neste caso, a substituição de agregado normal por agregado leve conduziu a maiores reduções de resistência face aos BAN com calcário, inclusivamente nos BEAL com agregados de maior massa volúmica. Acrescente-se que ao contrário do sucedido nos BAN com calcário, a superfície de fractura nos BEAL nem sempre atravessou o agregado, em especial nos betões com agregados leves saturados e de menor porosidade. Para além da menor capacidade resistente dos agregados leves, que se reflecte de forma mais importante nos ensaios de tracção axial do que nos ensaios de compressão, a resistência é afectada pela posição e forma como os agregados se distribuem na superfície de fractura. Neste caso, a maior heterogeneidade dos agregados leves e a formação de excentricidades durante os ensaios terão contribuído para as diferenças de resistência observadas. Por outro lado, a forma como o desenvolvimento das tensões progride pelas fases de maior rigidez no betão também permite, em parte, justificar uma maior solicitação do agregado no caso dos BAN e uma maior acção sobre a ITZ no caso dos BEAL. Ainda assim, os BEAL com agregados leves menos porosos (Lytag e Stalite) foram capazes de desenvolver maiores resistências do que os BAN com agregados de natureza granítica, para os quais foram desenvolvidas ITZs de pior qualidade. Esta tendência foi confirmada nos ensaios de aderência e nas análises MEV.

Foi possível confirmar que apesar dos agregados de granito apresentarem maior resistência à tracção do que os restantes agregados, conduzem a betões de menor resistência à tracção em resultado da pior qualidade atingida na ITZ. Apenas os BEAL com agregados mais porosos são capazes de desenvolver menor resistência do que os BAN com granito, devido à fraca capacidade resistente dos seus agregados. Desta forma, demonstra-se a importante influência da ITZ no comportamento mecânico dos betões. Por outro lado, verificou-se que os BAN produzidos com Brita calcária conduziram sempre às maiores resistências mecânicas, devido à maior capacidade resistente dos seus agregados e ao facto de, ainda assim, terem sido capazes de desenvolver zonas de transição de boa qualidade.

Em geral, os ensaios de aderência agregado-pasta, sobre argamassas de reduzida compacidade, confirmam as tendências observadas nos ensaios de tracção axial. Nos BEAL com agregados leves porosos a ligação agregado-pasta demonstrou ser sempre superior à capacidade resistente do agregado, mesmo em condições de fraca aderência, concluindo-se que a qualidade da ITZ não deverá ser condicionante para o comportamento mecânico destes betões. Nos provetes com agregados leves de maior massa volúmica, a resistência da ITZ nem sempre se superiorizou à capacidade resistente do agregado, condicionando o modo de fractura. Ainda assim, confirmou-se o melhor comportamento da ITZ neste tipo de agregados face aos agregados de origem granítica. A forma alongada das partículas britadas e a maior homogeneidade do agregado calcário terão contribuído para que as tensões de aderência desenvolvidas nos provetes produzidos com este tipo

de agregado tivessem sido mais elevadas. Importa salientar que as dificuldades inerentes à realização dos ensaios de tracção directa, aliado ao facto de apenas ter sido possível ensaiar um número limitado de provetes por composição, dificultou a análise e interpretação dos resultados obtidos.

A análise qualitativa da ITZ efectuada com auxílio da microscopia electrónica de varrimento (MEV) permitiu confirmar que a qualidade da ITZ foi afectada pelo tipo de agregado, desenvolvendo-se melhores ligações agregado-pasta nos betões com agregados de maior porosidade. Nestes betões verificou-se frequentemente a interpenetração de pasta no agregado, sendo difícil distinguir a fronteira de separação entre as duas fases. Conforme esperado, os BEAL com Leca apresentaram ITZs de melhor qualidade quando estes agregados foram introduzidos inicialmente secos. Ainda assim, as diferenças observadas não foram acentuadas face aos BEAL com Leca previamente saturada. Ao contrário do que sucedeu com os agregados de natureza granítica, os betões com calcário evidenciaram uma boa intimidade entre a pasta e o agregado, sugerindo a capacidade de desenvolver boas ligações agregado-pasta.

Em síntese, pode-se concluir que, dependendo do tipo de agregado, as características da ITZ podem afectar de forma relevante o comportamento mecânico do betão. Em geral, confirma-se que a qualidade da ITZ tende a ser inferior nos agregados de maior massa volúmica e maior teor de humidade inicial. Ainda assim, os agregados calcários foram capazes de evidenciar ITZs de razoável qualidade, permitindo atingir betões de maior resistência mecânica do que os betões produzidos com agregados graníticos, de maior massa volúmica e capacidade resistente. A melhor qualidade da ITZ nos agregados de menor massa volúmica foi demonstrada através de ensaios mecânicos e de microscopia electrónica de varrimento.

5.3 Propostas para desenvolvimento futuro

A presente dissertação contribuiu para o aumento do conhecimento da influência das características da ITZ no comportamento mecânico dos BEAL. No entanto, sobretudo devido às dificuldades inerentes à realização de ensaios locais de caracterização química, física e mecânica da ITZ, é necessário promover investigações adicionais neste domínio, sugerindo-se em seguida alguns temas para desenvolvimento futuro:

- Caracterização química da ITZ e possíveis diferenças para a matriz cimentícia, tendo em conta diferentes tipos de agregado;
- Ensaios de nanoindentação para caracterização mecânica da ITZ, para diferentes tipos de agregado;
- Análises quantitativas da porosidade da ITZ, tendo por base análises de imagem em MEV;
- Idealização de ensaios mecânicos que permitam uma caracterização mais rigorosa e representativa da ITZ, minimizando o impacto de eventuais erros inerentes à execução deste tipo de ensaios.

Bibliografia

ACI213R-03. "Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete", American Concrete Institute, 2003.

ACI213R-87. (Reapproved 1999), "Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete", American Concrete Institute, 1987.

ACI301R-03. "Specifications for Structural Concrete", American Concrete Institute, October, 2005.

ACI363R-92. "Report on High-Strength Concrete", American Concrete Institute (Reapproved 1997), 1992. 55p.

Alexander, M. G. "The effects of ageing on the interfacial zone in concrete", In Rilem Report 11 - Interfacial transition zone in concrete, Edited by J. Maso. E & FN Spon. Report of Rilem Technical Committee 108-ICC, 1996. pp 167-196.

Bentz, D. P., Snyder, K. A. "Protected paste volume in concrete. Extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate", Cement and Concrete Research, Vol. 29, 1999. pp 1863-1867.

Bogas, J. A. "Caracterização de betões estruturais com agregados leves de argila expandida", Lisboa: Tese para obtenção do grau de Doutor em engenharia civil. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2011. pp 2.1-9.80.

Bogas, J. A., Cunha, D. "Non-structural lightweight concrete with volcanic scoria aggregates for lightweight fill in building's floors", Constr. Build. Mater, Vol. 135, 2017. pp 151-163.

Bogas, J. A., Ferrer, B., Pontes, J., Real, S. "Biphasic Compressive Behavior of Structural Lightweight Concrete", ACI Materials Journal, Vol. 113 (1-6), 2017. pp 151-163.

Bogas, J. A., Nogueira, R. "Tensile Strength of Structural Expanded Clay Lightweight Concrete Subjected to Different Curing Conditions", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol 18 (6), 1780-1791, 2014.

Canovas, Manuel Fernandez. "Hormigon". Madrid, Espanha: Colegio de Ingenieros de caminos, canales y puertos. Séptima edición, 2004. *Referido por Bogas (2011)*

Chandra, S., Berntsson, L. "Lightweight aggregate concrete. Science, Technology and applications", Noyes Publications-William Andrew Publishing, USA, 2003.

Constantinides, G., Ulm, F. -J., Vliet, K. "On the use of nanoindentation for cementitious materials", Materials and Structures, Vol. 36, 2003. pp 191-196.

Costa, A., Appleton, J. "Estruturas de Betão I: Parte II - Materiais", Instituto Superior Técnico, 2002.

Demie, S., Nuruddin, M., Shafiq, N. "Effects of micro-structure characteristics of interfacial transition zone on the compressive strength of self-compacting geopolymer concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 41, 2013. pp 91-98.

Elsharief, Amir, Menashi, D. Cohen, e Jan Olek. "Influence of lightweight aggregate on the microstructure and durability of mortar", *Cement and Concrete Research*, Volume 35, Issue 7, 2005: pp 1368-1376. *Referido por Bogas (2011)*

EN1992-1-1. "Eurocode 2: Design of concrete concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings." European Committee for standardization CEN, English version, December, 2004. 225p. *Referido por Bogas (2011)*

EuroLightConR2. "LWAC Material Properties, State-of-the-Art." European Union – Brite EuRam III, BE96-3942/R2, December, 1998. *Referido por Bogas (2011)*

Farran, J. "Revue des Matériaux de Construction", 1956, 490- 492. *Referido por Ollivier et al. (1995)*

FIP. "FIP manual of Lightweight aggregate concrete", Fédération internationale de la précontrainte (FIP), second edition, Surrey University Press, 1983. 259p. *Referido por Bogas (2011)*

Fischer-Cripps, A. C. "Nanoindentation", Springer, Third Edition, New South Wales Australia, 2011. pp 1-23.

Goldman, A., Bentur, A (1992). "Effects of pozzolanic and non-reactive microfillers on the transition zone in high strength concretes" In *Proceedings of the RILEM International conference - Interfaces in Cementitious Composites*, Edited By J. Maso. E & FN Spon. Report of Rilem Technical Committee 108 and Laboratory for Materials and Durability of Constructions, Toulouse, 1992. pp 58-67.

Holm, T. A., e Bremner, T. W. "State-of-the-art report on high-strength, high-durability structural low-density concrete for applications in severe marine environments." U.S. Army corps of engineers, Laboratory, ERDC/SL TR-00-3, 2000. pp 6-7.

Jebli, M., Jamin, F., Malachanne, E., Garcia-Diaz, E., El Youssofi, M. S. "Experimental characterization of mechanical properties of the cement-aggregate interface in concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 161, 2018. pp 16-25.

Khokhorin, N. K. "The Durability of Lightweight Concrete Structure Members", KviySlev, USSR, 1993.

Lee, G. C., Choi, H. B. "Study on interfacial transition zone properties of recycled aggregate by micro-hardness test", *Construction and Building Materials*, Vol. 40, 2013. pp 455-460.

Li, W., Xiao, J., Sun, Z., Kawashima, S., Shah, S. "Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with diferente mixing approaches", *Construction and Building Materials*, Vol. 35, 2012. pp 1045-1055.

Liao, K. Chang, P., Peng, Y., Yang, C. "A study on characteristics of interfacial transition zone in concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, 2004. pp 977-989.

LNEC E 29-1979. "Cimentos – Determinação da resistência mecânica", Documentação normativa. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1979.

Lo, T. Y., Tang, W. C., Cui, H. Z. "The effect of aggregate properties on lightweight concrete", *Building and Environment*, Vol. 42, 2007. pp 3025-3029.

Maso, J. C. (ed.). "Interfaces in Cementitious Composites", E & FN Spon, Toulouse, 1992.

Massazza, F. "Action of environmental conditions". In *Rilem Report 11 - Interfacial transition zone in concrete*, Edited by J. Maso. E & FN Spon. Report of Rilem Technical Committee 108-ICC, Toulouse, 1996. pp 146-166.

Mehta, P. Kumar, e Monteiro, Paulo J. M. "Concrete. Microstructure, properties and materials", third edition, Mc Graw Hil, 2006.

Nadesan, M., Dinakar, P. "Micro-structural behavior of interfacial transition zone of the porous sintered fly ash aggregate", *Journal of Building Engineering*, Vol. 16, 2018. pp 31-38.

Neville, A. M. "Properties of Concrete", Fourth edition, Longman, 1995.

Neville, A. M. "Aggregate bond and modulus of elasticity of concrete", *ACI materials Journal*, nº94-M9, 1997.

NPEN1097-3. "Ensaio para determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – Parte 2: Método para determinação da massa volúmica e dos vazios", Versão portuguesa da EN 1097-3:1998, Instituto português da Qualidade, 2000.

NPEN1097-6. "Ensaio para determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água", Versão portuguesa da EN 1097-6:1999, Instituto português da Qualidade, 2002.

NPEN12350-2. "Ensaio do betão fresco. Parte 2: Ensaio de abaixamento", Versão portuguesa da EN 12350-2:1999, Instituto português da Qualidade, 2002.

NPEN12350-6. "Ensaio do betão fresco. Parte 6: Massa volúmica", Versão portuguesa da EN 12350-6:1999, Instituto português da Qualidade, 2002

NPEN12390-1. "Ensaio do betão endurecido. Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes", Versão portuguesa da EN 12390-1:2004, Instituto português da Qualidade, 2000.

NPEN12390-2. “Ensaio do betão endurecido. Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica”, Versão portuguesa da EN 12390-2:2003, Instituto português da Qualidade, 2000.

NPEN12390-3. “Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio.” Versão portuguesa da EN 12390-3:2003, Instituto português da Qualidade, 2001.

NPEN12390-6. “Ensaio do betão endurecido. Parte 6: Resistência à tracção por compressão dos provetes”, Instituto português da Qualidade, 2003.

NPEN206-1. “Betão. Parte 1-Especificação, performance, produção e conformidade”, European Committee for standardization, CEN/TC 104-Concrete. Versão portuguesa da EN 206-1:2000+A1:2004, Instituto português da Qualidade, Junho, 2005.

NPEN933-1. “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados – Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração”, Versão portuguesa da EN 933-1:1997, Instituto português da Qualidade, 2000.

Ollivier, J.P., Maso, J.C., Bourdette, B. “Interfacial transition zone in concrete”, Advanced Cement Based Materials, Vol. 2, 1995. pp 30-38.

RilemReport11. “Interfacial transition zone in concrete”, Edited by J. Maso, E & FN Spon, Report of Rilem Technical Committee 108-ICC, Toulouse, 1996.

Scrivener, K. “Backscattered electron imaging of cementitious microstructures: understanding and quantification”, Cement & Concrete Composites, Vol.26, 2004. pp 935-945.

Scrivener, K. L., Crumbie, A., Laugesen, P. “The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete”, Interface Science, Vol 12, 2004. pp 411-421.

Sidorova, A., Vazquez-Ramonich, E., Barra-Bizinotto, M., Roa-Rovira, J., Jimenez-Pique, E. “Study of the recycled aggregates nature’s influence on the aggregate–cement paste interface and ITZ”, Construction and Building Materials, Vol. 68, 2014. pp 677-684.

Vaysburd, A. M. “Durability of Lightweight Concrete and Its Connections with the Composition of Concrete, Design and Construction Methods”, Lightweight Concrete, ACI SP-136-7, 1992. pp 295-317.

Wasserman, R., Bentur, A. “Interfacial interactions in lightweight aggregate concretes and their influence on the concrete strength”, Cement and Concrete Composites, Vol. 18, 1996. pp 67-76.

Wasserman, R., Bentur, A. “Effect of lightweight fly ash aggregate microstructure on the strength of concretes”, Cement and Concrete Research, Vol. 27, nº 4, 1997. pp 525-537.

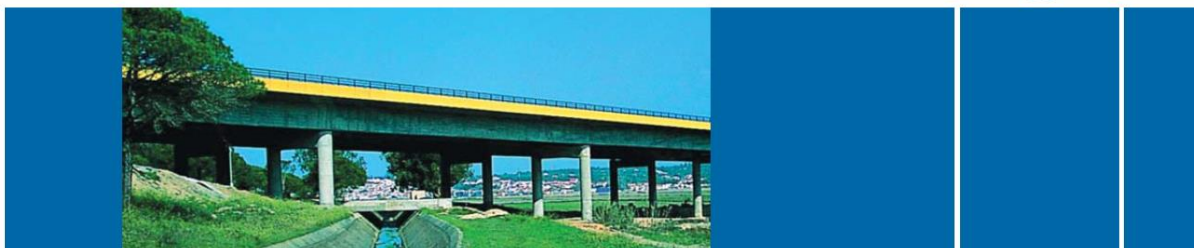
Xiao, J., Li, W., Sun, Z., Lange, D., Shah, S. "Properties of interfacial transition zones in recycled aggregate concrete tested by nanoindentation", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 37, 2013. pp 276-292.

Anexos

Anexo I - Ficha técnica - cimento Portland

CEM I 42,5R

Cimento Portland



Locais de Produção

Fábrica Secil-Outão
Fábrica Maceira-Liz

Embalagem

Granel
Sacos de 40kg

Certificação

Cimento certificado segundo a NP EN 197-1.
Certificados de Conformidade 0856-CPD-0118 e 0856-CPD-0124.

Composição do Produto (Núcleo Cimento)

95% a 100% Clínquer Portland
0% a 5% Outros Constituintes

Principais Aplicações

O Cimento Portland CEM I 42,5R é um produto de elevada qualidade e performance muito utilizado em obras de engenharia civil e na fabricação de betões de elevada a muito elevada resistência. É também particularmente adaptado aos trabalhos onde se exige uma resistência muito elevada aos primeiros dias após aplicação.

As principais aplicações deste cimento são:

- betão pronto ou fabricado em obra de elevada e muito elevada resistência inicial ou final;
- betões leves de elevada resistência;
- betão com aplicação de pré-esforço a idades jovens;
- betão aplicado em tempo frio;
- prefabricação ligeira preesforçada e pesada com alta rotatividade de moldes e pistas;
- caldas de selagem e injeção.

Principais Características

Cimento de cor cinzenta, com elevado calor de hidratação.
Desenvolvimento rápido de resistências (resistência inicial elevada).
Resistências finais dentro dos valores da classe indicada (resistências aos 28 dias).

Advertências Específicas

O correcto desenvolvimento de resistências é muito sensível ao processo de cura.
- devem tomar-se cuidados para evitar a dissecação de todas as peças betonadas;
- devem evitar-se betonagens em tempo muito quente.

Este cimento permite a fabricação de betões de elevado desempenho mecânico, recomendando-se o estudo prévio de composições para obter a melhor performance.

A utilização deste cimento é compatível com a introdução de adições de hidraulicidade latente e é usual a utilização de adjuvantes para melhoria da trabalhabilidade com eventual redução da relação água/cimento.

Informação de Segurança

O manuseamento do cimento em pó pode causar irritação dos olhos e vias respiratórias. Quando misturado com água pode ainda causar sensibilização da pele. Aconselha-se o uso de máscara anti-poeiras para protecção respiratória, luvas de protecção das mãos, óculos de protecção dos olhos e fato de trabalho para protecção da pele.

Para informação detalhada consulte a Ficha de Dados de Segurança deste produto.

Última actualização

Setembro 2004 - Versão 3

pag. 1 | 2

Características Químicas

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado (1)
Perda ao Fogo	NP EN 196-2	≤ 5,0%
Resíduo Insolúvel	NP EN 196-2	≤ 5,0%
Teor de Sulfatos (em SO ₃)	NP EN 196-2	≤ 4,0%
Teor de Cloretos	NP EN 196-21	≤ 0,10%

(1) As percentagens são referidas à massa de cimento.

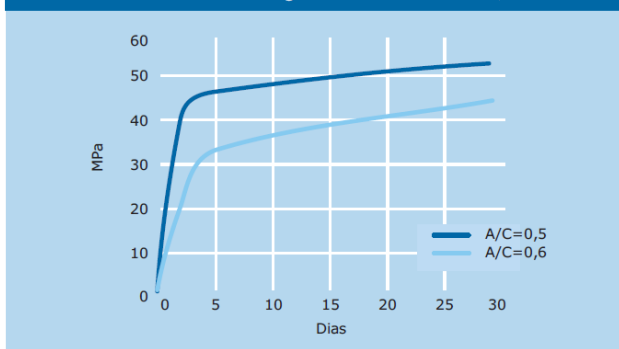
Características Mecânicas

Resistência à Compressão (MPa)			
Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência	NP EN 196-1
2 dias	7 dias		
≥ 20	-	≥ 42,5 e ≤ 62,5	

Características Físicas

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado
Princípio de Presa	NP EN 196-3	≥ 60 min
Expansibilidade	NP EN 196-3	≤ 10 mm

Valores médios indicativos da resistência à compressão de betão fabricado com 350 Kg/m³ de cimento CEM I 42,5R



Autoestrada A2.
Ponte de Alcácer do Sal.



Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A.

Direção Comercial
Av. das Forças Armadas, 125 6º
1600-079 LISBOA
Tel. 217 927 100 . Fax. 217 936 200

Vendas Norte
Tel. 226 078 410 . Fax. 226 078 411

Vendas Centro
Tel. 244 779 500 . Fax. 244 777 455

Vendas Sul
Tel. 212 198 280 . Fax. 212 198 229

Cimento Branco
Tel. 244 587 700 . Fax. 244 589 652

Departamento Técnico-Comercial
Tel. 212 198 280 . Fax. 212 198 229

E-mail - comercial@secil.pt
Site - www.secil.pt

Anexo II - Baridade

Amostra	Areia fina	Areia grossa	Bago de Arroz	Brita I	Leca		Lytag		Stalite	
					1	2	1	2	1	2
m1 (Kg)	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
Capacidade (dm ³)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
m2 (Kg)	6,4	6,5	5,9	5,8	3,6	3,6	4,0	4,1	4,1	4,2
Baridade (Kg.m ³)	1500	1544	1363	1323	577	570	727	733	751	776

Anexo III - Massa volúmica e absorção de água

Leca	Ms (g) = 301,70	Msat (g) = 351,70
t (minutos)	Massa do conjunto (g)	WA_{massa} (%)
0	1661,80	0,0
5	1665,50	8,0
10	1667,20	8,5
20	1669,40	9,3
30	1671,40	9,9
60	1674,80	11,1
180	1679,30	12,5
1440	1691,45	16,6

Lytag	Ms (g) = 380,20	Msat (g) = 452,45
t (minutos)	Massa do conjunto (g)	WA_{massa} (%)
0	1686,85	0,0
5	1690,90	14,3
10	1691,50	14,4
20	1692,55	14,7
30	1694,00	15,1
60	1695,55	15,5
180	1698,95	16,4
1440	1708,90	19,0

Stalite	Ms (g) = 475,80	Msat (g) = 496,70
t (minutos)	Massa do conjunto (g)	WA_{massa} (%)
0	1789,25	0,0
5	1790,95	2,8
10	1791,30	2,9
20	1791,60	3,0
30	1791,95	3,0
60	1792,35	3,1
180	1793,40	3,3
1440	1798,45	4,4

Brita calcária	Ms (g) = 2438,2	Msat (g) = 2456,25
t (minutos)	Massa do conjunto (g)	WA_{massa} (%)
0	6627,05	0,0
1440	6651,60	0,7

Brita granítica	Ms (g) = 2426,2	Msat (g) = 2443,60
t (minutos)	Massa do conjunto (g)	WA_{massa} (%)
0	6534,70	0,0
1440	6565,85	0,7

	Leca	Lytag	Stalite	Brita Calcária	Brita Granítica
m1 (g)	409,70	340,75	447,40	145,15	128,35
m2 (g)	709,75	719,75	924,05	2576,20	2563,20
Mw (g)	351,70	452,45	496,70	2456,25	2443,60
Mf (g)	1691,45	1708,95	1798,45	6651,60	6565,85
Ma (g)	1650,50	1548,30	1629,95	5111,35	5016,65
Vp (m3)	0,0012	0,0012	0,0012	0,0050	0,0049
pa	966	1299	1452	2654	2722

Em que:

- m1 - Massa picnómetro e funil;
- m2 - Massa picnómetro, funil e amostra;
- Mp - Massa picnómetro;
- Mw - Massa do agregado com superfície seca;
- Ma - Massa picnómetro, funil e água;
- Mf - Massa picnómetro, funil, amostra e água às 24h;
- Vp - Volume do picnómetro;
- pa - Massa Volúmica.

Anexo IV - Resistência à compressão

Tipo de agregado (molhagem inicial dos agregados)	Processo de cura do betão	2 dias			7 dias			28 dias		
		Força (kN)	F _{ci} (MPa)	F _{cm} (MPa)	Força (kN)	F _{ci} (MPa)	F _{cm} (MPa)	Força (kN)	F _{ci} (MPa)	F _{cm} (MPa)
Leca (secos)	Húmida				687,6	30,6		738,9	32,8	
				-	735,7	32,7	31,3	793,3	35,3	34,7
					688,2	30,6		812,0	36,1	
Leca (saturados)	Húmida	579,4	25,8		725,8	32,3		824,0	36,6	
		573,5	25,5	26,1	699,1	31,1	32,0	809,9	36,0	36,5
		606,4	27,0		731,5	32,5		831,7	37,0	
Leca (saturados)	Seca				756,4	33,6		898,2	39,9	
				-	716,7	31,9	33,1	875,6	38,9	39,3
					764,0	34,0		877,3	39,0	
Lytag (saturados)	Húmida	648,7	28,8		825,3	36,7		916,5	40,7	
		638,5	28,4	28,5	802,5	35,7	36,4	864,3	38,4	40,1
		636,7	28,3		831,4	37,0		925,7	41,1	
Stalite (saturados)	Húmida	707,3	31,4		954,9	42,4		1121,1	49,8	
		720,2	32,0	32,1	988,3	43,9	42,8	1071,1	47,6	48,3
		737,7	32,8		944,9	42,0		1068,3	47,5	
Brita I	Seca				916,7	40,7		1124,0	50,0	
				-	1018,4	45,3	43,5	1095,9	48,7	49,8
					998,4	44,4		1138,7	50,6	
Brita I	Húmida	751,5	33,4		956,0	42,5		1203,6	53,5	
		732,9	32,6	33,0	966,3	42,9	42,8	1091,2	48,5	51,2
		743,9	33,1		967,3	43,0		1159,8	51,5	

Anexo V - Resistência à tracção por compressão diametral

Tipo de agregado (molhagem inicial dos agregados)	Processo de cura do betão	Força (kN)	F _{cti,sp} (MPa)	F _{ctm,sp} (MPa)
Leca (secos)	Húmida	177,5	2,5	2,6
		179,5	2,5	
		202,0	2,9	
Leca (saturados)	Húmida	130,1	1,8	2,2
		174,7	2,5	
		162,8	2,3	
Leca (saturados)	Seca	102,9	1,5	1,6
		140,2	2,0	
		96,9	1,4	
Lytag (saturados)	Húmida	179,6	2,5	2,9
		220,6	3,1	
		216,3	3,1	
Stalite (saturados)	Húmida	200,9	2,8	3,3
		248,9	3,5	
		251,3	3,6	
Brita I	Seca	188,7	2,7	3,0
		220,4	3,1	
		234,8	3,3	
Brita I	Húmida	244,9	3,5	3,7
		281,8	4,0	
		266,4	3,8	

Anexo VI - Resistência à tracção axial

Tipo de agregado (molhagem inicial dos agregados)	Processo de cura do betão	Força (kN)	F _{cti} (MPa)	F _{ctm} (MPa)
Leca (secos)		2,6	1,7	1,8
		2,6	1,7	
		2,8	1,8	
Leca (saturados)		2,2	1,4	1,4
		2,3	1,5	
		2,0	1,3	
Lytag (saturados)		2,8	1,9	2,0
		3,1	2,1	
		3,0	2,0	
Stalite (saturados)		3,1	2,0	2,2
		3,3	2,2	
		3,5	2,3	
Brita calcária	Húmida	5,7	3,8	3,3
		5,1	3,4	
		4,3	2,8	
Brita granítica		3,0	2,0	2,0
		2,9	1,9	
		3,1	2,1	
Esferas de vidro		1,5	1,0	1,0
		1,6	1,1	
		1,7	1,1	
Argamassa		4,8	3,2	3,1
		4,7	3,1	
		4,7	3,1	

Anexo VII - Ensaios de aderência agregado-pasta com composição de a/c 0,47

Tipo de agregado (molhagem inicial dos agregados)	Amostra	Força (kN)	Extensão (mm)	Área total (mm ²)	Área agregado (mm ²)	F _{cti,agr} (MPa)	F _{ctm,agr} (MPa)
Brita calcária	1	1,2	1,2	1556,9	227,5	5,2	4,8
	2	0,9	0,9	1526,2	196,1	4,7	
	3	1,0	1,6	1542,7	198,3	5,0	
	4	1,1	1,4	1533,8	237,9	4,4	
Argamassa	1	0,3	-	1553,0	-	0,3	0,2
	2	0,3	-	1446,8	-	0,3	
	3	0,3	-	1557,2	-	0,3	
	4	0,3	-	1563,8	-	0,3	
Brita granítica	1	1,1	1,4	1535,5	227,7	4,9	5,3
	2	0,9	1,3	1478,8	184,7	4,9	
	3	1,1	1,0	1509,1	211,1	5,4	
	4	1,4	1,9	1575,4	231,1	6,0	
Leca (seca)	1	0,4	0,7	1326,1	240,6	1,7	1,4
	2	0,5	0,6	1539,4	313,2	1,6	
	3	0,5	0,8	1516,5	313,3	1,4	
	4	0,2	0,5	1545,1	304,3	0,6	
Lytag (saturada)	1	0,8	1,0	1558,9	264,2	3,0	3,2
	2	0,7	0,8	1512,6	227,2	3,1	
	3	0,8	1,2	1492,5	244,3	3,4	
	4	0,9	0,9	1432,3	280,9	3,1	
Stalite (saturada)	1	0,8	1,0	1565,8	243,7	3,4	4,0
	2	0,8	0,9	1507,1	236,0	3,3	
	3	0,8	1,0	1514,5	182,5	4,2	
	4	0,8	1,3	1519,7	162,9	5,0	
Leca (saturada)	1	0,3	1,7	1475,8	259,5	1,2	1,6
	2	0,4	0,9	1511,6	296,0	1,2	
	3	0,6	1,4	1456,5	248,2	2,6	
	4	0,4	1,0	1537,0	279,8	1,5	