



DECivil

Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura

DESEMPENHO MECÂNICO E DE DURABILIDADE DE BETÕES PRODUZIDOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE ELEVADO DESEMPENHO PARA A INDÚSTRIA DA PRÉ-FABRICAÇÃO

**PROJECTO FCT
PTDC / ECM / 118372 / 2010**



Tarefa 5

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE BETÕES COM AGREGADOS RECICLADOS DE ELEVADO DESEMPENHO PARA A INDÚSTRIA DA PRÉ-FABRICAÇÃO (EXCELlentSUStainableCONCcrete)

APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS BETÕES RECICLADOS DE ELEVADO DESEMPENHO (3ª FASE)

RELATÓRIO

Setembro de 2015

Financiamento FCT/POCTI



Governo da República Portuguesa



União Europeia

FEDER

FCT Fundação para a Ciência e a Tecnologia

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E DO ENSINO SUPERIOR

Portugal

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
2. ENQUADRAMENTO E CONTEXTO	1
3. MATERIAIS UTILIZADOS	8
4. ENSAIOS AO BETÃO NO ESTADO FRESCO	9
4.1. Abaixamento (cone de Abrams)	10
4.2. Massa volúmica	10
5. ENSAIOS AO BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO	11
5.1. Propriedades em termos mecânicos	11
5.1.1. Resistência à compressão em cubos	11
5.1.2. Ensaio de arrancamento de varões de aço (aderência aço-betão)	12
5.2. Propriedades em termos de durabilidade	15
5.2.1. Permeabilidade ao oxigénio	15
5.3. Propriedades reológicas	16
5.3.1. Retracção	16
5.3.2. Fluência	18
5.4. Análise microscópica de betões	19
5.4.1. Microscopia electrónica de varrimento (MEV)	19
5.4.1.1. Betões de referência da tarefa 2	19
5.4.1.2. Betões reciclados da tarefa 2	21
5.4.1.3. Betões de referência da tarefa 5.3	24
5.4.1.4. Betões reciclados da tarefa 5.3	25
5.4.1.5. Betões de referência da tarefa 5.5	26
5.4.1.1. Betões reciclados da tarefa 5.5	28
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
7. BIBLIOGRAFIA	31

Índice de figuras

Figura 1 - Resultados do ensaio de massa volúmica.....	11
Figura 2 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias	12
Figura 3 - Diagramas P- Δ L dos diversos betões.....	13
Figura 4 - Relação entre a tensão de aderência e a resistência à tracção por compressão diametral.....	14
Figura 5 - Rotura por <i>Splitting</i>	14
Figura 6 - Deformações devido a retracção ao longo do tempo	16
Figura 7 - Resultados do ensaio de fluência dos betões.....	18
Figura 8 - MEV dos BR com resistência alvo 20 MPa da tarefa 2 (a, c: BR-20-TP; b, d: BR-20-TS).....	20
Figura 9 - MEV dos BR com resistência alvo 45 MPa da tarefa 2 (a, b: BR-45-TP).....	21
Figura 10 - MEV dos BR com resistência alvo 65 MPa da tarefa 2 (a, b: BR-65-TS)....	21
Figura 11 - MEV dos BAR com resistência alvo 20 MPa da tarefa 2 (a, c: BAR-PF20-TP; b, d: BAR-PF20-TS).....	22
Figura 12 - MEV dos BAR com resistência alvo 45 MPa da tarefa 2 (a, c: BAR-PF45-TP; b, d: BAR-PF45-TS).....	23
Figura 13 - MEV dos BAR com resistência alvo 65 MPa da tarefa 2 (a, c: BAR-PF65-TP; b, d: BAR-PF65-TS).....	24
Figura 14 - MEV dos BR da tarefa 5.3 (a, b: BR-SF0-F5.3; c, d: BR-SF5-F5.3; e, f: BR-SF10-F5.3)	25
Figura 15 - MEV dos BAR da tarefa 5.3 (a, b: B100R-SF0-F5.3; c, d: B100R-SF5-F5.3; e, f: B100R-SF10-F5.3).....	26
Figura 16 - MEV dos BR da tarefa 5.5 (a, b: BR-SF0-F5.5; c, d: BR-SF5-F5.5; e, f: BR-SF10-F5.5)	27
Figura 17 - MEV dos BAR da tarefa 5.5 (a, b: B100R-SF0-F5.5; c, d: B100R-SF5-F5.5; e, f: B100R-SF10-F5.5).....	28

Índice de tabelas

Tabela 1 - Composição dos betões analisados (/m ³).....	9
Tabela 2 - Propriedades dos agregados.....	9
Tabela 3 - Propriedades da sílica de fumo	9
Tabela 4 - Resultados obtidos no ensaio de abaixamento.....	10
Tabela 5 - Resultados do ensaio de massa volúmica	10
Tabela 6 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias.....	12
Tabela 7 - Resultados do ensaio de arrancamento aos 91 dias.....	13
Tabela 8 - Resultados do ensaio de permeabilidade ao oxigénio aos 91 dias	15
Tabela 9 - Deformações por retracção aos 7 dias, para os diversos betões.....	17
Tabela 10 - Deformações por retracção aos 91 dias, para os diversos betões.....	17
Tabela 11 - Deformações por fluência aos 91 dias, para os diversos betões	18
Tabela 12 - Variação das diversas propriedades com a utilização de AR	30
Tabela 13 - Variação das diversas propriedades com a utilização de SF.....	30

Abreviaturas

AFN	Agregados finos naturais
AFR	Agregados finos reciclados de betão
AGN	Agregados grossos naturais
AGR	Agregados grossos reciclados de betão
AN	Agregados naturais
AR	Agregados reciclados
BAR	Betões com agregados reciclados
BED	Betões de elevado desempenho
BER	Betões de elevada resistência
BR	Betões de referência
CV	Cinzas volantes
$D_{m\acute{a}x}$	Dimensão máxima do agregado
ITZ	<i>Interfacial Transition Zone</i>
PF	Família de betão pré-fabricado
Relação a/l	Relação água / ligante
SF	Sílica de fumo

1. Introdução

O presente relatório tem como objectivo apresentar os resultados experimentais da tarefa 5.7 do Projecto FCT PTDC/ECM/118372/2010 - “Betão com agregados reciclados de elevado desempenho para a indústria da pré-fabricação (EXCELlentSUSustainableCONcrete)”.

Esta tarefa consistiu em escolher seis amassaduras pertencentes às fases anteriores dos betões de elevado desempenho (BED) e efectuar nessas amassaduras uma série de testes adicionais. Na selecção das amassaduras, foi dada importância ao modo como a incorporação de sílica de fumo (SF) e de agregados reciclados (AR) afecta o seu desempenho.

Neste sentido, a campanha experimental englobou betões de referência (BR), unicamente produzidos com agregados naturais, betões com agregados reciclados (BAR) e diferentes percentagens de SF. Foram escolhidas duas amassaduras da tarefa 5.3 e quatro da tarefa 5.5.

Na avaliação realizada, foram efectuados ensaios de microscopia, reologia, durabilidade e ainda de carácter mecânico: microscopia electrónica de varrimento (MEV), retracção, fluência, permeabilidade ao oxigénio e aderência aço-betão.

2. Enquadramento e contexto

O betão é um material compósito constituído por uma mistura de agregados de diferentes granulometrias, cimento, água e, por vezes, adições e adjuvantes.

A sua composição deve ser ajustada, em função de cada situação, para que possa atingir níveis adequados de resistência, durabilidade e trabalhabilidade.

O seu comportamento é principalmente condicionado pela composição granulométrica dos agregados, dosagem de água e adjuvantes e tipo e dosagem de ligante.

A dosagem de ligante é um factor que possui uma influência considerável nas propriedades do betão. Para baixas dosagens, as misturas são pouco trabalháveis, com tendência para segregar e com difícil acabamento superficial. Por outro lado, para elevadas dosagens, apresentam-se excessivamente coesivas e aderentes sendo mais difíceis de colocar e compactar em obra (E378, 1993).

No que respeita à quantidade de água, a razão água-ligante (a/l) é o parâmetro que mais influencia as propriedades do betão. Quanto maior for o seu valor, mais porosa e

permeável é a pasta de cimento, tornando o betão menos resistente e mais sensível à acção dos agentes agressivos que originam a deterioração das estruturas. Deste modo, é importante limitar ao mínimo a quantidade de água utilizada, pois a água em excesso evapora-se, criando no betão uma rede de poros capilares que prejudicam a sua resistência e durabilidade.

Com o desenvolvimento da tecnologia e a disponibilização pela indústria química de adjuvantes (superplastificantes de 3ª geração) e de adições de elevado efeito pozolânico, verificou-se um interesse crescente na optimização das propriedades do betão.

Apoiados por esta realidade, os betões de elevado desempenho têm merecido uma atenção especial. No entanto, apesar de já existir bastante informação sobre BED convencional, o conhecimento sobre BED com agregados reciclados é ainda insuficiente. Além disso, existem algumas propriedades como retracção, fluência, permeabilidade ao oxigénio e aderência aço-betão cujo conhecimento é ainda reduzido, quer em BED convencional quer em BED com agregados reciclados. A própria microscopia destes betões é também um aspecto pouco abordado. Assim, nesta investigação, decidiu-se seleccionar um conjunto de betões de elevado desempenho (pertencentes a tarefas anteriores) e efectuar nesses betões um conjunto adicional de ensaios às propriedades atrás referidas.

A retracção, ou seja, a deformação devida ao comportamento diferido do betão e independente do carregamento, pode ter lugar antes e após o endurecimento do betão. Antes do endurecimento, pode ocorrer sob a forma de retracção plástica causada por tensões capilares nos poros, tendo como consequência o aparecimento de fissuras superficiais (Samman et al., 1996; Aïtcin et al., 1997; Coutinho e Gonçalves, 1997). Após o endurecimento, a retracção, assim definida, é habitualmente constituída por três parcelas: retracção de secagem, retracção autogénea e retracção de carbonatação (CEB, 1993; Aïtcin et al. 1997; Coutinho e Gonçalves, 1997).

As componentes da retracção mais relevantes para o comportamento diferido do betão são a retracção de secagem e a retracção autogénea.

No que respeita à retracção de secagem, no estudo realizado por Shiomi et al. (1993), observou-se que esta propriedade variou de forma inversa com a relação água / ligante, sendo independente do teor absoluto de água. Noutra investigação, Khan et al. (1997) procuraram compreender o comportamento diferido em idades jovens (até aos 28 dias) de betões com baixa, média e elevada resistência à compressão (30, 70 e 100 MPa). Os autores concluíram que a retracção (total) foi idêntica entre os betões embora tenha apresentado comportamentos distintos. Em provetes não selados, expostos a con-

dições de temperatura de 20 ± 1 °C e humidade relativa de $50 \pm 10\%$, observaram que enquanto os betões de baixa e média resistência exibiram um crescimento aproximadamente linear da retracção de secagem, o betão de 100 MPa exibiu um crescimento mais acentuado com o tempo até aos sete dias e um crescimento muito reduzido a partir dessa idade. Quanto ao papel das adições minerais com efeito pozolânico, como a sílica de fumo e as escórias granuladas de alto-forno, Jianyong e Yan (2001) observaram que, em betões de idêntica resistência à compressão (cerca de 100 MPa) e igual dosagem de ligante, o incremento de adições minerais se traduzia numa menor retracção por secagem. Mokarem et al. (2005) observaram também que betões de alta resistência (BER) que utilizavam cinzas volantes (CV) como adição apresentavam maior retracção por secagem do que betões com sílica de fumo.

A retracção autogénea exibe maior importância na retracção total dos betões de alta resistência / desempenho do que nos betões de resistência normal (Saje e Saje, 2003; Lourenço et al., 2004). O elevado teor da pasta ligante contribui decisivamente para esta realidade. No estudo de Khan et al. (1997), em condições seladas, sem trocas de humidade com o exterior, observou-se que, à medida que aumentava a resistência do betão, aumentava a retracção autogénea. O comportamento da retracção autogénea também era distinto, apresentando os betões de baixa resistência (30 MPa) e de média resistência (70 MPa) uma taxa linearmente crescente das extensões de retracção, desde as primeiras horas até aos 28 dias, enquanto nos betões de resistência superior (100 MPa) a retracção autogénea crescia a um ritmo muito elevado nos primeiros dias (7 dias), estabilizando depois para taxas de crescimento reduzidas. A maior sensibilidade dos BED/BER à componente autogénea da retracção em idades jovens é também confirmada por outros estudos (Kovler et al., 2000; Weiss et al., 2000). A influência da sílica de fumo na retracção autogénea foi analisada na investigação de Kojima et al. (2001). Nesse trabalho, foram estudados betões com três relações água / ligante (0,20, 0,30 e 0,50) e três percentagens de sílica de fumo (0, 7,5 e 15%). Os autores observaram que, tanto a retracção autogénea, como a sua parcela de contribuição para a retracção total, aumentavam com a diminuição da relação água / ligante. A retracção total (soma da retracção autogénea e da retracção por secagem), ao fim de um ano, foi praticamente igual em todas as composições, independentemente da percentagem de adição, da relação água / ligante e das condições de cura.

Limbachiya et al. (2000) examinaram a influência da incorporação de agregados grossos reciclados em betão de alta resistência (de 50 MPa ou mais). Os resultados mostram

que a retracção aumentou com o aumento da quantidade de AR. Foi observada uma variação máxima de cerca de 10%. Os autores referem que a argamassa aderida aos agregados reciclados pode influenciar decisivamente o desempenho dos betões.

Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002) estudaram não só os efeitos da incorporação de agregados reciclados grossos como também de finos de elevada qualidade no desempenho de BED. Os autores constataram novamente que a influência dos AR foi significativa na propriedade de retracção. Os betões de elevado desempenho produzidos apenas com agregados reciclados evidenciaram aumentos de retracção de 35-45%, relativamente aos BED convencionais.

A fluência, isto é, a deformação devida ao comportamento diferido do betão e dependente do carregamento, reduz-se com o aumento da resistência à compressão do betão (ACI 363R-92, 1997; Coutinho e Gonçalves, 1997; Neville, 1981). Deste modo, é expectável que a fluência observada em BED/BER seja inferior à observada em betões de resistência normal (Mendis, 2003). Esta situação permite que os BED/BER possam ser solicitados a níveis de tensão superior (Mendis, 2003). O facto de os betões de elevado desempenho desenvolverem resistências elevadas em idades muito jovens pode também constituir uma vantagem dado que permite que sejam solicitados a essas idades. Khan et al. (1997) observaram que a fluência diminuía com o aumento da resistência à compressão na idade do carregamento, para todos os tipos de betão. Os resultados obtidos mostraram a maior sensibilidade dos BER quanto à idade do carregamento do que os betões de baixa e média resistência. Para carregamentos em idades muito jovens (inferiores a 24 horas), esses betões registaram um aumento muito significativo da fluência. Este facto foi atribuído a um efeito de retardamento da hidratação provocado pelo superplastificante utilizado. Os autores compararam ainda os valores experimentais de fluência com os valores estimados pelo modelo de previsão preconizado no Model Code 90 (CEB/FIP, 1990). Observaram que, quanto maior a resistência do betão, mais inadequado se mostrava este modelo à previsão do comportamento da fluência de betões carregados em idades muito jovens. Na investigação conduzida por Jianyong e Yan (2001), em betões de idêntica resistência à compressão (cerca de 100 MPa) e igual dosagem de ligante, concluíram que a utilização de adições minerais com efeitos pozolânicos, como escórias de alto-forno e sílica de fumo, contribuía para redução significativa da fluência. Observaram também que esta redução era mais acentuada no betão que incorporava sílica de fumo. Esta situação foi justificada pelo aumento significativo da quantidade de silicatos hidratados de cálcio (C-S-H) e da densidade do betão.

No que respeita à influência de AR em BED, Limbachiya et al. (2000) registaram aumentos de fluência de aproximadamente 30-65%, devido à incorporação de 100% de agregados grossos reciclados.

No estudo realizado por Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002), os resultados de fluência relativos a BED reciclado não foram tão claros como os obtidos na retracção. Os autores verificaram que amassaduras produzidas com AR exibiram diminuições máximas de fluência (após um ano) de cerca de 20%, relativamente a amassaduras de referência. Esta realidade foi particularmente visível nos betões com menores resistências, produzidos sem adjuvantes e adições. Os autores referem que a influência conjunta da retracção e da fluência parece ser ligeiramente maior para os betões reciclados, em comparação com os betões de referência.

A permeabilidade ao oxigénio é o fluxo de gás que passa através do betão devido à aplicação de uma pressão e é descrita através do coeficiente de permeabilidade. Na determinação deste coeficiente, o escoamento, é geralmente, assumido como sendo laminar (Helmuth, 1960). No entanto, essa condição deixa de ser estritamente válida em face da vasta gama dos poros existentes no betão (Kropp et al.,1995; Abbas et al.,1999). Caso o escoamento seja turbulento, o volume de fluido transportado deixa de ser proporcional à pressão aplicada (Kropp et al.,1995). Por estes motivos, observa-se, em geral, que a permeabilidade decresce com a pressão aplicada (Abbas et al.,1999). De salientar que o efeito de escorregamento e do escoamento molecular torna-se menos importante para maiores graus de saturação, uma vez que os poros de menor dimensão estão preenchidos com água (Abbas et al.,1999). Em oposição, para menores teores de água, verifica-se um aumento do volume e da conectividade de poros permeáveis. Deste modo, é natural encontrar na literatura variações na permeabilidade ao gás até duas ordens de grandeza (Neville, 1981; Ollivier et al., 1995; Abbas et al.,1999).

De acordo com Geiker et al. (1995), o coeficiente de permeabilidade pode variar entre 10^{-14} a 10^{-19} m^2 , para betões densos com resistências entre 15 e 55 MPa. No trabalho realizado por Neville (1981), observa-se, em betões com relações a/l de 0,33, permeabilidades na ordem de 10^{-18} m^2 .

A aderência é um fenómeno de interface que ocorre entre o aço e o betão e que possui uma importância significativa no comportamento mecânico e no desempenho das estruturas de betão armado, nomeadamente em termos de fissuração, condições de serviço e situações limites. Considerando um elemento de betão armado, o desenvolvimento de forças de interacção dá-se na superfície de contacto entre os dois materiais. A

transmissão de esforços ocorre através de forças superficiais envolvendo fenómenos de aderência que têm lugar ao longo do comprimento de transmissão. As forças de aderência em cada zona do comprimento de transmissão são proporcionais à força de tracção aplicada ao varão e resultam de estados de tensão no betão. Nas zonas onde a deformação do aço difere da do betão, observa-se um deslocamento relativo ou escorregamento entre os dois materiais (FIB Bulletin 10, 2000). A intensidade da tensão de aderência depende assim do deslocamento relativo entre o aço e o betão. De notar que o estado de tensão no betão associado às forças de aderência é responsável pelo desenvolvimento de fissuras transversais e longitudinais ao varão traccionado, as quais podem ser controladas através de espessuras adequadas de recobrimento (Belaid et al., 2001).

A resistência por aderência tem origem em diversas componentes (FIB Bulletin 55, 2010): adesão; interbloqueio mecânico; interbloqueio friccional e efeito de ferrolho (provocado por dispositivos do tipo ancoragem).

A resistência por adesão deve-se a interligações químicas entre o aço e o betão. Este efeito contribui com uma resistência de cerca de 0,1 MPa, sendo quebrado logo que se verificam micro-deslocamentos relativos entre o varão e o betão envolvente (FIB Bulletin 55, 2010).

O interbloqueio mecânico é desencadeado pelas nervuras existentes na superfície do varão. É por este meio que se realiza uma efectiva transferência de forças, sendo o principal responsável pelas tensões instaladas no betão.

O interbloqueio friccional é originado pelos deslocamentos relativos entre as superfícies. Este efeito é devido à rugosidade das superfícies de contacto, dependendo, portanto, do estado de oxidação do varão, da composição do betão, das forças de contacto entre as superfícies e do número de ciclos de carregamentos anteriores.

No caso de varões nervurados, a influência do atrito só se torna relevante após o colapso da interbloqueio mecânico, quando já estão definidas as superfícies de rotura e o deslizamento do varão é bastante elevado. Nesta situação, a transmissão de esforços é insignificante, sendo praticamente realizada por atrito. A resistência por aderência é determinada pelo valor da força de tracção aplicada na extremidade do varão. O valor máximo da força de tracção para a qual se atinge a rotura da ligação varão-betão corresponde à resistência última de aderência.

No estudo de Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002), foi também analisada a influência dos AR no desempenho desta propriedade. Os resultados mostram que as maiores diferenças se deveram ao tipo de varão utilizado (liso ou nervurado) e à incorporação ou

não de adições e/ou adjuvantes. A incorporação de AR foi o vector que apresentou menor importância.

A microscopia electrónica de varrimento (MEV) permite obter imagens tridimensionais de elevada ampliação e resolução, baseando-se na incidência de feixes de electrões nas superfícies das amostras e posterior recolha dos sinais reflectidos. Entre os sinais reflectidos com maior utilidade na análise dos betões destacam-se os electrões secundários e os electrões retrodifundidos (Diamond, 2004; Scrivener, 2004).

A análise das imagens recolhidas em modo de electrões secundários (realizada nesta investigação) permite mapear topograficamente as superfícies fracturadas, permitindo observar os produtos de cristalização, bem como analisar a sua escala e morfologia (Diamond, 2004).

Através da análise da literatura, observou-se que a maioria das investigações sobre BED convencional / com agregados reciclados está sobretudo centrada na análise das propriedades mecânicas existindo também alguns estudos sobre aspectos de durabilidade. No entanto, a caracterização da microestrutura destes betões é um aspecto ainda pouco focado.

No que diz respeito a betões correntes, Guedes et al. (2013) avaliaram a microestrutura de betões com agregados finos reciclados de betão (AFR). Os autores concluíram que a introdução de AFR introduz diferentes microestruturas nas ITZ's (*Interfacial Transition Zone* - interface entre agregados e matriz ligante) dos betões, embora não altere a composição ou a morfologia dos produtos típicos resultantes do processo de hidratação do cimento. Observaram ainda um aumento da porosidade com o aumento da quantidade de agregados finos reciclados. A única excepção ocorreu para a taxa de substituição de 10%, onde se verificou uma menor porosidade na zona de transição do que a observada no betão de referência. Esta situação foi explicada pelo facto da ligação entre os AR e a pasta cimentícia melhorar até a um determinado limite de substituição, conseguindo compensar o facto de se estar a utilizar um agregado mais fraco.

Poon et al. (2004) analisaram a microestrutura de amassaduras produzidas utilizando agregados grossos reciclados (AGR) provenientes de betões correntes e de betões de elevado desempenho. Os autores constataram que, entre os betões reciclados, a utilização de AGR de betões de elevado desempenho conduz a ITZ's muito mais densas. Esta situação foi justificada pela maior absorção e porosidade dos AGR provenientes de betões correntes. A microestrutura da ITZ dos betões reciclados foi considerada um factor importante no que respeita ao desenvolvimento da resistência.

No trabalho realizado por Xiao et al. (2013), a microestrutura de betões com AGR foi novamente analisada. O estudo pretendeu comparar a antiga ITZ dos AGR com a ITZ formada entre os AGR e a nova pasta de cimento. Os resultados mostram que, para idades avançadas, a antiga ITZ tem uma espessura de cerca de 40-50 μm , enquanto a nova ITZ possui uma espessura de 55-65 μm . É também possível verificar que o módulo de elasticidade médio da antiga ITZ é de cerca de 70 a 80% do da matriz de cimento dos AGR. Por seu turno, o módulo de elasticidade médio da nova ITZ é de cerca de 80 a 90% do da nova matriz de cimento.

3. Materiais utilizados

Os betões produzidos no presente trabalho (Tabela 1) correspondem a duas amassaduras da tarefa 5.3 (BR-SF0-F5.3 e B100R-SF10-F5.3) e a quatro amassaduras da tarefa 5.5 (BR-SF0-F5.5, BR-SF10-F5.5, B100R-SF0-F5.5 e B100R-SF10-F5.5).

As siglas “BR” e “B100R” designam, respectivamente, betões produzidos unicamente com agregados naturais e com agregados reciclados. A sigla “SF” diz respeito à quantidade de sílica de fumo incorporada enquanto a sigla “F” indica a tarefa a que pertencem os betões seleccionados.

As composições das amassaduras não sofreram alterações, voltando a ser utilizados os mesmos materiais: agregados finos naturais (AFN), agregados grossos naturais (AGN), agregados finos reciclados, agregados grossos reciclados, cimento, cinzas volantes, sílica de fumo, superplasticante e água (Tabelas 2 e 3).

Como referido em relatórios anteriores, os betões produzidos nas tarefas 5.3 e 5.5 foram baseados em pressupostos diferentes. Por exemplo, na tarefa 5.3, a sílica de fumo e as cinzas volantes foram utilizadas como um substituto do cimento, sendo mantida a quantidade de ligante em 400 kg/m^3 . Por seu turno, na tarefa 5.5, o cimento foi o elemento que permaneceu constante numa proporção de 550 kg/m^3 . A SF e as CV foram então introduzidas como materiais suplementares. Os agregados foram separados em fracções compreendidas entre 0 e 16 mm ao contrário da tarefa 5.3 em que tinha sido considerado um $D_{\text{máx}}$ de 22,4 mm.

As diferenças entre as duas tarefas são também visíveis ao nível do método de mistura adoptado. Na tarefa 5.3, foram observadas, durante o processo de mistura, dificuldades de dispersão da sílica, podendo ter sido originados alguns aglomerados deste material. Deste modo, na tarefa 5.5 foi utilizada uma nova betoneira (eixo vertical) e considerado um pro-

cedimento diferente no fabrico de amassaduras de betão.

Tabela 1 - Composição dos betões analisados (/m³)

Amassadura	AFN (kg)	AGN (kg)	AFRB (kg)	AGRB (kg)	CEM I 52,5R (kg)	CV (kg)	SF (kg)	Água (l)	Relação a/l	Relação a/l _{ef}	Superplastificante (kg)
BR-SF0-F5.3	781	1086	0	0	360	40	0	148	0,37	0,37	8
BR-SF0-F5.5	705	900	0	0	550	55	0	169	0,28	0,28	12,1
BR-SF10-F5.5	655	836	0	0	550	55	55	169	0,28	0,28	12,1
B100R-SF10-F5.3	0	0	739	959	320	40	40	186	0,46	0,44	8
B100R-SF0-F5.5	0	0	709	802	550	55	0	196	0,32	0,31	12,1
B100R-SF10-F5.5	0	0	655	742	550	55	55	196	0,32	0,31	12,1

Tabela 2 - Propriedades dos agregados

Tipo de agregado	Massa volúmica (kg/m ³)			Absorção de água (%)
	Material impermeável	Material seco	Material saturado com superfície seca	
Areia fina	2663	2662	2617	0,2
Areia grossa	2640	2610	2615	0,5
Brita 1	2700	2680	2670	0,6
Brita 2	2710	2670	2690	0,6
AFRB	2855	2433	2580	6,1
AGRB	2614	2371	2464	3,9

Tabela 3 - Propriedades da sílica de fumo

Análise por fluorescência de raios x			
Parâmetro	Resultado	Unidades	Norma
SiO ₂	94,31	%	IT L 04 54 05 (vs.02)
Al ₂ O ₃	-	%	IT L 04 54 05 (vs.02)
Fe ₂ O ₃	0,03	%	IT L 04 54 05 (vs.02)
CaO	2,13	%	IT L 04 54 05 (vs.02)
MgO	0,41	%	IT L 04 54 05 (vs.02)
K ₂ O	0,24	%	IT L 04 54 05 (vs.02)
Ensaio físicos			
Propriedade	Resultado	Unidades	Norma
Massa volúmica	2,01	g/cm ³	LNEC E 61 (1979)
Resíduo de peneiração, 45 µm	96,4	%	NP EN 196-6:2010

4. Ensaio ao betão no estado fresco

Neste capítulo, pretende-se analisar os resultados obtidos nos ensaios ao betão no estado fresco (trabalhabilidade e massa volúmica). Estes ensaios pretendem avaliar a conformidade da classe de consistência definida para todos os betões (S4) e a massa volúmica dos betões produzidos.

4.1. Abaixamento (cone de Abrams)

O ensaio de abaixamento foi efectuado segundo a norma NP EN 12350-2 (2009). Foi definido um abaixamento alvo de 190 mm, com uma tolerância máxima de 20 mm relativamente a este valor. Na Tabela 4, são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 4 - Resultados obtidos no ensaio de abaixamento

	Amassaduras	Relação a/l	Abaixamento (mm)
F5.3	BR-SF0-F5.3	0,37	200,0
	B100R-SF10-F5.3	0,44	196,0
SF0-F5.5	BR-SF0-F5.5	0,28	205,0
	B100R-SF0-F5.5	0,31	190,0
SF10-F5.5	BR-SF10-F5.5	0,28	204,0
	B100R-SF10-F5.5	0,31	185,0

Através da observação da tabela, verifica-se que todos os betões produzidos respeitam o intervalo 190 ± 20 mm. A relação a/l dos betões com agregados reciclados (BAR) foi aumentada, de forma a garantir trabalhabilidades idênticas. Os resultados estão de acordo com os obtidos nas tarefas anteriores.

4.2. Massa volúmica

Este ensaio foi realizado com base na norma NP EN 12350-6 (2009). Na Tabela 5 e na Figura 1, são apresentados os resultados.

Tabela 5 - Resultados do ensaio de massa volúmica

	Amassaduras	Massa volúmica (kg/m ³)	$\Delta_{\text{betão}}(\%)$
F5.3	BR-SF0-F5.3	2410.1	0.0
	B100R-SF10-F5.3	2288.5	-5.0
SF0-F5.5	BR-SF0-F5.5	2380.6	0.0
	B100R-SF0-F5.5	2290.3	-3.8
SF10-F5.5	BR-SF10-F5.5	2358.2	0.0
	B100R-SF10-F5.5	2270.4	-3.7

Analisando a Tabela 5, verifica-se que a massa volúmica do betão no estado fresco diminui com o aumento da percentagem de AR (Figura 1). Os resultados podem ser justificados com a menor massa volúmica dos agregados reciclados, comparativamente aos agregados naturais.

Observa-se também uma diminuição desta propriedade com o aumento da quantidade de SF. Esta situação poderá ser justificada pelo facto de a massa volúmica da sílica

ser inferior à dos agregados. Os resultados seguem tendências idênticas às observadas nas tarefas anteriores.

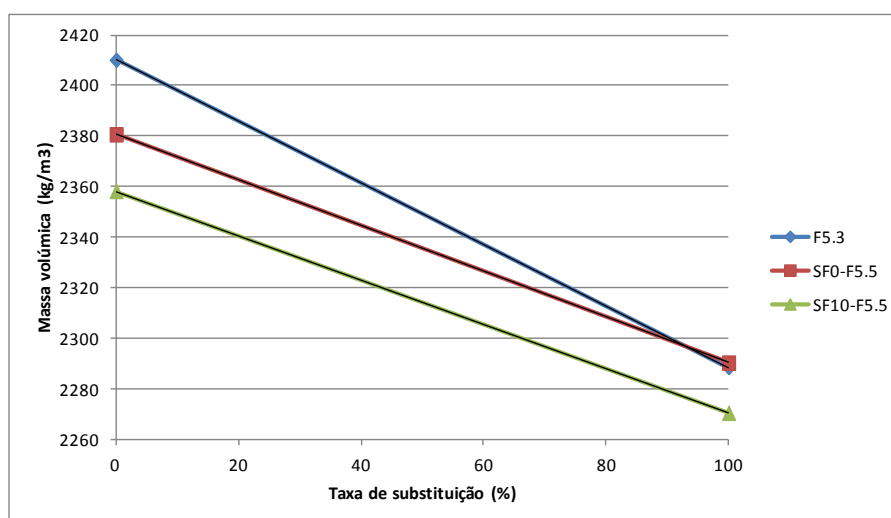


Figura 1 - Resultados do ensaio de massa volúmica

5. Ensaio ao betão no estado endurecido

No capítulo 5, são apresentados e comentados os resultados obtidos para o betão no estado endurecido, caracterizando a influência da incorporação de agregados reciclados (finos e grossos) e da sílica de fumo.

5.1. Propriedades em termos mecânicos

Neste subcapítulo, são avaliadas as propriedades de resistência à compressão e de aderência aço-betão das amassaduras selecionadas.

5.1.1. Resistência à compressão em cubos

O ensaio de resistência compressão foi efectuado aos 28 dias segundo a norma NP EN 12390-3 (2011). Na Tabela 6 e na Figura 2, são apresentados os resultados obtidos. Através da sua observação, verifica-se que as diversas amassaduras apresentam valores bastante próximos aos das tarefas anteriores. Esta realidade concorda com os resultados exibidos no estado fresco, mostrando que a reprodução das amassaduras seleccionadas foi realizada com sucesso.

Tabela 6 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias

	Amassaduras	Resistência à compressão (MPa)	$\Delta_{\text{betão}}(\%)$	D.P (MPa)
F5.3	BR-SF0-F5.3	83,8	0	0,8
	B100R-SF10-F5.3	62,1	-25,9	0,8
SF0-F5.5	BR-SF0-F5.5	94,0	0,0	1,2
	B100R-SF0-F5.5	90,5	-3,8	1,8
SF10-F5.5	BR-SF10-F5.5	102,8	0,0	2,0
	B100R-SF10-F5.5	98,1	-4,5	0,5

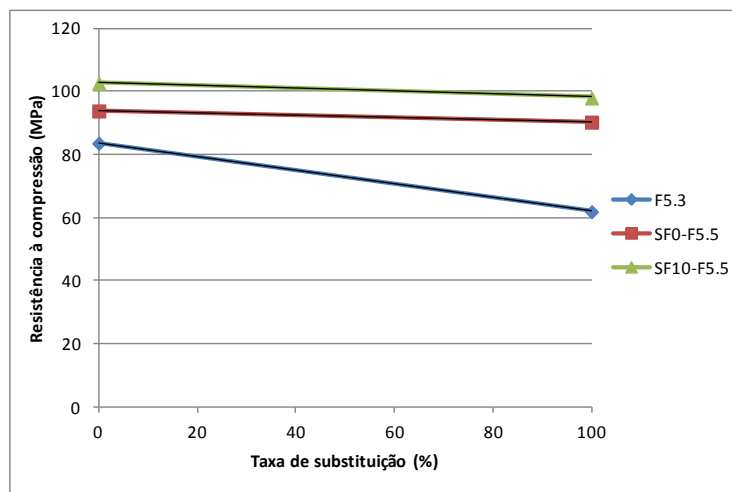


Figura 2 - Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias

De notar que as variações exibidas pelas amassaduras da tarefa 5.3, cerca de 25%, se devem não só aos agregados reciclados mas também à incorporação de sílica de fumo. Uma vez que a selecção estava limitada a 6 amassaduras, optou-se por analisar, nessa tarefa, os dois efeitos em simultâneo. Esta situação é válida para todas as propriedades analisadas.

Recorda-se ainda que, na tarefa 5.3, a introdução de sílica de fumo foi responsável por perdas de 20%, tanto em betões com AN como em betões com AR, o que justifica as variações agora encontradas.

5.1.2. Ensaio de arrancamento de varões de aço (aderência aço-betão)

Este ensaio foi efectuado aos 91 dias tendo por base o documento RILEM7.11.128 (1970). Foram utilizados provetes cúbicos com 120 mm de lado incorporando varões de aço da classe A500 NR SD com diâmetro de 12 mm. O comprimento de amarração considerado foi de 100 mm. Na Tabela 7 e na Figura 3, são apresentados os resultados obtidos. As médias da força de arrancamento, da tensão de aderência e do deslocamento relativo na extremidade não carregada foram designadas pelas letras P, ∇_b e ΔL , respectivamente.

Analisando a Tabela 7, constata-se que a rotura dos diversos provetes ocorreu por *splitting*. Esta rotura está, na maioria das vezes, associada a recobrimentos reduzidos ou a

diâmetros de armadura elevados. No entanto, na investigação conduzida por Bogas (2011), verificou-se que tanto a espessura de recobrimento como o volume de betão entre a extremidade de aplicação da carga e a zona de amarração do varão condicionam a rotura por *splitting*.

Tabela 7 - Resultados do ensaio de arracamento aos 91 dias

	Amassaduras	P (kN)	∇_b (MPa)	ΔL (mm)	Tipo de rotura	$\Delta_{\text{betão}}(\%)$	D.P (MPa)
F5.3	BR-SF0-F5.3	66,3	17,6*	0,69	<i>Splitting</i>	0,0	1,0
	B100R-SF10-F5.3	46,0	12,2*	0,11	<i>Splitting</i>	-30,6	0,5
SF0-F5.5	BR-SF0-F5.5	70,0	18,6*	0,26	<i>Splitting</i>	0,0	0,6
	B100R-SF0-F5.5	58,0	15,4*	0,17	<i>Splitting</i>	-17,1	1,4
SF10-F5.5	BR-SF10-F5.5	71,7	19,0*	0,2	<i>Splitting</i>	0,0	0,8
	B100R-SF10-F5.5	60,4	16,0*	0,14	<i>Splitting</i>	-15,8	0,6

*Valor limite inferior

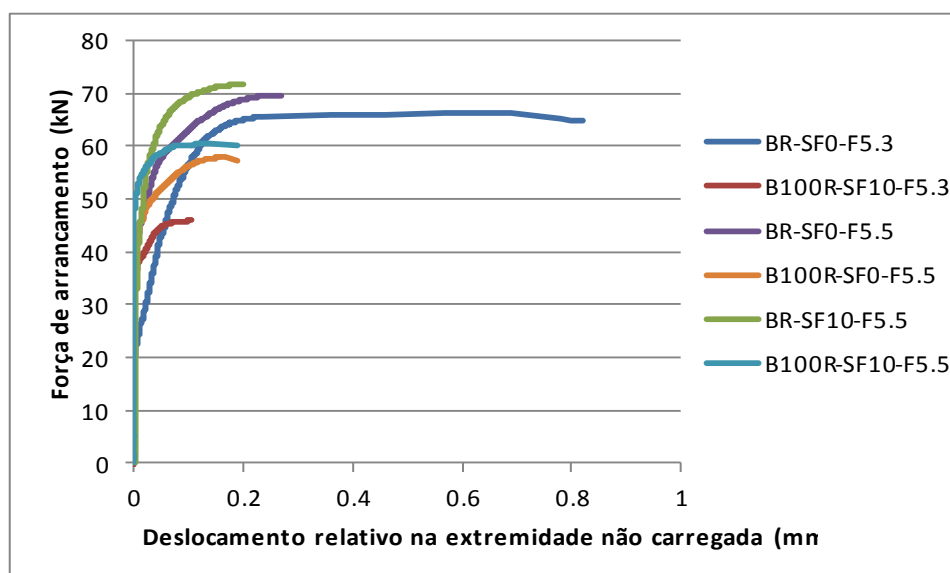


Figura 3 - Diagramas P-AL dos diversos betões

Refira-se que este tipo de rotura não permite quantificar a capacidade máxima de aderência dos betões, dificultando a sua comparação. Contudo, os resultados obtidos permitem avaliar o comportamento dos betões para situações em que o confinamento é reduzido.

Através da observação da Figura 4, constata-se que, durante a rotura, as nervuras foram mobilizadas na sua totalidade. Observa-se também a presença de betão esmagado na zona envolvente. Esta situação, que é comum aos betões de referência e aos betões com agregados reciclados, parece indicar que existe uma distribuição aproximadamente uniforme das tensões de aderência.

Assim, dado o tipo de rotura ocorrido, a tensão máxima de aderência foi condicio-

nada pela resistência à tracção dos betões. De facto, na Figura 5, verifica-se uma excelente correlação entre estas duas propriedades ($R^2 = 0,88$). Conclusões idênticas foram obtidas no trabalho realizado por Gjorv et al. (1990), para betões correntes.

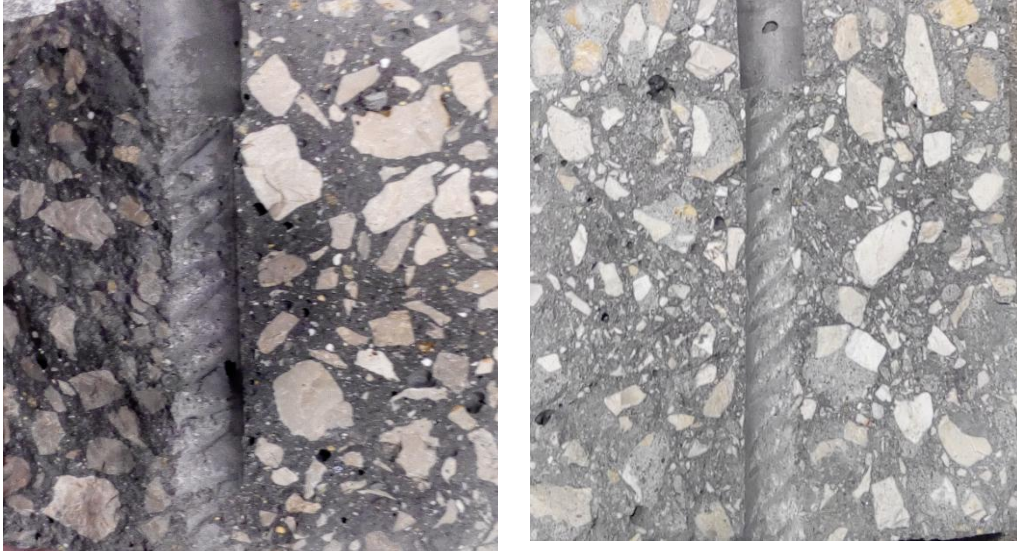


Figura 4 - Rotura por splitting

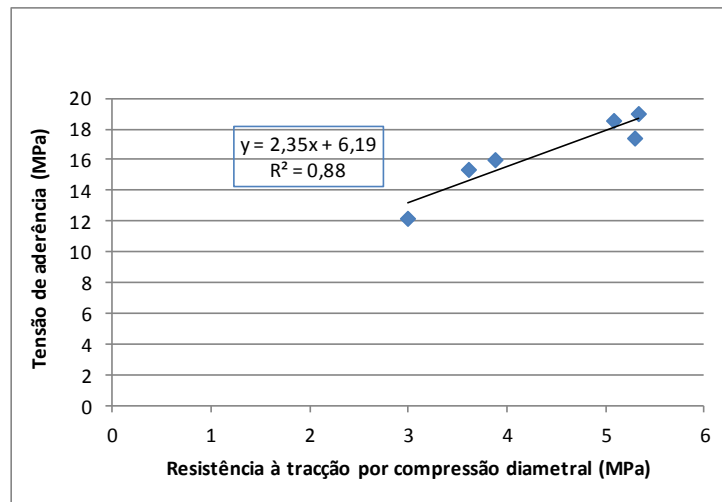


Figura 5 - Relação entre a tensão de aderência e a resistência à tracção por compressão diametral

Deste modo, verifica-se que os BAR apresentam, em relação aos BR, piores desempenhos, justificados pela sua menor resistência à tracção por compressão diametral. São visíveis diminuições de tensão de aderência de cerca de 15 e 30%, para os betões com agregados reciclados das tarefas 5.5 e 5.3, respectivamente. Nestes betões, a propagação de fendas parece ser acelerada, verificando-se também menores deslocamentos relativos.

Em Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002), betões reciclados de elevado desempenho evidenciaram reduções de tensão de aderência de cerca de 10%.

As maiores variações registadas nas amassaduras da tarefa 5.3 podem dever-se à sílica

de fumo que, nessa tarefa, mostrou ter um contributo negativo. Por outro lado, nas amassaduras da tarefa 5.5, a introdução de SF parece não influenciar o desempenho dos betões. As diferenças devidas à sua presença não ultrapassam 4%, quer nos BR quer nos BAR.

5.2. Propriedades em termos de durabilidade

Neste subcapítulo, é avaliada a propriedade de permeabilidade ao oxigénio das amassaduras seleccionadas.

5.2.1. Permeabilidade ao oxigénio

Este ensaio foi realizado com base na especificação LNEC E-392 (1993) aos 91 dias. Na Tabela 8, são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 8 - Resultados do ensaio de permeabilidade ao oxigénio aos 91 dias

	Amassaduras	Permeabilidade ao oxigénio K_m (m ²)	$\Delta_{\text{betão}}$ (%)	D.P (MPa)
F5.3	BR-SF0-F5.3	9,92E-17	0	1,3E-17
	B100R-SF10-F5.3	4,17E-16	320,5	5,9E-17
SF0-F5.5	BR-SF0-F5.5	5,24E-17	0,0	1,9E-18
	B100R-SF0-F5.5	3,05E-16	481,5	1,9E-17
SF10-F5.5	BR-SF10-F5.5	3,99E-17	0,0	2,8E-17
	B100R-SF10-F5.5	2,34E-16	486,8	2,0E-17

Através da observação da tabela, constata-se que a permeabilidade ao oxigénio é significativamente influenciada pela substituição de agregados naturais por agregados reciclados, para humidades relativas das amassaduras entre 2,2 e 3,8%. Os betões de referência registaram o menor coeficiente de permeabilidade, apresentando valores de $3,99 \times 10^{-17}$ a $9,92 \times 10^{-17}$ m². No que respeita aos betões com agregados reciclados, foram registados valores de $2,34 \times 10^{-16}$ a $4,17 \times 10^{-16}$. Deste modo, verifica-se que a permeabilidade dos BAR foi entre quatro e seis vezes superior à obtida pelos BR. Estes resultados podem ser explicados pela argamassa aderida aos agregados reciclados que confere aos BAR uma natureza mais permeável. Além disso, a presença de fissuras nesta argamassa contribui para a maior conectividade da estrutura, facilitando a passagem de fluidos. Os resultados estão de acordo com os de Lofti et al. (2015), onde os BAR evidenciaram coeficientes de permeabilidade cerca de quatro vezes superiores aos obtidos pelos betões de referência.

Analisando a Tabela 8, verifica-se também, como era expectável, que a composição da amassadura influencia a permeabilidade. De facto, as amassaduras da tarefa 5.3, produzidas com menores quantidades de cimento e maiores relações a/l, apresentaram os coeficientes de permeabilidade mais elevados, devido à menor qualidade da sua matriz cimentícia.

Quanto à incorporação de sílica de fumo, verifica-se que, na tarefa 5.5, a sua presença é responsável por diminuir os coeficientes em cerca de 25% (tanto em BR como em BAR). Esta realidade poderá ser justificada pelo facto de este material conseguir tornar a pasta mais densa e homogénea, através de reacções pozolânicas com o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento. Paralelamente, as amassaduras poderão beneficiar da reduzida dimensão da sílica de fumo que permitirá ocupar os espaços vazios que surgem entre as partículas, originando um aumento da compacidade da amassadura.

5.3. Propriedades reológicas

Neste subcapítulo, são avaliadas as propriedades de retracção e fluência das amassaduras seleccionadas.

5.3.1. Retracção

O ensaio de determinação da deformação por retracção foi realizado através da especificação LNEC E-398 (1993), durante 91 dias. Na Figura 6, são apresentados os resultados obtidos.

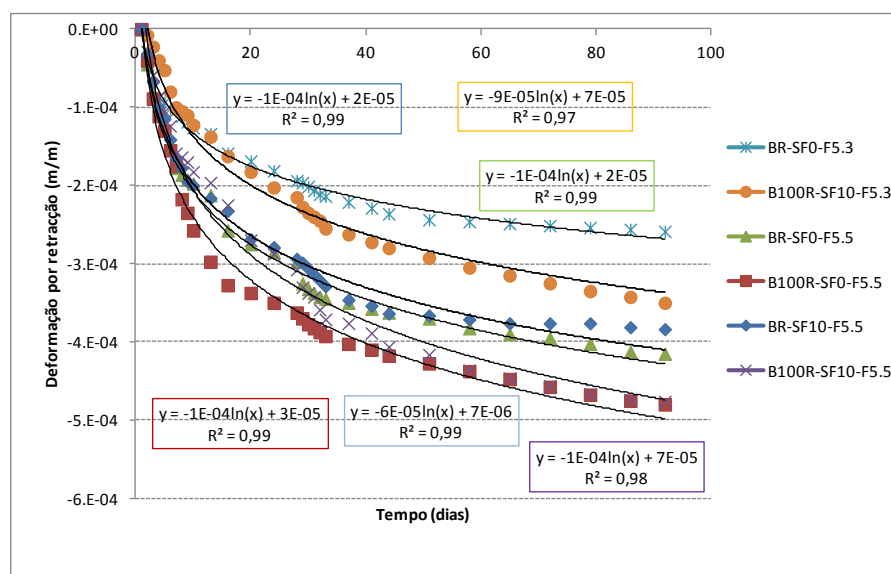


Figura 6 - Deformações devido a retracção ao longo do tempo

Através da análise da figura, verifica-se para todos os betões que a deformação aumenta ao longo do tempo, de forma não-linear. Observa-se um rápido crescimento durante os primeiros dias, que posteriormente tende a estabilizar. A utilização de regressões logarítmicas permitiu obter coeficientes de correlação (R^2) bastante elevados (entre 0,97 e 0,99).

Nas Tabelas 9 e 10, são apresentados os valores da deformação por retracção, para as idades de 7 e 91 dias.

Para idades jovens (7 dias), os betões com agregados reciclados apresentaram deformações praticamente idênticas ao BR, enquanto para idades mais avançadas (91 dias) registaram aumentos de deformação entre 15,7 e 35,3%.

Tabela 9 - Deformações por retracção aos 7 dias, para os diversos betões

	Amassaduras	Retracção (m/m)	$\Delta_{\text{betão}}(\%)$
F5.3	BR-SF0-F5.3	-1,04E-04	0,0
	B100R-SF10-F5.3	-1,00E-04	-3,6
SF0-F5.5	BR-SF0-F5.5	-1,78E-04	0,0
	B100R-SF0-F5.5	-1,75E-04	-1,4
SF10-F5.5	BR-SF10-F5.5	-1,65E-04	0,0
	B100R-SF10-F5.5	-1,59E-04	-3,8

Tabela 10 - Deformações por retracção aos 91 dias, para os diversos betões

	Amassaduras	Retracção (m/m)	$\Delta_{\text{betão}}(\%)$
F5.3	BR-SF0-F5.3	-2,59E-04	0,0
	B100R-SF10-F5.3	-3,50E-04	35,3
SF0-F5.5	BR-SF0-F5.5	-4,15E-04	0,0
	B100R-SF0-F5.5	-4,80E-04	15,7
SF10-F5.5	BR-SF10-F5.5	-3,84E-04	0,0
	B100R-SF10-F5.5	-4,76E-04	24,1

As maiores variações aos 91 dias são justificadas pelo fenómeno de cura interna desencadeado pelos AR que permite para idades jovens a compensação da água de evaporação através da água existente nos mesmos. Deste modo, enquanto houver disponibilidade de água no agregado reciclado, as variações dimensionais são reduzidas.

No estudo realizado por Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002), observa-se que betões com agregados reciclados de elevado desempenho apresentaram, em idades avançadas, aumentos de retracção de 35-45%, intervalo próximo do obtido no presente trabalho.

No que respeita aos betões da tarefa 5.5, verifica-se que a incorporação de sílica de fumo conduz a amassaduras com menores valores de retracção, registando-se aumentos de desempenho de 1-8%. Os resultados estão de acordo com os obtidos por Kojima et

al. (2001), onde a SF apresentou uma influência reduzida na retracção total.

5.3.2. Fluência

O ensaio de determinação da fluência foi realizado segundo a especificação LNEC E-399 (1993). Os provetes de betão foram colocados em carga aos 28 dias de idade, durante 91 dias. Na Figura 7, são apresentados os resultados obtidos.

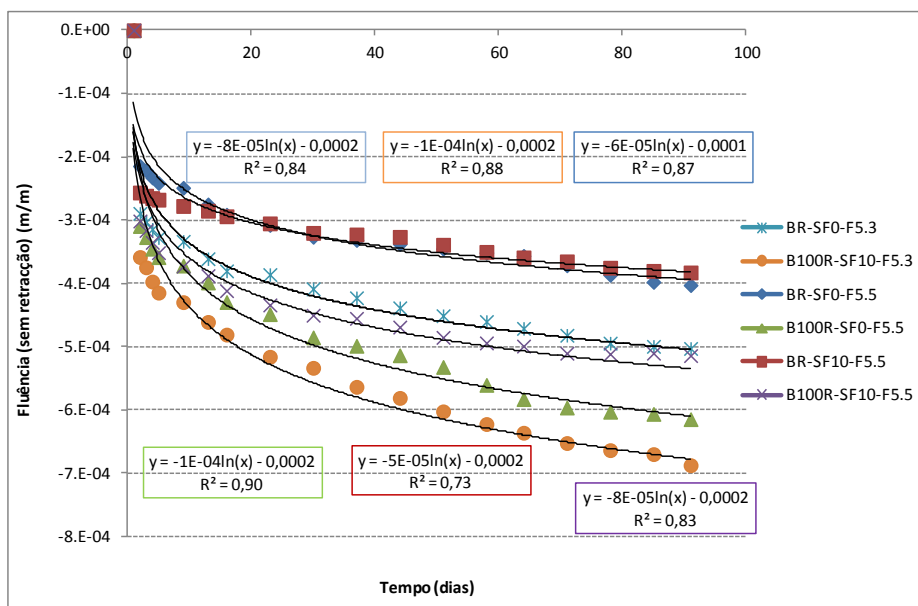


Figura 7 - Resultados do ensaio de fluência dos betões

De forma idêntica à retracção, a fluência aumenta ao longo do tempo de forma não linear. A utilização de regressões logarítmicas conduziu novamente a coeficientes de correlação (R^2) elevados (entre 0,71 e 0,90).

Os resultados indicam também uma perda de desempenho com a incorporação de agregados reciclados (Figura 7 e Tabela 11).

Tabela 11 - Deformações por fluência aos 91 dias, para os diversos betões

	Amassaduras	Fluência sem retracção (m/m)	$\Delta_{\text{betão}}(\%)$
F5.3	BR-SF0-F5.3	-5,08E-04	0,0
	B100R-SF10-F5.3	-7,01E-04	38,1
SF0-F5.5	BR-SF0-F5.5	-4,03E-04	0,0
	B100R-SF0-F5.5	-6,26E-04	55,5
SF10-F5.5	BR-SF10-F5.5	-3,85E-04	0,0
	B100R-SF10-F5.5	-5,15E-04	33,8

Aos 91 dias, os betões reciclados apresentam aumentos de fluência, em relação aos

BR, de cerca de 38-55%. Em Limbachiya et al. (2000), registaram-se aumentos semelhantes (30-65%), para incorporação de 100% de agregados grossos reciclados. Na investigação conduzida por Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002), obteve-se resultados inesperados. Foram observadas diminuições de cerca de 20%, em relação ao BR, quando os AR substituíram na íntegra os agregados naturais.

Através da observação da Tabela 11, constata-se ainda que a fluência diminui com o aumento da resistência à compressão na idade do carregamento. Esta situação é válida tanto para os BR como para os BAR.

Quanto à influência da SF, verifica-se que a sua presença teve pouca influência nos betões de referência da tarefa 5.5 (variações inferiores a 6%). No entanto, nos betões com agregados reciclados proporcionou aumentos de desempenho de cerca de 18%.

5.4. Análise microscópica de betões

A análise microscópica dos betões procurou analisar a microestrutura dos BAR, comparando-a com os betões de referência.

5.4.1. Microscopia electrónica de varrimento (MEV)

A análise de microscopia electrónica de varrimento foi realizada a um conjunto mais alargado de betões. Deste modo, considerou-se não só as amassaduras anteriores como também as pertencentes à tarefa 2 (onde se tinha procurado a avaliar a influência do processo de trituração dos AR e capacidade de se produzirem betões com um desempenho pré-estabelecido). Considerou-se ainda uma série adicional de betões das tarefas 5.3 e 5.5. De notar que a recolha das amostras foi efectuada por impacto através da utilização de um martelo e procurou assegurar a maior representatividade possível. A análise à microestrutura da matriz e da interface com os agregados foi feita em modo de electrões secundários.

Relativamente à terminologia adoptada para os betões da tarefa 2, os BR das resistências alvo 20, 45 e 65 MPa, utilizando agregados naturais triturados primariamente foram designados da seguinte forma: BR-20-TP; BR-45-TP e BR-65-TP. Os BAR com AR provenientes da pré-fabricação (PF) foram denominados por: BAR-PF20-TP; BAR-PF45-TP; BAR-PF65-TP. Para o processo de trituração TS, foi utilizada uma terminologia idêntica.

5.4.1.1. Betões de referência da tarefa 2

Analisando as imagens obtidas por emissão de electrões secundários, verifica-se um aparente desenvolvimento das linhas de roturas através da interface entre o agregado natural e a argamassa de cimento como pela própria argamassa (Figura 8-a).

As amostras fracturadas mostram uma compacidade adequada à sua idade (cerca de 2 anos) e à sua relação água/cimento (0,81-0,86), notando-se a presença de macro-poros na pasta cimentícia (Figura 8-b).

Relativamente à estrutura cristalina dos betões, verifica-se a existência de formações de C-S-H e de cristais de CH (Figuras 8-c e 8-d).

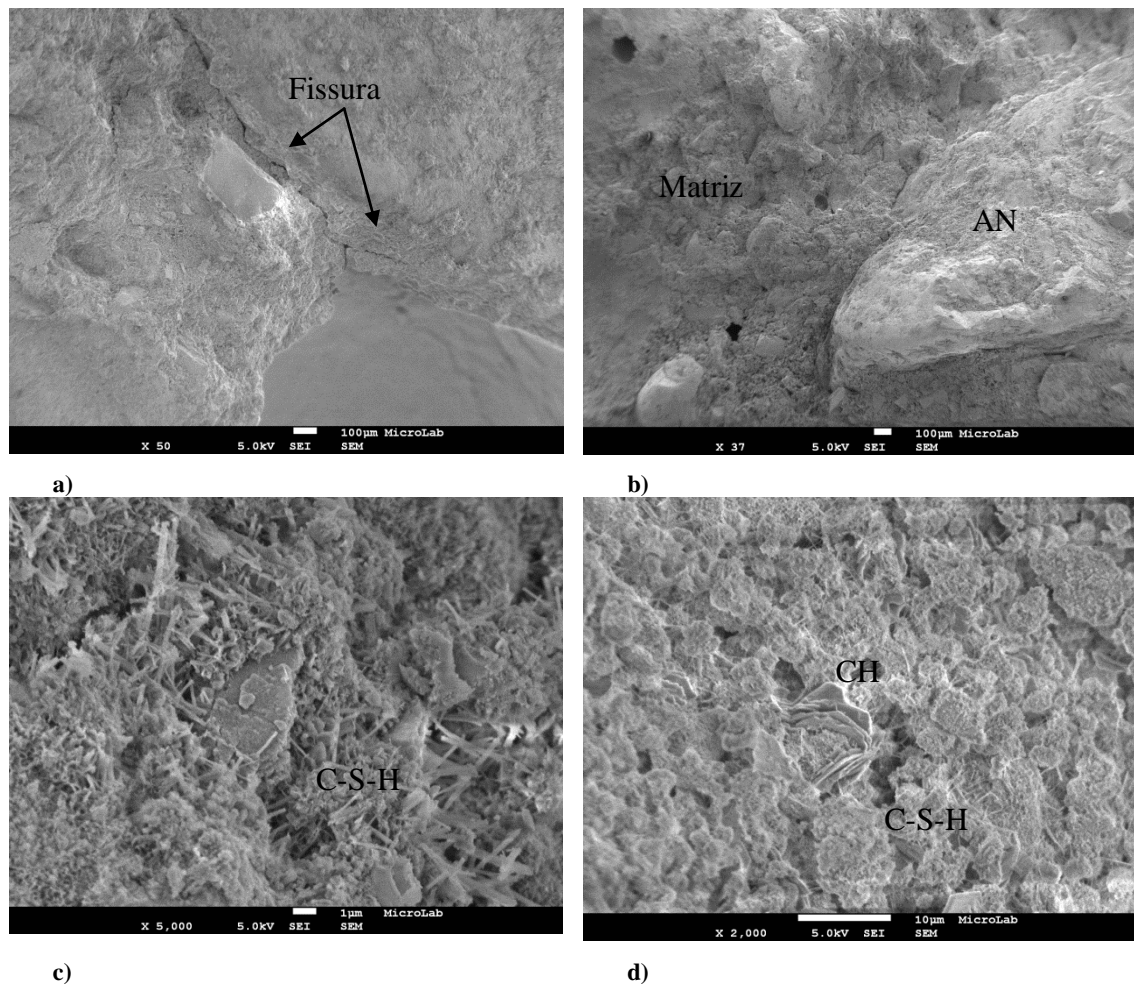


Figura 8 - MEV dos BR com resistência alvo 20 MPa da tarefa 2 (a, c: BR-20-TP; b, d: BR-20-TS)

No que respeita aos betões BR-45-TP (Figura 9), as linhas de rotura encontram-se aparentemente localizadas entre os agregados naturais e a matriz.

Apesar disso, as pastas continuam a apresentar uma quantidade significativa de macroporos, com dimensões apreciáveis, da ordem de 100 μm (Figura 9-a). São também visíveis formações de C-S-H (Figura 9-b).

Finalmente, os betões de referência BR-65-TS (Figura 10) mostram uma maior compactidade das matrizes.

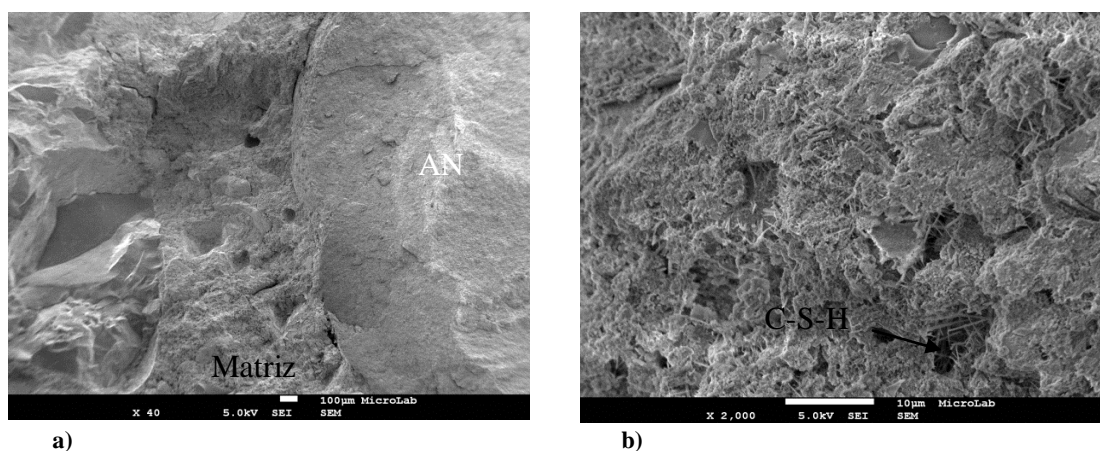


Figura 9 - MEV dos BR com resistência alvo 45 MPa da tarefa 2 (a, b: BR-45-TP)

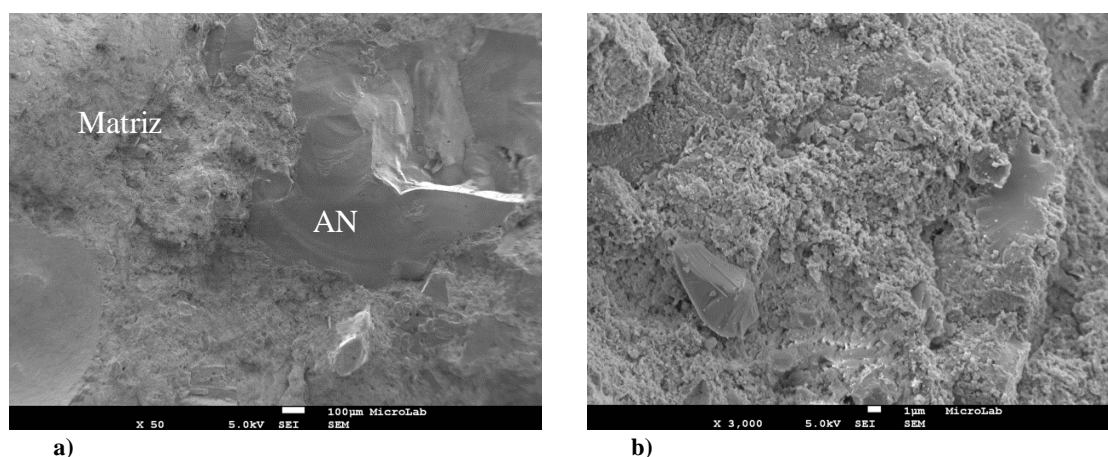


Figura 10 - MEV dos BR com resistência alvo 65 MPa da tarefa 2 (a, b: BR-65-TS)

Nestas amostras, a dimensão dos poros parece ser substancialmente menor. A estrutura cristalina apresenta-se muito amorfa (decorrente da idade dos betões desta fase, cerca de dois anos), sendo difícil a distinção entre fases cristalinas.

Não aparenta existir um número tão significativo de linhas de rotura como nas famílias anteriores (Figura 10-a). Além disso, as superfícies de rotura das amostras atravessam os agregados, contrariamente ao observado nos betões mais fracos, em que rodeavam a superfície dos AN (Figura 10-a).

5.4.1.2. Betões reciclados da tarefa 2

A análise das fotografias obtidas mostra que a morfologia dos betões com AR é comparável às dos BR (Figuras 11, 12 e 13). No entanto, é possível observar algumas

alterações causadas pela introdução de agregados reciclados.

Por exemplo, nos betões BAR-PF20-TP e BAR-PF20-TS, os agregados reciclados incluem cenosferas de cinzas volantes. Devido a esta particularidade, é possível fazer uma distinção clara entre a nova argamassa e a que se encontra aderida aos AR (Figura 11-b).

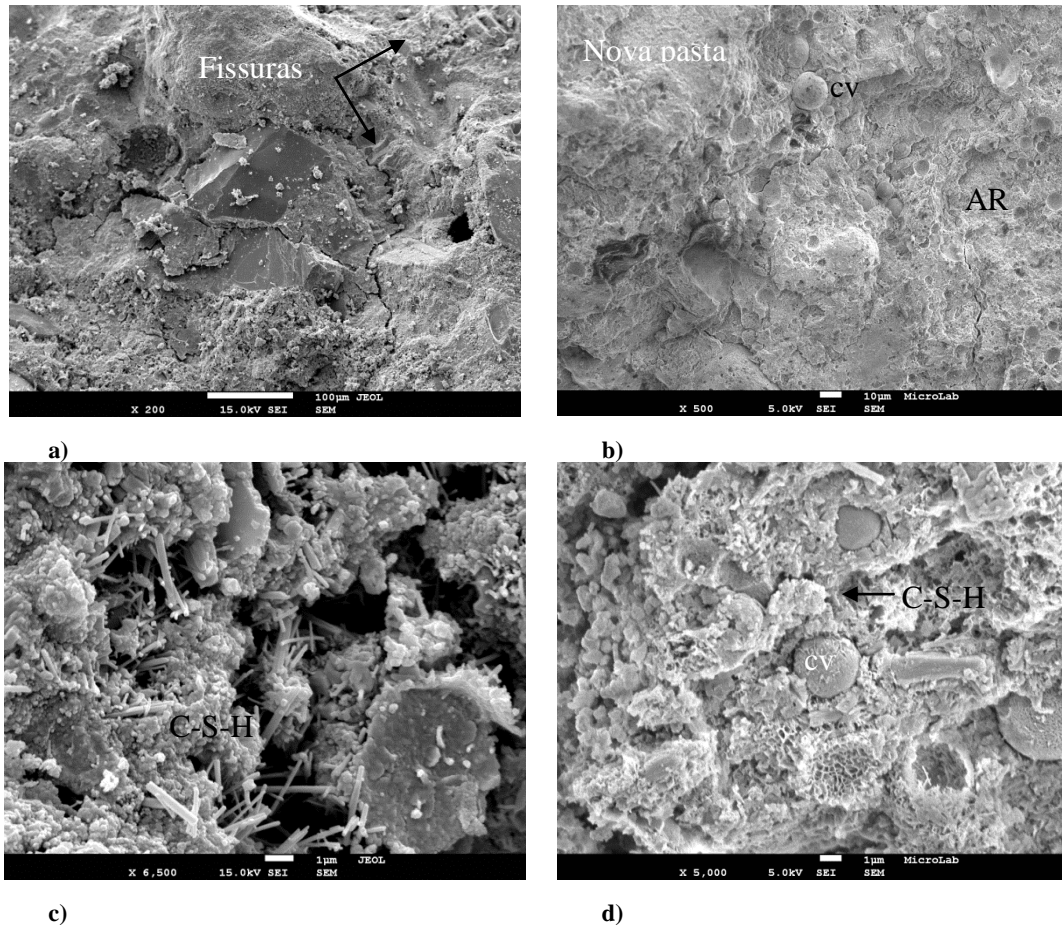


Figura 11 - MEV dos BAR com resistência alvo 20 MPa da tarefa 2 (a, c: BAR-PF20-TP; b, d: BAR-PF20-TS)

Ainda em relação aos AR, verifica-se que estes se encontram perfeitamente envolvidos por novos produtos de hidratação (C-S-H), demonstrando boa afinidade mecânica e química entre as duas fases.

As superfícies de rotura continuam a rodear os agregados, de forma idêntica aos betões de referência de 20 MPa.

Por seu turno, os betões BAR-PF45-TP e BAR-PF45-TS (Figura 12) são constituídos por agregados reciclados que não incorporam cinzas volantes na sua constituição.

Deste modo, a distinção entre as matrizes de novos produtos de hidratação e as existentes na fase de argamassa dos AR é dificultada, uma vez que as duas apresentam compacidades similares.

Apesar disso, através da análise das Figura 12-d, constata-se uma deposição de cristais de hidratação do cimento (C-S-H) sobre as partículas de agregados reciclados, identificáveis, uma vez que possuem uma estrutura morfológica mais amorfa.

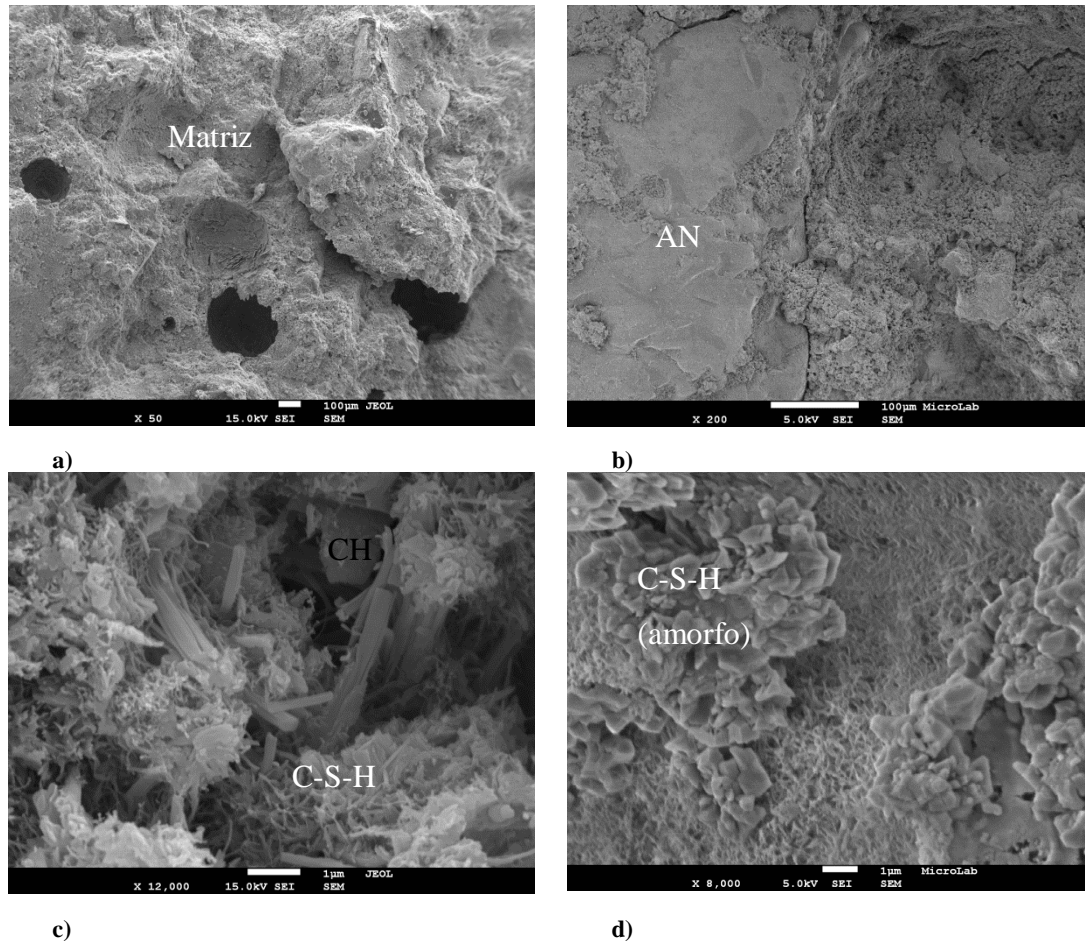


Figura 12 - MEV dos BAR com resistência alvo 45 MPa da tarefa 2 (a, c: BAR-PF45-TP; b, d: BAR-PF45-TS)

Por último, analisando a Figura 13, verifica-se que os betões reciclados BAR-PF65-TP e BAR-PF65-TS apresentam matrizes cimentícias mais compactas do que os BAR anteriores. Situação idêntica ocorre também nas zonas de transição entre os AGR e a matriz, observando-se uma maior compactidade. É notória a diminuição da quantidade de poros bem como do número de fissuras. Os agregados reciclados não evidenciam a presença de cinzas volantes.

A estrutura cristalina apresenta-se muito amorfa, seguindo as mesmas tendências dos betões de referência BR-65-TS.

Apesar da idade das amostras, para escalas de ampliação superiores foi visível a presença de formações de etringite (Figura 12-c).

Por último, salienta-se que, para as diversas resistências alvo, não foram visíveis diferenças devidas ao processo de trituração.

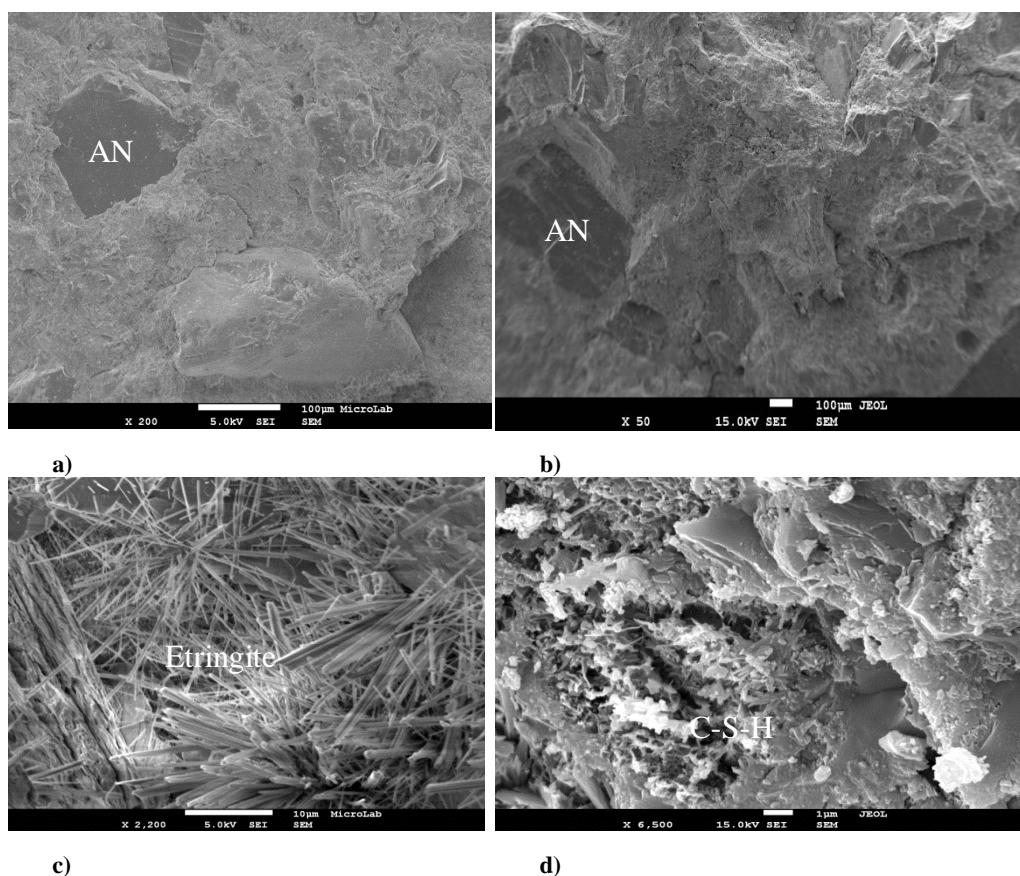


Figura 13 - MEV dos BAR com resistência alvo 65 MPa da tarefa 2 (a, c: BAR-PF65-TP; b, d: BAR-PF65-TS)

5.4.1.3. Betões de referência da tarefa 5.3

Nesta tarefa, ao contrário da anterior, foram incorporadas cinzas e sílica de fumo como materiais substitutos do cimento, tendo as amostras aproximadamente um ano de idade. Deste modo, não é de estranhar a presença significativa de cenosferas de cinzas volantes ao longo da matriz dos BR, a qual apresenta um aspecto compacto mas bastante heterogéneo. Esta realidade é ainda mais evidente nas amassaduras contendo SF (Figura 14).

As causas para esta heterogeneidade podem estar relacionadas com o método de mistura adoptado. A betoneira utilizada (eixo variável), a ordem de entrada dos constituintes e os seus tempos de mistura podem não ter sido os mais indicados. De facto, durante a produção das amassaduras, foram observadas dificuldades de dispersão dos constituintes do ligante, nomeadamente da sílica de fumo.

5.4.1.1. Betões reciclados da tarefa 5.3

Como era expectável, os betões reciclados apresentam novamente uma morfologia semelhante às dos betões de referência. Tal como nos BR, verifica-se a existência de cenosferas e matrizes cimentícias heterogêneas, principalmente nas amassaduras com sílica de fumo (Figura 15). Nas Figuras 15-c e 15-d, é nítida a fraca envolvência entre a SF e o restante material ligante.

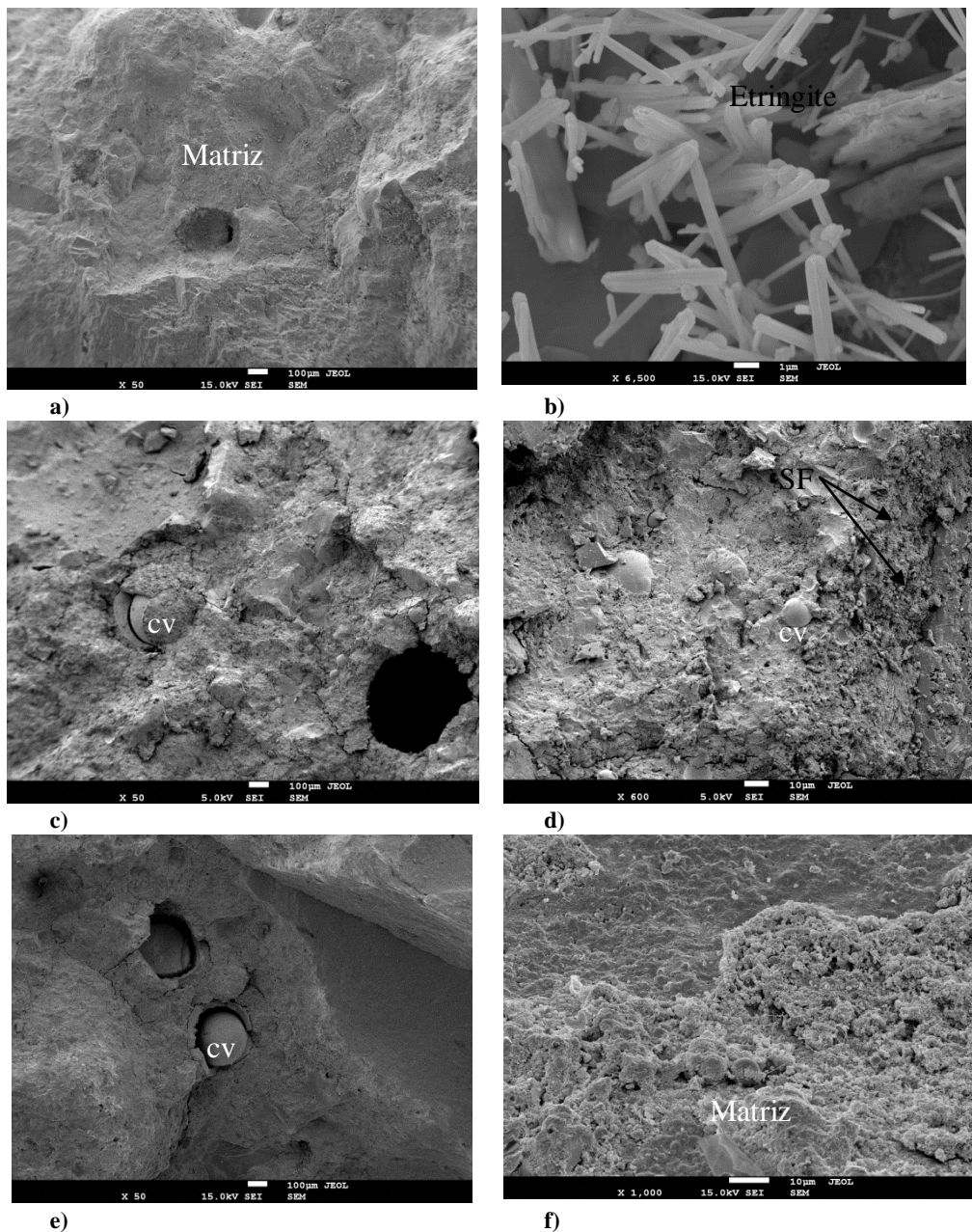


Figura 14 - MEV dos BR da tarefa 5.3 (a, b: BR-SF0-F5.3; c, d: BR-SF5-F5.3; e, f: BR-SF10-F5.3)

Nas imagens recolhidas, verifica-se ainda que os BAR apresentam maiores quantidades de poros, que poderão decorrer da libertação de ar ocluso nos agregados finos reciclados. As zonas de transição entre os agregados e a matriz aparentam ser menos compactas do que no caso dos BR.

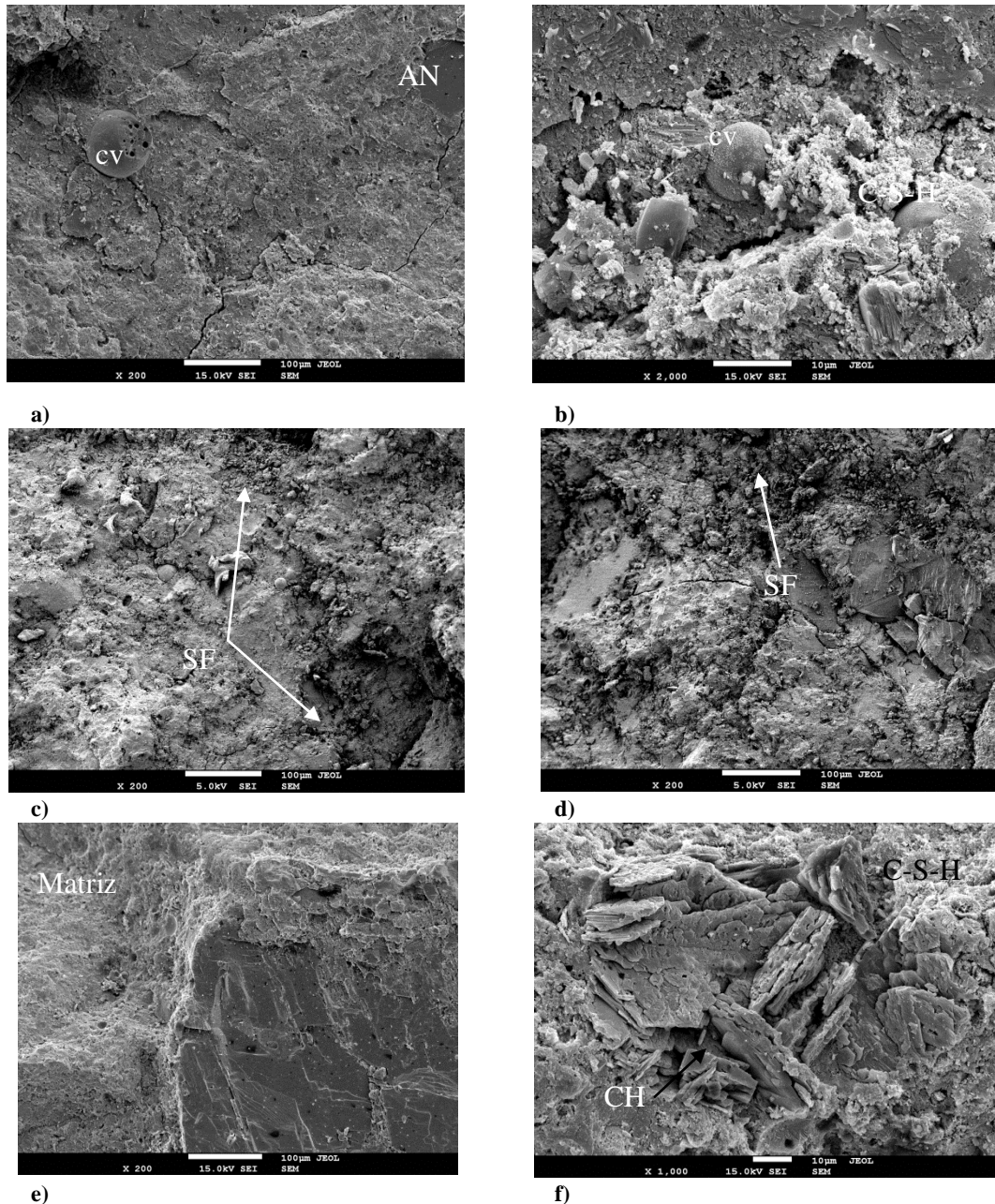


Figura 15 - MEV dos BAR da tarefa 5.3 (a, b: B100R-SF0-F5.3; c, d: B100R-SF5-F5.3; e, f: B100R-SF10-F5.3)

5.4.1.2. Betões de referência da tarefa 5.5

Os betões da tarefa 5.5 (Figura 16) foram produzidos com o objectivo de otimizar as resistências mecânicas alcançadas na tarefa 5.3. Neste sentido, procurou-se, entre outros aspectos, dar resposta às dificuldades de mistura ocorridas anteriormente. A

solução para o problema de mistura consistiu na utilização de uma betoneira de eixo vertical e na adopção de um novo procedimento.

As imagens recolhidas através de electrões de 2ª ordem mostram que as modificações efectuadas melhoram a qualidade da matriz cimentícia dos BR, tornando-a muito mais homogénea (Figura 16). As dificuldades de dispersão da sílica parecem ter sido resolvidas (Figuras 16-a e 16-e).

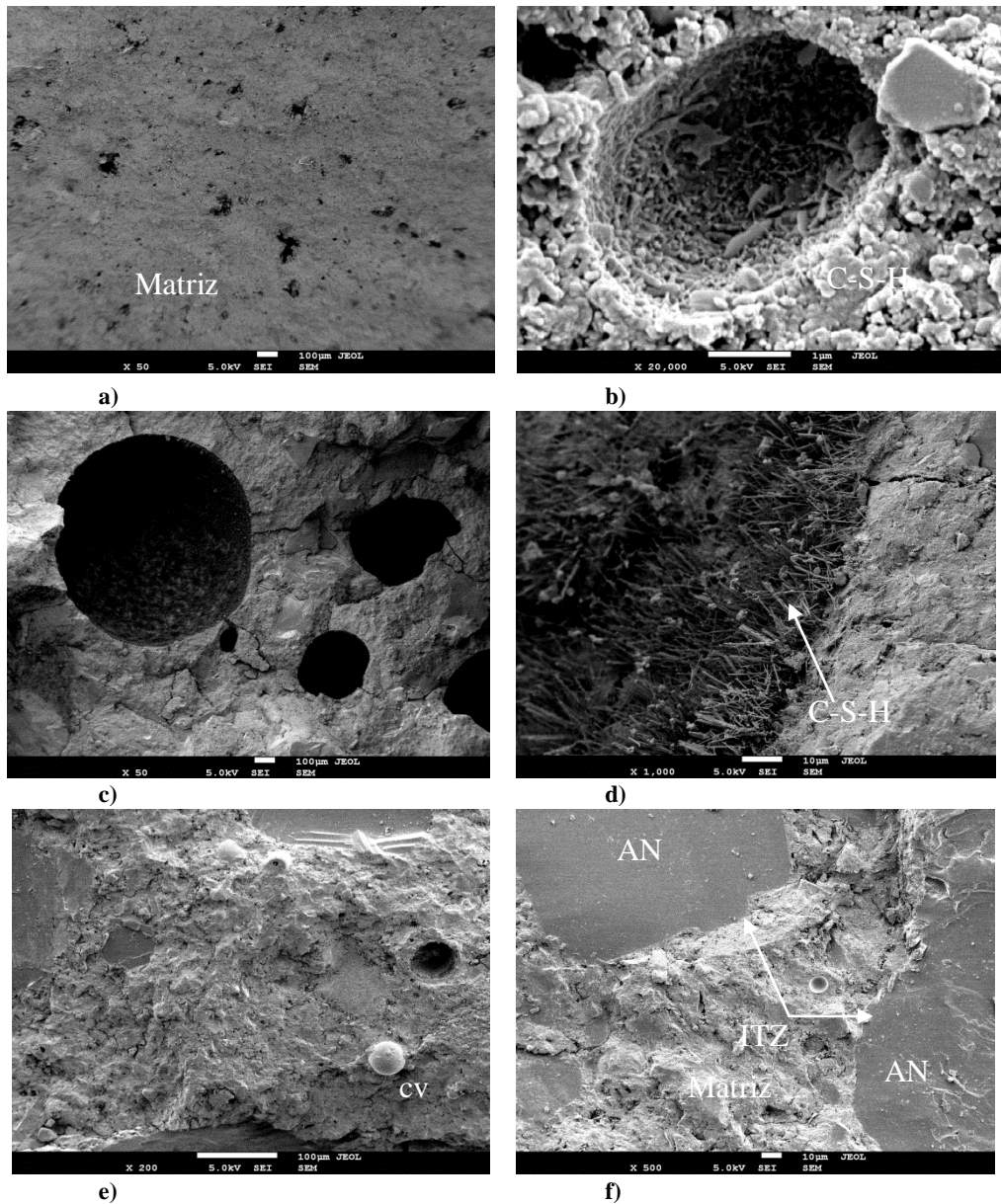


Figura 16 - MEV dos BR da tarefa 5.5 (a, b: BR-SF0-F5.5; c, d: BR-SF5-F5.5; e, f: BR-SF10-F5.5)

A presença de cenosferas continua a ser uma característica dos betões devido às cinzas volantes introduzidas nas amassaduras. No entanto, nota-se a existência de um número considerável de poros na nova pasta, os quais se encontram completamente

preenchidos com produtos de hidratação. Estes poros podem ser resultado de cinzas não hidratadas que se soltaram na preparação das amostras.

5.4.1.1. Betões reciclados da tarefa 5.5

No que respeita aos betões com agregados reciclados, verifica-se que existe uma tendência idêntica aos betões de referência, ou seja, uma matriz compacta e uma boa ligação na interface pasta agregado (Figura 17).

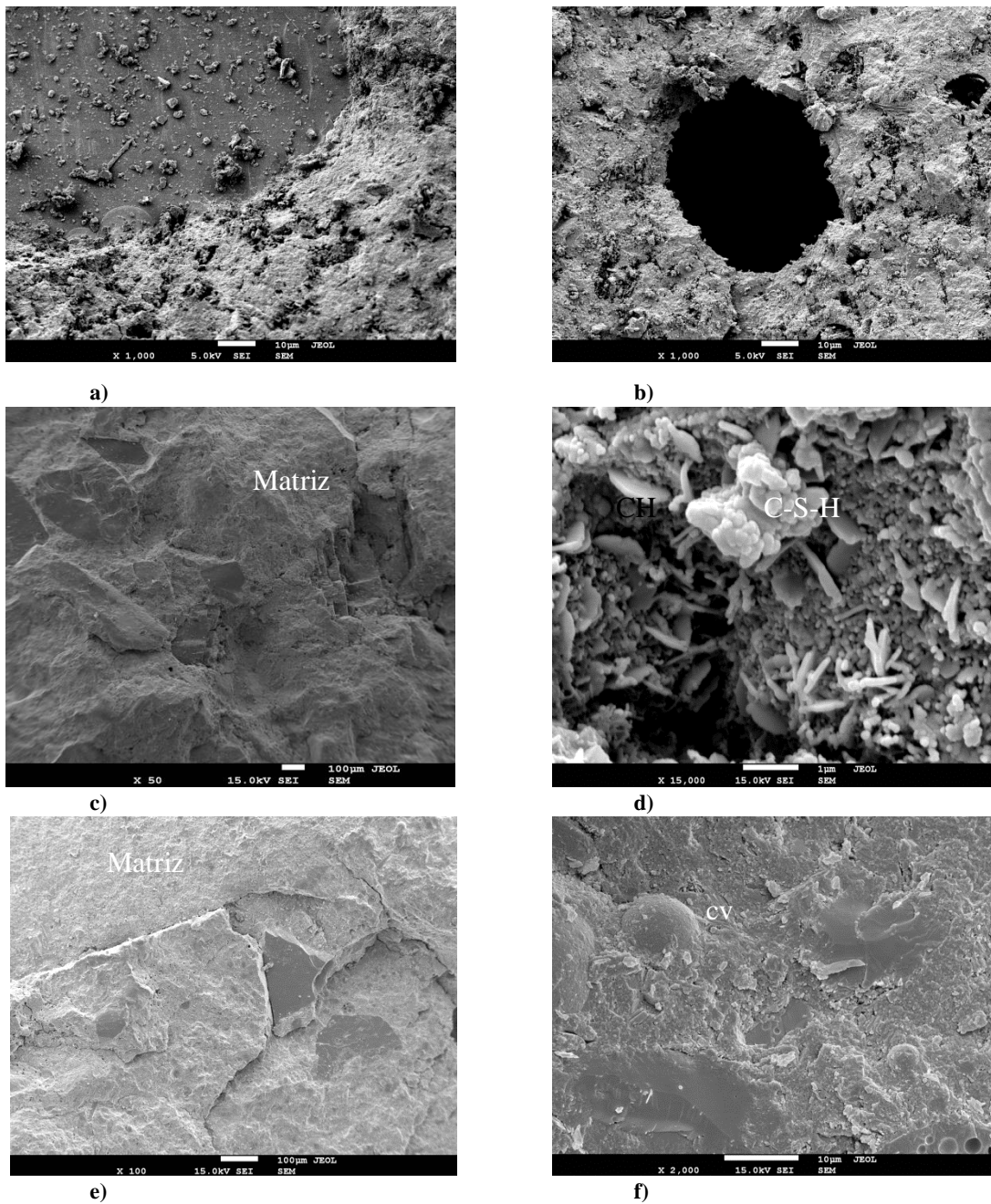


Figura 17 - MEV dos BAR da tarefa 5.5 (a, b: B100R-SF0-F5.5; c, d: B100R-SF5-F5.5; e, f: B100R-SF10-F5.5)

As cenosferas de cinzas volantes, as depressões na nova pasta e uma estrutura muito amorfa mantêm-se como aspectos típicos destes betões.

6. Considerações finais

O presente relatório procurou analisar os resultados experimentais, decorrentes da realização da tarefa 5.7.

Nesta fase, foi efectuada uma caracterização adicional de algumas amassaduras de elevado desempenho produzidas em etapas anteriores (tarefas 5.3 e 5.5). A escolha das amassaduras pretendeu complementar o conhecimento existente sobre os efeitos da incorporação de sílica de fumo e de agregados reciclados em BED.

Segundo os pressupostos referidos, foram seleccionadas duas amassaduras da tarefa 5.3 e quatro da tarefa 5.5. As composições das amassaduras permaneceram idênticas, sendo utilizados os mesmos materiais. Os resultados obtidos no estado fresco, nomeadamente no ensaio de abaixamento e de massa volúmica, mostraram valores e tendências idênticas às observadas nas tarefas anteriores. Esta situação repetiu-se na propriedade de resistência à compressão, mostrando que a reprodução das amassaduras seleccionadas foi realizada com sucesso.

Relativamente à caracterização adicional, o ensaio de aderência aço-betão mostrou que a rotura dos provetes ocorreu por *splitting*, sendo a tensão máxima de aderência condicionada pela resistência à tracção dos betões. Além disso, foram registadas reduções de tensão de aderência, em relação aos BR, de cerca de 15 e 30%, para os BAR das tarefas 5.5 e 5.3, respectivamente. As maiores variações da tarefa 5.3 são explicadas não só pela incorporação dos agregados reciclados mas também pela introdução de sílica de fumo, que já tinha exibido um comportamento negativo no primeiro conjunto de testes. Nesta tarefa, não foi possível dissociar estes dois efeitos, devido à limitação do número de amassaduras. Quanto à influência de SF nas amassaduras da tarefa 5.5, as variações devidas à sua presença não ultrapassaram 4%, quer nos BR quer nos BAR.

Na propriedade de permeabilidade ao oxigénio, verificou-se que os betões reciclados apresentaram desempenhos entre quatro e seis vezes inferiores aos obtidos pelos BR. No que respeita à introdução da sílica de fumo, observou-se, nos betões de referência e nos BAR da tarefa 5.5, diminuições dos coeficientes de permeabilidade de cerca de 25%.

Na avaliação realizada à reologia dos betões, constatou-se que a retracção dos BAR, em idades jovens, foi praticamente idêntica à dos BR. Contudo, em idades avançadas,

os BAR das tarefas 5.5 e 5.3 registaram aumentos de deformação de 15,7-24,1 e 35,3%, respectivamente. Ainda nos betões da tarefa 5.5, verifica-se que a incorporação de sílica de fumo conduziu a amassaduras com menores valores de retracção, registando-se aumentos ligeiros de desempenho de 1-8%.

De igual modo, na propriedade de fluência, os BAR registaram aumentos de deformação, em relação aos BR, de cerca 38-55%. No que respeita à adição de SF (tarefa 5.5), verificou-se que a sua presença teve pouca influência nos betões de referência, com variações inferiores a 6%. No entanto, nos betões com agregados reciclados, proporcionou aumentos de desempenho de cerca de 18%.

Na análise microscópica, concluiu-se que os betões da tarefa 5.3, apesar de terem apresentado um aspecto compacto, exibiram uma maior heterogeneidade comparativamente aos betões da tarefa 5.5. Esta situação poderá estar relacionada com o método de mistura adoptado. A betoneira utilizada (eixo variável), a ordem de entrada dos constituintes e os seus tempos de mistura podem não ter sido os mais indicados. Estes resultados estão em consonância com as dificuldades de dispersão de sílica de fumo, registadas na tarefa 5.3. Quanto aos betões da tarefa 2, também analisados nesta propriedade, verificou-se não existir diferenças motivadas pela utilização de diferentes métodos de trituração.

Finalmente, nas Tabelas 12 e 13, é apresentado um resumo dos resultados obtidos, em que um sinal negativo corresponde a uma perda de desempenho.

Tabela 12 - Variação das diversas propriedades com a utilização de AR

Propriedades	Perda de desempenho dos BAR em relação ao BR		
	B100R-SF10-F5.3*	B100R-SF0-F5.5	B100R-SF10-F5.5
Resistência à compressão cubos (aos 28 dias)	-25,9 %	-3,8 %	-4,5 %
Aderência aço-betão (aos 91 dias)	-30,6 %	-17,1 %	-15,8 %
Permeabilidade ao oxigénio (aos 91 dias)	-320,5 %	-481,5 %	-486,8 %
Retracção (aos 91 dias)	-35,3 %	-15,7 %	-24,1 %
Fluência (aos 91 dias)	-38,1 %	-55,5 %	-33,8 %

* Na tarefa 5.3, os efeitos da incorporação de agregados reciclados e de sílica de fumo foram analisados em simultâneo.

Tabela 13 - Variação das diversas propriedades com a utilização de SF

	Perda de desempenho dos betões com 10% SF em relação aos betões com 0% SF	
	BR-SF10-F5.5	B100R-SF10-F5.5
Resistência à compressão cubos (aos 28 dias)	+9,3 %	+8,4 %
Aderência aço-betão (aos 91 dias)	+2,1 %	+3,8 %
Permeabilidade ao oxigénio (aos 91 dias)	+23,9 %	+23,3 %
Retracção (aos 91 dias)	+7,5 %	+1,0 %
Fluência (aos 91 dias)	+4,5 %	+17,8 %

7. Bibliografia

- Abbas, A.; Carcasses, M.; Ollivier, J.P.** - Gas permeability of concrete in relation to its degree of saturation. *Materials and Structures*. Vol. 32. 1999. pp. 3-8.
- ACI 363R-92** - State-of-the-art report on high-strength concrete. ACI Committee 363 Report. American Concrete Institute. Detroit. 1997.
- Aïtcin, P.C.; Neville, A.M.; Acker, P.** - Integrated view of shrinkage deformation. *ACI Materials Journal*. Vol. 19. N.º 9. 1997. pp. 35-41.
- Ajdukiewicz, A.; Kliszczewicz, A.** - Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 24. 2002. pp. 269-279.
- Belaid, F.; Arliguie, G.; François, R.** - Porous structure of the ITZ around galvan zed and ordinary steel reinforcements. *Cement and Concrete Research*. Vol. 31. N.º 11. 2001. pp. 1561-1566.
- Bogas, J.** - Caracterização de betões estruturais com agregados leves de argila expandida. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico. Lisboa 2011. 1596 p.
- CEB** - Design manual on structural effects of time-dependent behavior of concrete. Revision in accordance with the CEB-FIP Model Code 1990. Comité Euro-International du Béton. 1993. pp. 306.
- CEB/FIP** - Model Code 90 - Design Manual. Comité Euro-International du Béton. 1990. pp. 462.
- Coutinho, A.; Gonçalves, A.** - Fabrico e propriedades do betão. Vol. I, II, III. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa. 1997.
- Diamond, S.** - The microstructure of cement paste and concrete-a visual primer. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 26. N.º 8. 2004. pp. 919-933.
- FIB Bulletin 10** - Bond of reinforcement in concrete. State-of-art-report. Lausanne.2000. pp. 434.
- FIB Bulletin 55** - Model Code 2010. First complete draft, Volume 1. Draft model code. Lausanne.2010. pp. 318.
- Geiker, M.; Grube, H.; Luping, T.; Nilsson, L.; Andrade, C.** - Laboratory test methods. Rilem Report 12 - Performance Criteria for Concrete Durability. 1995. pp. 213-257.
- Gjorv, O.; Monteiro, J.; Mehta, P.** - Effect of condensed silica fume on the steel-concrete bond. *ACI Materials Journal*. Vol. 87. N.º 6.1990. pp. 573-580.

- Guedes, M.; Evangelista, L.; de Brito, J.; Ferro, A.** - Microstructural characterization of concrete prepared with recycled aggregates. *Microscopy and Microanalysis*. Vol. 19. 2013. pp. 1222-1230.
- Helmuth, R.A.** - Capillary size restrictions on ice formation in hardened Portland cement pastes. *Proc.4th Int. Symp. On the Chemistry of Cement*. Washington DC. 1960. pp. 855-869.
- Jianyong, L.; Yan, Y.** - A study on creep and drying shrinkage of high performance concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol. 31. 2001. pp. 1203-1206.
- Khan, M.; Cook, W.; Mitchell, D.** - Creep, shrinkage and thermal strains in normal, medium and high-strength concretes during hydration. *ACI Materials Journal*. Vol. 94. N.º 2. 1997. pp. 156-163.
- Kojima, T.; Takagi, N.; Horikawa, S.** - Study on shrinkage characteristics of high-strength silica fume concrete. *ACI Special Publication*. Vol. 199. N.º 41. 2001. pp. 719-736.
- Kovler, K.; Schamban, I.; Igarashi, S.; Bentur, A.** - Prediction of strength and shrinkage for early age high-performance concrete. *ACI Special Publication*. Vol. 189. N.º 18. 2000. pp. 311-332.
- Kropp, J.; Hilsdorf, H.; Grube, H.; Andrade, C.; Nilsson, L.** - Transport mechanism and definitions. *Rilem Report 12 - Performance Criteria for Concrete Durability*. 1995. pp. 4-14.
- Limbachiya, M.C.; Leelawat, T.; Dhir, R.K.** - Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. *Materials and Structures*. Vol. 33. 2000. pp. 574-580.
- LNEC E-378** - Betões: Guia para a utilização de ligantes hidráulicos. LNEC. Lisboa 1993.
- LNEC E-392** - Betões: Determinação da permeabilidade ao oxigénio. LNEC. Lisboa 1993.
- LNEC E-398** - Betões: Determinação da retração e da expansão. LNEC. Lisboa 1993.
- LNEC E-399** - Betões: Determinação da fluência em compressão. LNEC. Lisboa 1993.
- Lofti, S.; Eggimann, M.; Wagner, E.; Mróz, R. Deja, J.** - Performance of recycled aggregate concrete based on a new concrete recycling technology. *Construction and Building Materials*. Vol. 95. 2015. pp. 243-256.
- Lourenço, J.; Júlio, E.; Maranhã, P.** - Betões de agregados leves de argila expandida. Guia para a sua utilização. Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto. Lisboa. 2004.
- Mendis, P.** - Design of high-strength concrete members: state-of-the-art. *Structural Engineering and Materials*. Vol. 5. 2003. pp. 1-15.

Mokarem, D. W.; Weyers, R.E.; Lane, D.S. - Development of a shrinkage performance specifications and prediction model analysis for supplemental cementitious material concrete mixtures. *Cement and Concrete Research*. Vol. 35. N.º 5. 2005. pp. 918-925.

Neville, A.M. - Properties of concrete. Pitman, London. 1981. 844p.

NP EN 12350-2 - Ensaio do betão fresco: Ensaio de abaixamento. IPQ. Lisboa 2009.

NP EN 12350-6 - Ensaio do betão fresco: Massa volúmica. IPQ. Lisboa 2009.

NP EN 12390-3 - Ensaio do betão endurecido: Resistência à compressão dos provetes de ensaio. IPQ. Lisboa 2011.

Ollivier; Jean-Pierre; Massat, M.; Parrott, L. - Parameters influencing transport characteristics. *Rilem Report 12 – Performance Criteria for Concrete Durability*. 1995. pp. 33-96.

Poon, C.S.; Shui, Z.H.; Lam, L. - Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*. Vol. 18. N.º 6. 2004. pp. 461-468.

Poon, C.S.; Shui, Z.H.; Lam, L. - Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*. Vol. 18. N.º 6. 2004. pp. 461-468.

RILEM7.11.128 - Essais portant sur l'adhérence des armatures du béton. 2-Essais par traction. Bond test for reinforcing steel. “ Matériaux et constructions, RILEM doc. 7.11.128. Vol. 3. N.º 15. 1970. pp. 175-178.

Saje, D.; Saje, F. - Autogenous shrinkage development in HPC. High performance materials in bridges. *American Society of Civil Engineers*. 2003. pp. 11-20.

Samman, T.A.; Mirza, W.H.; Wafa, F.F - Plastic shrinkage of normal and high strength concrete: a comparative study. *ACI Materials Journal*. Vol. 93. N.º 1. 1996. pp. 36-40.

Scrivener, L. - Backscattered electron imaging of cementitious microstructures: understanding and quantification. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 26. N.º 8. 2004. pp. 935-945.

Shiomi, I.; Masuda, Y.; Abe, M.; Yasuda, M.; Kodama, K. - Influence of various factors on drying shrinkage of high-strength concrete. *High Strength-Concrete Proceedings*. Norway. 1993. pp. 921-928.

Weiss, W.J.; Yang, W.; Shah, S.P. - Factors influencing durability and early-age cracking in high-strength concrete structures. *ACI Special Publication*. Vol. 189. N.º 22. 2000. pp. 387-410.

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. 2004. pp. 276-292.

Lisboa, Setembro de 2015

Autores

Diogo Pedro
Bolsheiro de Investigação

Jorge de Brito
Professor Catedrático

Luís Evangelista
Professor Adjunto

Pedro Silva
Professor Adjunto