



Betão com Adição de Fibras de Aço e Têxteis Recicladas de Pneu Sujeito a Altas Temperaturas

Análise de desempenho

Maria Eduarda Mendes Daniel

Orientadores

Cristina Calmeiro dos Santos

João Paulo Correia Rodrigues

Dissertação apresentado à Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Construção Sustentável, realizada sob a orientação científica da Professora Doutora Cristina Calmeiro dos Santos, Professora Adjunta do Instituto Politécnico de Castelo Branco e do Professor Doutor João Paulo Correia Rodrigues, Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

dezembro 2015

Composição do júri

Presidente do júri

Doutora Maria Constança Simões Rigueiro

Vogais

Doutor Hélder David da Silva Craveiro”

Doutor Luís Filipe de Carvalho Jorge”

Doutora Cristina Calmeiro dos Santos”

Agradecimentos

Desde mais, quero agradecer aos meus pais pelo apoio, incentivo, amor e paciência demonstrado ao longo da minha vida académica.

Ao Marcelo por estar sempre presente nos momentos difíceis, pelo apoio, carinho, amor e amizade demonstrados durante o mestrado.

À Professora Doutora Cristina Calmeiro dos Santos (IPCB) pela orientação, apoio e total disponibilidade e ajuda na resolução de problemas ao longo da dissertação.

Ao Professor Doutor João Paulo Correia Rodrigues (DEC-FCTUC) pela orientação e apoio disponibilizado durante a dissertação.

Aos colegas de laboratório Hugo Caetano e Luís Laim, pelo apoio e ajuda prestada na realização do trabalho experimental.

Aos técnicos do Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, pela colaboração e empenho no trabalho efetuado.

À empresa RECIPNEU pela oferta das fibras de aço e têxteis utilizadas nesta investigação.

A parte experimental deste trabalho foi desenvolvida no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (DEC-FCTUC). A esta instituição agradeço o apoio.

Resumo

A sustentabilidade é uma preocupação para a indústria da construção civil, uma vez que esta indústria é responsável pelo consumo de uma grande quantidade de recursos naturais e por impactos ambientais. Assim, a utilização de agregados reciclados em substituição dos agregados naturais mostra-se benéfica ao minimizar os impactos ambientais, o consumo de recursos naturais e alguns problemas urbanos associados à acumulação de lixo.

É neste contexto e atendendo à necessidade de gerir racionalmente os recursos naturais, que surge o presente trabalho de investigação.

O objetivo deste trabalho é demonstrar, através de investigação experimental, que a adição de fibras têxteis e de fibras de aço provenientes da reciclagem de pneus é viável para produzir um betão com um comportamento estruturalmente satisfatório quando submetido a elevadas temperaturas.

Neste sentido, o trabalho laboratorial realizado compreendeu ensaios de resistência à compressão do betão com fibras de aço e fibras têxteis provenientes da reciclagem de pneus à temperatura ambiente e a altas temperaturas.

Considerou-se quatro composições diferentes de betão, com a mesma relação água/cimento ($A/C=0,43$), diferindo apenas no tipo de fibras incorporadas nas misturas em substituição da brita. Assim, estudou-se uma composição de referência (0% de fibras) (BR), uma composição com 50kg/m^3 de fibras de aço recicladas de pneu (BFA), uma composição com 3kg/m^3 de fibras têxteis recicladas de pneu (BFT) e uma composição com uma mistura de 50kg/m^3 de fibras de aço mais 3kg/m^3 de fibras têxteis recicladas de pneu (BM). Os provetes de betão foram submetidos a um nível de carregamento de $0,5f_{cd}$ e a diferentes níveis de temperatura máxima (20, 300, 500 e 700°C).

Os resultados deste programa experimental mostram que as fibras de aço e têxteis recicladas de pneu apresentam-se como uma boa solução na composição do betão para controlar a fendilhação e o spalling podendo ser um bom substituto para as fibras de aço e polipropileno comerciais.

Palavras-chave

Gestão de resíduos; betão; fibras de aço e fibras têxteis recicladas de pneu; temperatura; resistência à compressão.

Abstract

Sustainability is a major concern for the construction industry, since this industry is responsible for consuming a significant amount of resources with consequent undesirable environmental impact. Therefore, the use of recycled aggregates instead of natural aggregates is shown to be beneficial to minimizing the environmental burden, natural resource and urban problems associated with the accumulation of garbage.

The research work arises on the basis of the relevant necessity to optimize rational natural resource management.

The objective of study is to demonstrate, through experimental research, that the addition of textile fibers and steel fibers from tire recycling to produce thermostable concrete is feasible.

Accordingly, the laboratory work consists of compressive strength tests of concrete with steel and textile from recycled tires at room and at high temperatures.

Four different compositions of concrete, with the same water/cement ratio ($W/C=0,43$) were considered. The latter differ on the type of incorporated fibers in the mixture (instead of gravel). Thus, we studied a composition of a reference concrete (0% fibers) (BR) and several mixtures: with $50\text{kg}/\text{m}^3$ tire recycled steel fibers (BFA), with $3\text{ kg}/\text{m}^3$ of recycled textile fibers tire (BFT) and a final mixture of $50\text{kg}/\text{m}^3$ steel fibers over $3\text{ kg}/\text{m}^3$ of recycled textile fibers tire (BM). The concrete specimens were subjected to a loading level of $0,5f_{cd}$ and different temperatures (20, 300, 500 and 700°C).

The results of this experimental program show that steel fibers and textile recycled tire, constitute a good solution in the composition of concrete regarding cracking control and spalling. Steel fibers and textile recycled tire may therefore be a good substitutes for the commercial steel and polypropylene fiber.

Keywords

Waste management; concrete; recycled tire steel fiber and textile fiber; temperature; compression resistance.

Índice geral

COMPOSIÇÃO DO JÚRI	III
AGRADECIMENTOS.....	V
RESUMO.....	VII
PALAVRAS-CHAVE	VII
ABSTRACT	IX
KEYWORDS.....	IX
ÍNDICE GERAL.....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
LISTA DE TABELAS	XV
SIMBOLOGIA	XVII
ABREVIATURAS	XIX
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 ENQUADRAMENTO DO TEMA	1
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	3
2. PROPRIEDADES MECÂNICAS DE BETÕES NORMAIS E DE ALTA RESISTÊNCIA APÓS INCÊNDIO	4
2.1 INTRODUÇÃO.....	4
2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS BETÕES SUJEITOS A TEMPERATURAS ELEVADAS	5
2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	15
3. MATERIAL E MÉTODOS	16
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	16
3.2 COMPOSIÇÃO DO BETÃO	16
3.3 PROVETES	21
3.4 SISTEMA EXPERIMENTAL	24
3.5 CLASSE DE RESISTÊNCIA DO BETÃO.....	25
3.6 PROGRAMA DE ENSAIOS.....	26
3.7 PROCEDIMENTO DE ENSAIO	28
4. RESULTADOS.....	29
4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	29
4.2 GRÁFICOS TENSÃO-EXTENSÃO	36
4.3 EVOLUÇÃO DE TEMPERATURAS	40
4.4 PROVETES APÓS ENSAIOS	45
4.4.1 <i>Nível de Temperatura 20°C</i>	46
4.4.2 <i>Nível de Temperatura 300°C</i>	47
4.4.3 <i>Nível de Temperatura 500°C</i>	48
5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	49
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51

Índice de figuras

FIGURA 2.1 - RELAÇÃO ENTRE A COR E A REDUÇÃO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO BETÃO EXPOSTO A ALTAS TEMPERATURAS	5
FIGURA 2.2 – PROCESSO FÍSICO-QUÍMICO NO BETÃO DURANTE O AQUECIMENTO.	6
FIGURA 2.3 – REGIMES DE TEMPERATURA E CARGA DURANTE OS ENSAIOS.	7
FIGURA 2.4 – SUPERFÍCIE DAS AMOSTRAS DE BETÃO EXPOSTAS A ELEVADAS TEMPERATURAS	8
FIGURA 2.5 – MODOS DE ROTURA DO BETÃO DE 650 KG/M ³ DE DENSIDADE PARA 20°C, 450°C E 650°C	9
FIGURA 2.6 – MODOS DE ROTURA DO BETÃO DE 1000 KG/M ³ DE DENSIDADE PARA 20°C, 450°C E 650°C	9
FIGURA 2.7 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARA AS DIFERENTES COMPOSIÇÕES DE BETÃO.	10
FIGURA 2.8 – CURVAS DE TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O BETÃO SEM BORRACHA.	11
FIGURA 2.9 – CURVAS DE TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O BETÃO COM 3% DE SUBSTITUIÇÃO DE BORRACHA.	11
FIGURA 2.10 – CURVAS DE TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O BETÃO COM 5% DE SUBSTITUIÇÃO DE BORRACHA. ...	11
FIGURA 2.11 – CURVAS DE TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O BETÃO COM 8% DE SUBSTITUIÇÃO DE BORRACHA. ...	12
FIGURA 2.12 – RESISTÊNCIA RESIDUAL À COMPRESSÃO.	13
FIGURA 3.1 – TIPOS DE AGREGADOS: (A) – AREIA FINA; (B) – BRITA CALCÁRIA.	17
FIGURA 3.3 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS.	21
FIGURA 3.4 – SISTEMA DE SOLDADURA POR MERCÚRIO: (A) – TERMOPAR; (B) – RECIPIENTE COM MERCÚRIO; (C) – MERCÚRIO; (d) – DISPOSITIVO DE SOLDADURA.	22
FIGURA 3.5 - POSIÇÃO DOS TERMOPARES NO PROVETE.	22
FIGURA 3.6 – COLOCAÇÃO DOS TERMOPARES: (A) – TERMOPAR; (B) – FIO GUIA	23
FIGURA 3.7 – FABRICO DO BETÃO: (A) – BETONEIRA; (B) – BETONAGEM DOS PROVETES; (C) – VIBRAÇÃO DOS PROVETES.	23
FIGURA 3.8 – EQUIPAMENTOS: (A) – CORTE DOS PROVETES; (B) – RETIFICAÇÃO DOS PROVETES.	24
FIGURA 3.9 – SISTEMA DE ENSAIO.	24
FIGURA 4.1 – COMPARAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS BETÕES EM ESTUDO.	29
FIGURA 4.2 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO BETÃO DE REFERÊNCIA (BR) E DO BETÃO DE FIBRAS DE AÇO (BFA) EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.	31
FIGURA 4.3 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO BETÃO DE REFERÊNCIA (BR) E DO BETÃO COM FIBRAS TÊXTEIS (BFT) EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.	32
FIGURA 4.4 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO BETÃO DE REFERÊNCIA (BR) E DO BETÃO DE MISTURA (BM) EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.	32
FIGURA 4.5 – COMPARAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS BETÕES EM ESTUDO.	33
FIGURA 4.6 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – BR E BFA.	34
FIGURA 4.7 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – BR E BFT.	34
FIGURA 4.8 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – BR E BM.	35
FIGURA 4.9 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – BFA E BFT.	35
FIGURA 4.10 – TENSÃO-EXTENSÃO DOS PROVETES DO BR A 20°C COM CARREGAMENTO DE 0,5F _{cd}	36
FIGURA 4.11 – TENSÃO-EXTENSÃO DOS PROVETES DO BFA A 20°C COM CARREGAMENTO DE 0,5F _{cd}	36
FIGURA 4.12 – TENSÃO-EXTENSÃO DOS PROVETES DO BFT A 20°C COM CARREGAMENTO DE 0,5F _{cd}	37
FIGURA 4.13 – TENSÃO-EXTENSÃO DOS PROVETES DO BM A 20°C COM CARREGAMENTO DE 0,5F _{cd}	37
FIGURA 4.14 – TENSÃO-EXTENSÃO DOS PROVETES DO BR A 300°C COM CARREGAMENTO DE 0,5F _{cd}	37
FIGURA 4.15 - TENSÃO-EXTENSÃO DOS PROVETES DO BFA A 300°C COM CARREGAMENTO DE 0,5F _{cd}	38
FIGURA 4.16 - TENSÃO-EXTENSÃO DOS PROVETES DO BFT A 300°C COM CARREGAMENTO DE 0,5F _{cd}	38
FIGURA 4.17 - TENSÃO-EXTENSÃO DOS PROVETES DO BM A 300°C COM CARREGAMENTO DE 0,5F _{cd}	38
FIGURA 4.18 - TENSÃO-EXTENSÃO DOS PROVETES DO BR A 500°C COM CARREGAMENTO DE 0,5F _{cd}	39
FIGURA 4.19 - TENSÃO-EXTENSÃO DOS PROVETES DO BFA A 500°C COM CARREGAMENTO DE 0,5F _{cd}	39
FIGURA 4.20 - TENSÃO-EXTENSÃO DOS PROVETES DO BFT A 500°C COM CARREGAMENTO DE 0,5F _{cd}	39
FIGURA 4.21 - TENSÃO-EXTENSÃO DOS PROVETES DO BM A 500°C COM CARREGAMENTO DE 0,5F _{cd}	40
FIGURA 4.22 – EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NO FORNO – SÉRIE DE 300°C.	40
FIGURA 4.23 – EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NA SECÇÃO TRANSVERSAL DO PROVETE BR – SÉRIE DE 300°C.	41

FIGURA 4.24 – EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NA SECÇÃO TRANSVERSAL DO PROVETE BFA – SÉRIE DE 300°C.....	41
FIGURA 4.25 – EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NA SECÇÃO TRANSVERSAL DO PROVETE BFT – SÉRIE DE 300°C.	41
FIGURA 4.26 – EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NA SECÇÃO TRANSVERSAL DO PROVETE BM – SÉRIE DE 300°C.....	42
FIGURA 4.27 – EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NO FORNO – SÉRIE DE 500°C.	43
FIGURA 4.28 – EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NA SECÇÃO TRANSVERSAL DO PROVETE BR – SÉRIE DE 500°C.....	43
FIGURA 4.29 - EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NA SECÇÃO TRANSVERSAL DO PROVETE BFA – SÉRIE DE 500°C.....	43
FIGURA 4.30 – EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NA SECÇÃO TRANSVERSAL DO PROVETE BFT – SÉRIE DE 500°C.	44
FIGURA 4.31 – EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NA SECÇÃO TRANSVERSAL DO PROVETE BM – SÉRIE DE 500°C.....	44
FIGURA 4.32 – PROVETE APÓS ENSAIO: (A) – BR; (B) – BFA.	46
FIGURA 4.33 – PROVETE APÓS ENSAIO: (A) – BFT; (B) – BM.	46
FIGURA 4.34 – PROVETE APÓS ENSAIO: (A) – BR; (B) – BFA.	47
FIGURA 4.35 – PROVETE APÓS ENSAIO: (A) – BFT; (B) – BM.	47
FIGURA 4.36 – PROVETE APÓS ENSAIO: (A) – BR; (B) – BFA.	48
FIGURA 4.37 – PROVETE APÓS ENSAIO: (A) – BFT; (B) – BM.	48

Lista de quadros

QUADRO 2.1 – FATORES QUE AFETAM O DESEMPENHO DO BETÃO A ALTAS TEMPERATURAS.	7
QUADRO 2.2 – COMPOSIÇÃO DOS BETÕES.	14
QUADRO 3.1 – MASSAS VOLÚMICAS DOS AGREGADOS.....	18
QUADRO 3.2 – CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS DE AÇO E FIBRAS TÊXTEIS	19
QUADRO 3.3 – COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS.	21
QUADRO 3.4 – PLANO DE ENSAIOS.	22
QUADRO 3.5 – COMPOSIÇÃO DO BETÃO POR M ³	26
QUADRO 3.6 – CLASSE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.	27
QUADRO 3.7 – CARGAS A APLICAR NOS PROVETES A ALTAS TEMPERATURAS.	28
QUADRO 3.8 – PROGRAMA DE ENSAIOS.....	28
QUADRO 4.1 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS PROVETES DE BETÃO ENSAIADOS.....	31

Simbologia

A	areia
A/C	relação água/cimento
B	brita
CEM	cimento
d	dimensão da seção transversal de contato do provete
d_1	largura da seção do provete de ensaio
d_2	altura da seção do provete de ensaio
$D_{máx}$	dimensão máxima dos agregados
F	carga máxima
$F_{máx}$	força máxima de rotura
f_c	resistência à compressão
f_{cd}	valor de cálculo da resistência à compressão do betão
f_{cm}	resistência média à compressão
$f_{c(T)}$	resistência à compressão à temperatura T
$f_{c(20^{\circ}C)}$	resistência à compressão à temperatura ambiente
I	distância entre apoios
L	comprimento da linha de contato do provete
R	raio médio do molde
R^2	coeficiente de correlação
SP	superplastificante
T	temperatura
T_i	termopar na posição i no provete
$T_{máx}$	temperatura máxima atingida
ϵ_{bn}	valor da extensão para a tensão σ_b medido no ciclo n
ϵ_{ext}	valor da extensão no extensómetro
ϵ_{fn}	valor da extensão para a tensão σ_f registado no ciclo n
ϵ_i	valor da extensão no ciclo i
σ_a	tensão aplicada

σ_b	tensão correspondente a 1/3 da tensão média da resistência à compressão
σ_f	tensão máxima aplicada
σ_i	tensão inicial
σ/ε	relação tensão/extensão
\emptyset	diâmetro do provete

Abreviaturas

<i>AN</i>	agregado natural
<i>AF</i>	areia fina
<i>BC</i>	brita calcária
<i>BR</i>	betão de referência
<i>BFA</i>	betão com fibras de aço recicladas de pneu (50 kg/m ³)
<i>BFT</i>	betão com fibras têxteis recicladas de pneu (3 kg/m ³)
<i>BM</i>	betão de mistura [fibras de aço (50 kg/m ³) e têxteis (3 kg/m ³) recicladas de pneu]
<i>DEC-FCTUC</i>	Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
<i>LEME</i>	Laboratório Ensaios de Materiais e Estruturas
<i>EST-IPCB</i>	Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco
<i>RILEM</i>	International Union of laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures
<i>SGPU</i>	Sistema Integrado de Gestão de Pneus Usados

1. Introdução

1.1 Enquadramento do tema

Na área da engenharia civil torna-se fundamental garantir o bom funcionamento das construções face às diversas ações a que estão sujeitas, podendo ser ações permanentes ou acidentais como é o caso de um incêndio. Apresenta-se como essencial o conhecimento dos diferentes materiais empregues na construção.

O betão é um dos materiais mais utilizados na indústria da construção apresentando, por norma, um bom comportamento ao fogo, no entanto, quando sujeito a altas temperaturas as suas propriedades mecânicas tendem a dissipar-se. A relação temperatura-degradação da resistência verifica-se tanto no betão normal como no betão de alta resistência.

Neste sentido tem-se vindo a desenvolver novas formas de melhorar a composição do betão, alterando os seus constituintes, introduzindo, por exemplo, agregados reciclados provenientes de pneus em fim de vida útil.

O uso em excesso de pneus é um dos problemas com maior impacto para a natureza, tendo-se vindo, nos últimos anos, a desenvolver novas maneiras de otimizar esta situação. Em 2014, o Sistema Integrado de Gestão de Pneus Usados (SIGPU) contabilizou cerca de 85 mil toneladas de pneus usados, dos quais 52% foram reciclados, 32% para aproveitamento energético e 17% para a reutilização ou recauchutagem. É visível que a reciclagem e a valorização energética têm vindo a aumentar ao longo dos anos (Relatório Anual e Contas, Valorpneu, 2014).

Assim, a introdução de fibras de aço e fibras têxteis provenientes de pneus usados em substituição dos agregados naturais mostra-se benéfica ao minimizar os impactos ambientais, o consumo de recursos naturais e na redução de alguns problemas urbanos associados à acumulação de lixo.

Para a obtenção dos agregados reciclados, os pneus passam por uma etapa de corte em que se obtém material reciclado, constituído por pequenos pedaços de forma irregular e tamanho variável. Posteriormente a borracha é submetida a dois tipos de processos para separar a borracha das fibras de aço e fibras têxteis. A trituração mecânica à temperatura ambiente ou a moagem criogénica com arrefecimento de temperatura. No presente estudo optou-se pela aplicação deste último método, dado que realiza a separação completa e individualizada da borracha, fibras têxteis e de fibras de aço sem desperdício ou perdas significativas. Por outro lado, a trituração criogénica tem a vantagem de manter as propriedades elásticas do material, as quais não são quimicamente afetadas.

A trituração criogénica é um processo tecnológico caracterizado pelo arrefecimento criogénico dos polímeros constituintes da borracha, por ação do azoto líquido, sendo posteriormente submetidos a forças de alto impacto, de onde resultam grânulos com morfologia do tipo cubóide, de faces lisas, praticamente sem poros, com aspeto brilhante, como se fossem encapsulados por uma película reluzente. O processo de granulação, por alto impacto em moinhos de martelos, realiza-se em atmosfera inerte, numa fração de segundo e a baixíssima temperatura. Deste modo, o processo criogénico não degrada química nem termicamente as cadeias moleculares dos polímeros de borracha, nem o seu estado de vulcanização. Mantendo-se as suas propriedades elásticas e os seus agentes protetores existentes na borracha ao longo do tempo, resultando numa elevada resistência ao envelhecimento atmosférico (RECIPNEU, 2015).

Em Portugal a RECIPNEU é uma das empresas que se dedica à reciclagem de pneus, utilizando um processo de trituração criogénica na conceção dos agregados para aplicação como matéria-prima e como produto final (RECIPNEU, 2015).

O trabalho de investigação experimental realizado permitiu estudar as variações das propriedades mecânicas do betão com introdução de fibras de aço e têxteis a altas temperaturas, especialmente a resistência à compressão e a evolução de temperaturas.

Efetuar-se-ão quatro composições de betão onde foram realizados ensaios de resistência à compressão a altas temperaturas. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra com o apoio/parceria da RECIPNEU.

1.2 Objetivos do trabalho

Para a realização deste trabalho traçaram-se os seguintes objetivos:

- Sistematizar os conhecimentos existentes relativamente à influência das altas temperaturas nas propriedades mecânicas do betão normal e do betão de alta resistência;
- Quantificar a influência da temperatura na capacidade resistente de elementos de betão de alta resistência;
- Avaliar experimentalmente a resistência à compressão do betão com fibras de aço e fibras têxteis provenientes da reciclagem de pneus quando submetido a diferentes níveis de temperatura;
- Analisar a influência dos vários tipos de fibras relativamente à resistência à compressão do betão à temperatura ambiente e a altas temperaturas e a evolução da temperatura nas diferentes composições de betão.

1.3 Organização do trabalho

O presente trabalho é organizado em cinco capítulos.

O primeiro capítulo contextualiza o tema, apresenta os objetivos do trabalho e descreve-se a metodologia de trabalho desenvolvida.

No segundo capítulo apresenta-se um resumo do estado de arte, fazendo-se referência às principais investigações já realizadas sobre o comportamento ao fogo do betão com adição de fibras.

O terceiro capítulo expõe pormenorizadamente os materiais e os métodos usados no estudo experimental.

O quarto capítulo analisa os resultados experimentais obtidos para a resistência à compressão e para a evolução das temperaturas.

Por último, o quinto capítulo apresentam as principais conclusões a que se chegou após a realização do estudo experimental e menciona possíveis desenvolvimentos de investigação futura nesta área.

2. Propriedades mecânicas de betão de alta resistência após incêndio

No presente capítulo apresenta-se as principais conclusões retiradas de estudos efetuados sobre o comportamento ao fogo do betão normal e do betão de alta resistência.

De salientar que este tema tem vindo a ser objeto de estudo desde o início do século XX, sendo que os primeiros estudos efetuados ao betão em situação de incêndio ocorreram em edifícios.

2.1 Introdução

O betão é um material constituído por uma mistura de vários agregados, por um ligante e por água. A propriedade de endurecimento obtida dos produtos provenientes da reação do ligante com a água, confere à mistura uma coesão e resistência que lhe permite servir como material de construção (Coutinho, 1988).

Atualmente o betão apresenta novas propriedades mecânicas desde a sua primeira utilização como material de construção (Mays, 1992; West, 1996). Inicialmente o ligante era constituído principalmente por cal e por vezes por argila, o que o limitava na sua aplicação e na sua qualidade. Só no século XIX é que se desenvolveu o betão como material de construção. Com Isaac Johnson, em 1845, ocorreu a fusão dos constituintes do betão a uma elevada temperatura, no que resultou num cimento similar ao utilizado atualmente (Neville, 1995).

O betão aplicado no dia-a-dia é responsável pelo elevado consumo de cimento e de agregados naturais. Devido à sua elevada utilização esses recursos naturais começam a ficar escassos e é necessário recorrer a outro tipo de agregados.

Atualmente fala-se determinadamente sobre sustentabilidade e reaproveitamento, que é algo a ter em conta em todas as áreas. Como se sabe, a maior parte dos pneus usados são depositados em aterro e não têm qualquer finalidade, a não ser degradarem-se ao longo dos anos. Devido a este problema, considerou-se que seria uma solução ótima reaproveitar os agregados reciclados de pneu e introduzi-los no betão reduzindo assim a quantidade de agregados naturais necessária para a sua produção.

2.2 Propriedades mecânicas dos betões sujeitos a temperaturas elevadas

As propriedades mecânicas do betão expostas a elevadas temperaturas vêm sendo estudadas desde a década dos anos quarenta (Menzel, 1943; Binner, 1949; Malhotra, 1956; Abrams, 1971). Os trabalhos desenvolvidos compreendem o estudo do comportamento do material betão e o estudo do comportamento estrutural do betão. Nos estudos para o betão como material foram caracterizadas propriedades como, a resistência à compressão, o módulo de elasticidade, a resistência à tração e o coeficiente de Poisson em função da temperatura. Quanto ao comportamento estrutural do betão, estes foram estudados em vigas, pilares e lajes.

Segundo Cánovas (1988), o aumento da temperatura promove a ocorrência de diversas alterações de coloração no betão, especialmente se os agregados forem de origem siliciosa, constituindo assim um bom indicador da perda de resistência. Os parâmetros propostos pelo autor para a alteração de coloração foram: no intervalo entre a temperatura ambiente e os 300°C o betão apresenta uma cor cinza, entre os 300°C e os 600°C o betão apresenta uma cor entre o rosa a vermelho, dos 600°C aos 950°C apresenta uma cor cinzento avermelhado, para a temperatura entre os 950°C e os 1200°C apresenta uma cor amarelo alaranjado, por fim entre os 1200°C e os 1400°C a cor do betão é amarelo claro. É possível através da figura 2.1 observar-se tal situação.

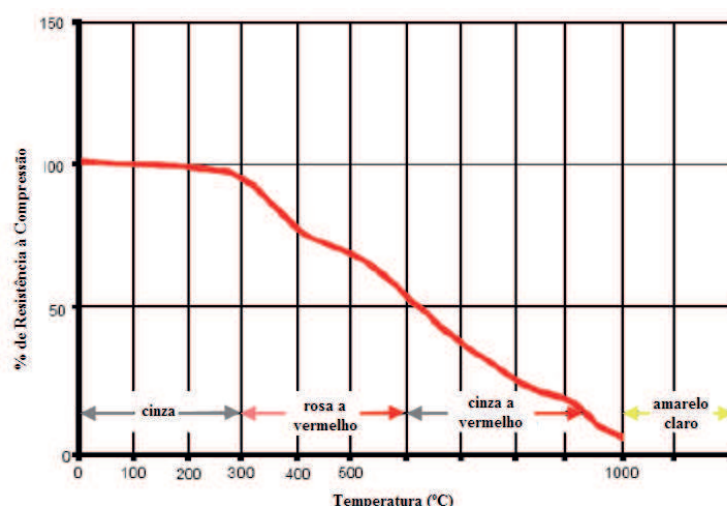


Figura 2.1 - Relação entre a cor e a redução de resistência à compressão do betão exposto a altas temperaturas (Cánovas, 1988).

Khoury (2000) estudou o desempenho mecânico do betão quando exposto a altas temperaturas. Este concluiu que as proporções utilizadas na constituição do betão têm uma grande importância. À medida que a temperatura aumentou os materiais constituintes do betão sofreram mudanças físicas e químicas que dependem de fatores

internos, como: pasta do betão, agregados, incompatibilidade térmica entre o agregado e a pasta de cimento, e de fatores externos como: a humidade, a temperatura e a taxa de carregamento. Na figura 2.2 observam-se as alterações sofridas pelo betão ao longo da sua exposição a diferentes níveis de temperatura.

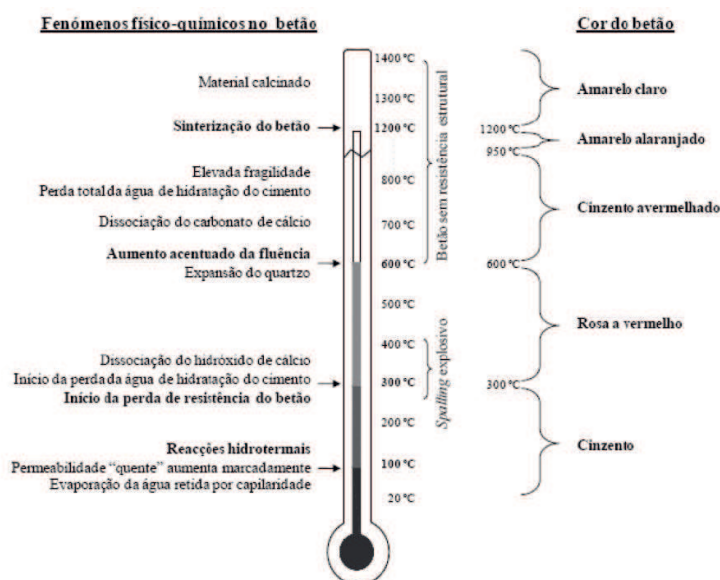


Figura 2.2 - Processo físico-químico no betão durante o aquecimento (Khoury, 2000).

Phan e Carino (2000) fizeram um estudo das propriedades mecânicas do betão quando exposto a altas temperaturas, neste estudo podem-se referir quatro ensaios:

- (a) Ensaio em provetes carregados durante o aquecimento;
- (b) Ensaio em provetes não carregados durante o aquecimento;
- (c) Ensaio de determinação das propriedades residuais em provetes carregados durante o aquecimento;
- (d) Ensaio de determinação das propriedades residuais em provetes não carregados durante o aquecimento.

A figura 2.3 apresenta os resultados obtidos nos referidos ensaios.

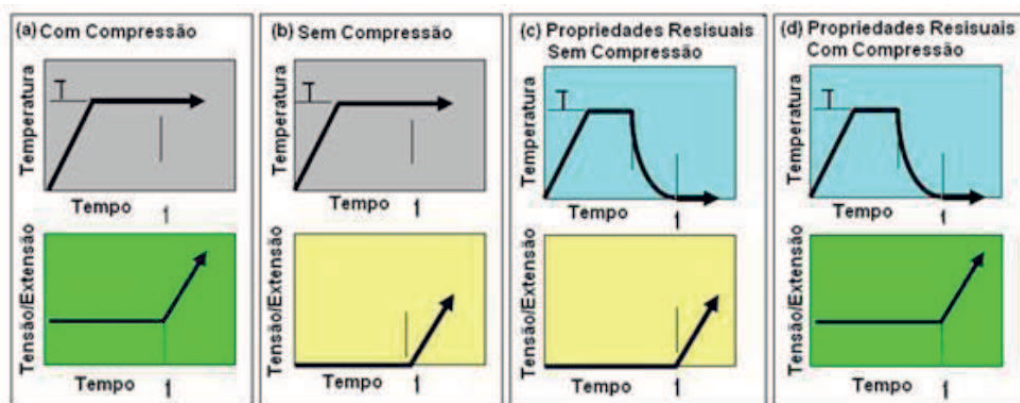


Figura 2.3 - Regimes de temperatura e carga durante os ensaios (Phan e Carino, 2000).

A caracterização da resistência à compressão do betão quando sujeita a altas temperaturas depende de vários parâmetros como o tipo de agregado, a relação água/cimento, tipo de ligante, tipo de adjuvante, entre outros.

No quadro 2.1 observam-se os resultados da influência de alguns parâmetros que afetam a resistência à compressão do betão a altas temperaturas, segundo as orientações do RILEM TC HTC (2004).

Quadro 2.1 - Fatores que afetam o desempenho do betão a altas temperaturas (RILEM, 2004).

Parâmetros	Influência			Importância nas estruturas
	Alta	Média	Baixa	
Classe do Betão			+	Grande
Relação água/cimento (w/c)			+	Grande
Agregados	+++			Média
Tipo de cimento		++		Média
Relação agregados/cimento		++		Média
Máxima dimensão dos agregados (Φ)			+	Baixa
Nível de carregamento (σ)				$\sigma < 0,3 f_{ck}$
Taxa de aquecimento (\dot{T})			+	$\dot{T} < 4 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$
Taxa de evaporação				para $T = 120^\circ\text{C}$
Idade do betão			+	$t > 28$ dias
Tipo de cura		++		Média
Selagem	+++			Até $T < 200^\circ\text{C}$

A análise do quadro 2.1 permite concluir que os parâmetros que mais afetam a resistência à compressão do betão a altas temperaturas são o tipo de agregado, o nível de carregamento, a taxa de evaporação e a selagem dos provetes.

Georgali e Tsakiridis (2004) defendem que o processo de deterioração do betão a altas temperaturas ocorre quando é atingida a temperatura de 380°C . A perda de água de hidratação do cimento ocorre no intervalo de 300°C a 400°C , o que conduz a uma perda na resistência e aparecimento de fissuras superficiais. Atingidos os 400°C , a

perda de resistência é da ordem de 15% a 25%, conforme o tipo de agregados, siliciosos ou calcários. À temperatura de 550°C ocorre a desidratação do hidróxido de cálcio. Até 600°C os agregados sofrem expansão térmica, de acordo com o seu coeficiente de dilatação térmica, dando origem a tensões internas que provocam uma desagregação no betão. A partir dos 800°C, os agregados de origem calcária iniciam a sua decomposição, acentuando a redução da resistência do betão.

Sakr e EL-Hakim (2005), estudaram o efeito da exposição accidental ao fogo, variando a temperatura entre 250°C a 950°C com o intuito de determinar as propriedades físicas e mecânicas de diferentes tipos de betão (agregados de barita, de brita e de ilmenite) quando utilizados em proteções de instalações nucleares. Os autores analisaram também o efeito da pintura de proteção ao fogo e o método de arrefecimento a aplicar de modo a minimizar os danos causados na estrutura de betão. Desta análise concluíram que o betão constituído por agregados de ilmenite apresentou uma maior resistência a altas temperaturas quando comparado com o betão constituído por agregados de barita ou de brita. Quanto ao método de arrefecimento comprovaram que a utilização de sistemas de espuma eram mais apropriados em situação de incêndio, visto que a água provoca uma grande deterioração do betão. Também é aconselhado fazer-se uma pintura de proteção para reduzir a perda de água a altas temperaturas e para assegurar a segurança dos elementos de betão no caso de um incêndio accidental.

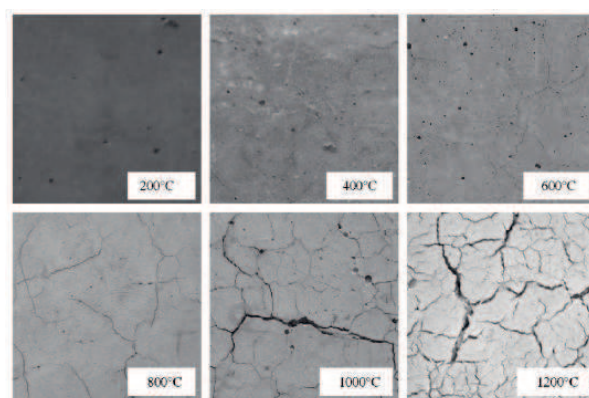


Figura 2.4 - Superfície das amostras de betão expostas a elevadas temperaturas (Arioz, 2007).

Omer Arioz (2007) executou um estudo relativamente ao efeito das altas temperaturas nas propriedades físicas e mecânicas de várias misturas de betão com cimento Portland, agregado de calcário britado e cascalho de rio. As temperaturas ensaiadas variaram entre os 200°C e os 1200°C. Verificou-se que o efeito das elevadas temperaturas foi mais evidente para as misturas de betão com agregados de cascalho do rio (Figura 2.4).

Othmand Mydin e Wang (2012) elaboraram um estudo sobre o efeito das elevadas temperaturas em betões celulares. Este betão é considerado um material leve constituído por cimento Portland ou uma pasta de cimento (argamassa) com uma estrutura de poros uniformemente produzidos pela introdução mecânica de ar. Os autores com este trabalho pretendiam determinar as propriedades mecânicas do betão celular a elevadas temperaturas, como a resistência de compressão cilíndrica, o módulo de elasticidade e a porosidade. Disto conclui-se que a perda da rigidez do material ocorreu perto dos 90°C, independentemente da densidade do material. A redução da densidade do betão celular conduz à redução da força e da rigidez do material. É possível analisar o estado dos provetes após o ensaio nas figuras 2.5 e 2.6.



Figura 2.5 - Modos de rotura do betão de 650 Kg/m³ de densidade para 20°C, 450°C e 650°C (Othumand Mydin e Wang, 2012).



Figura 2.6 - Modos de rotura do betão de 1000 Kg/m³ de densidade para 20°C, 450°C e 650°C (Othumand Mydin e Wang, 2012).

Ainda se verifica a escassa existência de estudos realizados para caracterizar o comportamento ao fogo de betões com agregados reciclados de borracha. Os primeiros estudos feitos sobre este tema foram efetuados na década de 1990.

Eldin e Senouci (1993) concretizaram um dos primeiros estudos sobre betão com agregados de borracha. Os autores verificaram que este tipo de betão apresentava uma

menor trabalhabilidade, menor resistência à compressão e à tração e menor tenacidade, devendo-se à falta de aderência entre a superfície da borracha e a matriz de cimento.

Hernández-Olivares e Barluenga (2004) ensaiaram um betão de alta resistência com sílica de fumo e com diferentes quantidades de partículas recicladas de pneus usados. As partículas usadas para o ensaio possuíam um comprimento de 1,25 cm e uma superfície bastante rugosa e danificada. A sua densidade era de 0,85 g/m³, a taxa de absorção de água é de 25%, a taxa de amolecimento é de 175°C e a temperatura de combustão é de 200°C.

Foram feitas quatro composições de betão, uma sem borracha e outras três cada uma com 3, 5 e 8% respetivamente com agregados de borracha. O grau de consistência e a trabalhabilidade dos vários tipos de composições no estado fresco foram analisados através dos ensaios de cone de Abrams e grau Vê-Bê. Os autores concluíram que todas as amostras tinham uma trabalhabilidade adequada. Foram assim produzidos 6 provetes cúbicos de cada composição a estudar. Para o estado endurecido, a resistência à compressão do betão apresentou uma diminuição com o aumento da taxa de incorporação de borracha, como se observa na figura 2.7.

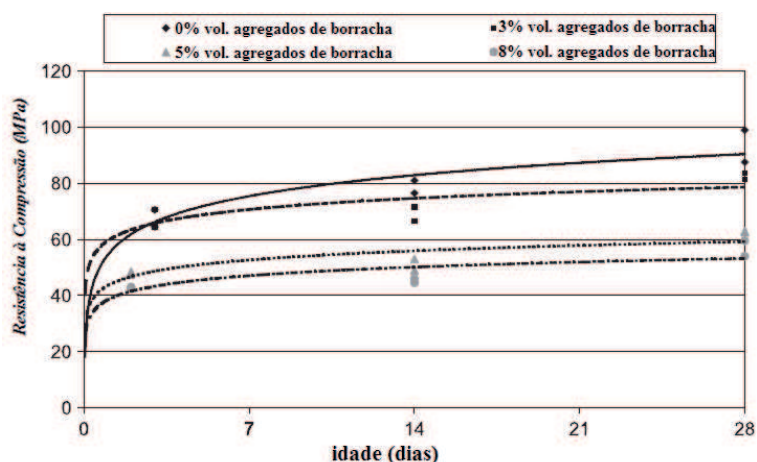


Figura 2.7 - Resistência à compressão para as diferentes composições de betão (Hernández-Olivares e Barluenga 2004).

Para estudar o comportamento ao fogo, foram produzidos provetes prismáticos de cada composição e expostos a altas temperaturas conforme a curva ISO 834 até atingir a temperatura de 1000°C no forno.

Para avaliar a temperatura foi colocado em cada provete um termopar na face interior e outro na face exterior. As figuras 2.8, 2.9, 2.10 e 2.11 apresentam os resultados da exposição térmica para as diferentes composições do betão.

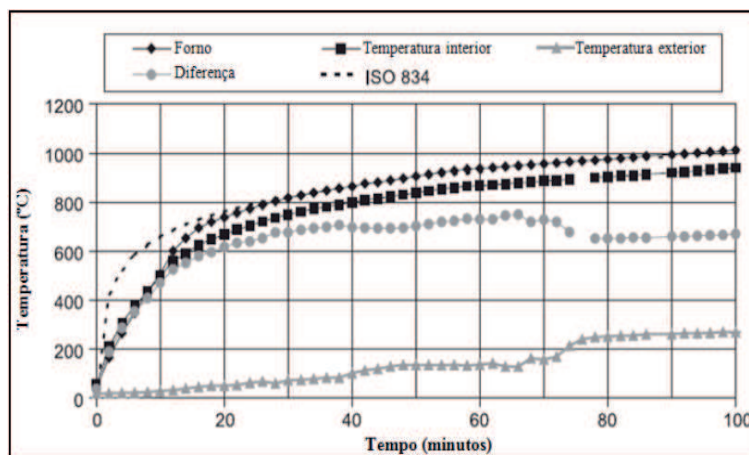


Figura 2.8 - Curvas de temperatura em função do tempo para o betão sem borracha (Hernández-Olivares e Barluenga 2004).

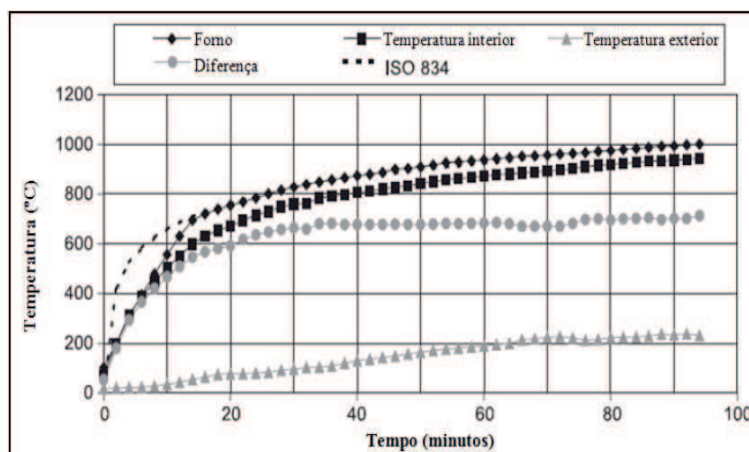


Figura 2.9 - Curvas de temperatura em função do tempo para o betão com 3% de substituição de borracha (Hernández-Olivares e Barluenga 2004).

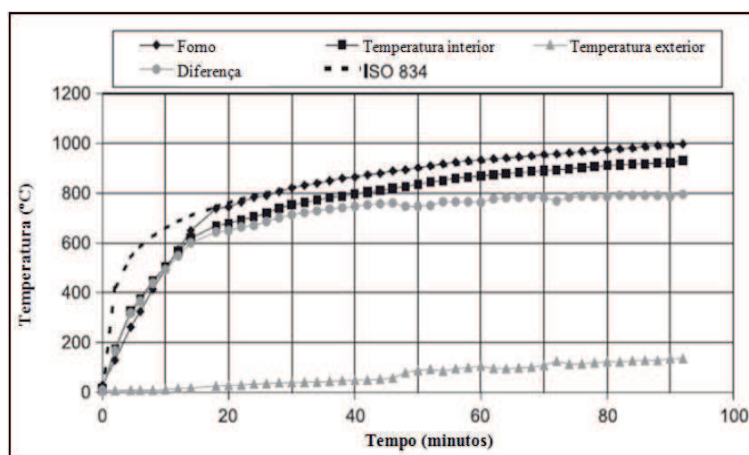


Figura 2.10 - Curvas de temperatura em função do tempo para o betão com 5% de substituição de borracha (Hernández-Olivares e Barluenga 2004).

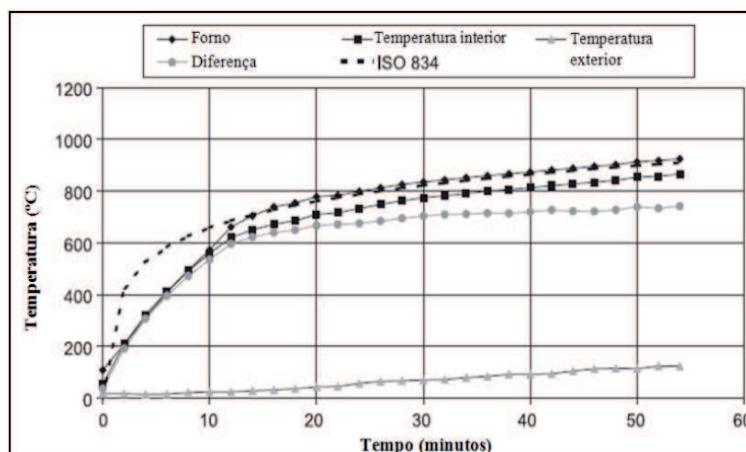


Figura 2.11 - Curvas de temperatura em função do tempo para o betão com 8% de substituição de borracha (Hernández-Olivares e Barluenga 2004).

Os autores verificaram que, no caso do betão sem adição de borracha, a curva relativa à temperatura na superfície externa do betão, sofre um aumento brusco devido ao fenómeno de spalling o mesmo não se verifica nas composições com borracha.

Khaloo et al (2008) estudaram a substituição de agregados minerais por agregados de borracha. Após a realização dos ensaios verificaram que o betão com adição de borracha tornou-se mais dúctil do que o betão com agregados minerais. Também verificaram que a rotura ocorreu de forma mais uniforme e gradual e a largura das fendas foi menor no betão com agregados de borracha do que na do betão de referência, sem borracha. Os autores concluíram ainda que substituições superiores a 25% do agregado mineral por agregados de borracha não era recomendável uma vez que a diminuição da resistência tornava-se muito significativa.

Turki et al (2009) estudaram a influência da adição de agregados de borracha na microestrutura da matriz de betão, variando a adição entre 0% a 50%. As misturas foram analisadas através do método de scanning electron microscopy. Com a utilização deste método, os autores constataram que, pode existir dois tipos de porosidades na matriz de cimento. Sendo a porosidade um fator bastante importante no comportamento químico e físico do betão, deve ser um parâmetro devidamente estudado quando é adicionado este tipo de material a compostos cimentícios.

Valadares (2009) realizou um estudo onde verificou que 15% de substituição de agregados de borracha reciclada conduz a uma redução da resistência à compressão de 50%. Este autor observou que a utilização de borracha de menor dimensão está associada a uma menor redução da resistência. Nesta investigação observou-se também que os métodos de transformação da borracha (trituração mecânica ou processo criogénico) não afetavam de forma significativa a resistência à compressão.

Freitas et al (2009) também observaram uma redução da resistência à compressão de 48,3 % para um volume de agregados de borracha reciclada de 15%.

Viera et al (2010) efetuaram um estudo sobre a influência do tipo e da percentagem de agregados reciclados de borracha inseridos no betão. Os autores analisaram três tipos de agregados de borracha e três volumes de substituição (2,5%, 5% e 7,5%) tendo observado que o betão com a melhor resistência à compressão continha apenas 2,5% de agregados reciclados de borracha com a dimensão de 2,4 mm.

Marques (2010) estudou o comportamento ao fogo de betão com agregados reciclados de borracha provenientes de pneu. Foram realizadas várias misturas com diferentes taxas de substituição de agregados naturais por agregados reciclados de borracha (0, 5, 10 e 15% respetivamente) e foram ensaiados a temperaturas de 20°C, 400°C, 600°C e 800°C.

Os resultados obtidos são observáveis na figura 2.12.

O autor verificou que a resistência à compressão sem exposição térmica apresentou um decréscimo nas várias misturas com adição de borracha. Verificou ainda que para as temperaturas de 400°C e 600°C o efeito da incorporação da borracha no betão não se traduziu numa perda de resistência significativa. Para a exposição de 800°C, ocorreu uma redução de resistência residual mais acentuada.

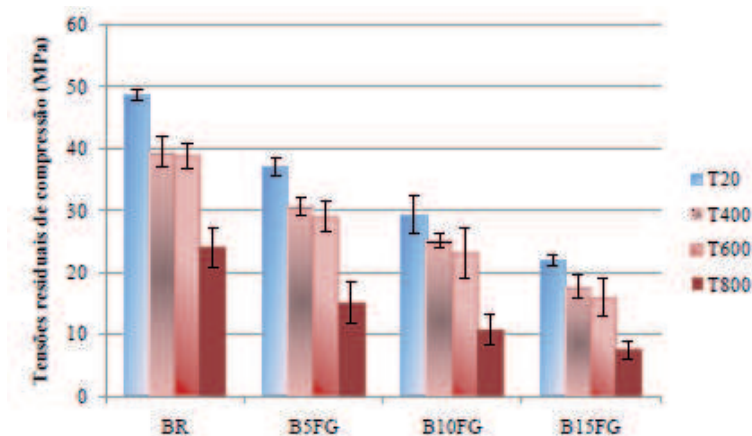


Figura 2.12 - Resistência residual à compressão (Marques, 2010).

Gesoğlu et al (2011) tinham como objetivo estudar a permeabilidade e a resistência dos betões auto-compactáveis e substituíram os agregados finos por agregados de borracha, 0%, 5%, 15% e 25% respetivamente em volume, e substituíram o cimento por cinzas volantes. A resistência apresentou uma redução acentuada nas composições com maior taxa de agregados de borracha. Quanto à absorção de água, diminuiu com o aumento de agregados de borracha, no entanto, este efeito negativo pode ser melhorado com presença de cinzas volantes.

Cuong Ho et al (2012) estudaram o efeito da adição de agregados de borracha (0 a 4 mm) no betão a temperaturas de 20°C, 40°C e 70°C. Foram testadas quatro misturas, uma de referência e três com agregados de borracha como se observa no quadro 2.2.

Quadro 2.2 - Composição dos betões (Cuong Ho et al, 2012).

Composição	C0R	C20R	C30R	C40R
Cimento	323			
Areia (0 - 4 mm)	872	698	611	524
Agregados de Borracha (0 - 4 mm)	0	79	118	157
Cascalho (4 - 10 mm)	967			
Água	153			
Super-Plastificante	3,03	3,29	3,61	3,99
Estabilizador	0,91			

Após a realização dos ensaios, os autores verificaram que os provetes com agregados de borracha apresentaram uma rotura mais lenta do que os provetes de betão sem agregados de borracha. Através do método acústico aplicado verificou-se que antes da carga de pico há o aparecimento de micro - fissuras, mas a diferença entre a mistura de referência com as misturas com agregados de borracha era pouco significativa. Como era esperado as misturas com os agregados de borracha tiveram um aumento na qualidade elástica do material.

Bayramov et al (2004) realizaram estudos com o objetivo de otimizar os betões de alta resistência reforçaram-nos com fibras de aço de modo a obter ductilidade superior aos betões normais e aumentar a capacidade de absorção de energia. Os resultados obtidos permitiram verificar que o diâmetro e a orientação das fibras de aço desempenham um papel importante na resistência à compressão do betão.

Lau e Anson (2006) estudaram as propriedades mecânicas de betões normais e betões de alta resistência quando submetidos a diferentes níveis de temperaturas. Estudaram ainda o efeito da inserção de 1% de fibras de aço como reforço nos dois tipos de betão. Neste estudo os autores constataram que quanto maior for a taxa de aumento de temperatura menor é a permeabilidade do betão e maior o risco do betão sofrer spalling. A adição de fibras de aço melhora o desempenho do betão, independentemente da mistura e da temperatura máxima atingida e melhora a sua resistência à compressão.

Çavdar (2012) estudou o efeito da adição no betão de fibras com o objetivo de determinar a contribuição das referidas adições no comportamento mecânico do betão quando sujeito a elevadas temperaturas. O autor concluiu que a resistência à compressão diminui à medida que a temperatura aumenta, perdendo as misturas com

fibras cerca de 40-50% aos 450°C e 55-70% aos 650°C. A diminuição da resistência à compressão é menor quando a proporção de fibras adicionadas à mistura está compreendida entre os 0,5 e os 1,5% para qualquer nível de temperatura em estudo.

Bangi e Horiguchi (2012) estudaram a influência do comprimento, do diâmetro e do tipo de fibra a utilizar de modo a diminuir a pressão interna dos betões de alta resistência quando estão sujeitos a elevadas temperaturas. Os autores observaram uma redução significativa da pressão nos poros das misturas, independentemente do tipo de fibra aplicada e da sua geometria. Os autores verificaram também que as adições de fibras de aço atenuam o aparecimento de fissuração e as fibras de polipropileno o spalling, uma vez que estas últimas vão derreter para temperaturas na ordem dos 170°C, criando canais por onde o vapor se pode escapar do interior para o exterior do elemento, reduzindo assim a pressão interna nos poros da mistura.

2.3 Considerações finais

O levantamento de estudos já realizados permitiu conhecer melhor os diversos estudos já realizados permitindo uma melhor análise/comparação com a presente investigação.

Pode-se verificar que a massa volúmica sofre um decréscimo com o aumento da percentagem de agregados reciclados de pneu devido às diferenças de valores desta propriedade.

Quanto à resistência à compressão existe um decréscimo com o aumento da percentagem de agregados de borracha.

A adição de fibras apresenta-se como sendo uma boa solução para controlar a fendilhação e o spalling no betão quando submetido a altas temperaturas, tal como se pode constatar através dos diferentes estudos apresentados.

Em suma, os diversos estudos apresentados conduziram a conclusões semelhantes: sob o efeito de altas temperaturas a resistência à compressão do betão diminui e desenvolvem-se condições propícias para o surgimento do spalling – nomeadamente no betão de alta resistência.

3. Material e Métodos

3.1 Considerações iniciais

Neste capítulo apresenta-se os processos desenvolvidos para o trabalho experimental nomeadamente as diferentes misturas de betão: betão normal (betão de referência (sem fibras)), betão com fibras de aço recicladas de pneu, betão com fibras têxteis recicladas de pneu e betão de mistura (constituído por fibras de aço e fibras têxteis recicladas de pneu).

O estudo experimental apresentado pretendeu avaliar a resistência à compressão, a altas temperaturas, de betão com adição de fibras de aço e fibras têxteis provenientes da reciclagem de pneu em fim de vida útil. Para estudar o comportamento mecânico dos diferentes tipos de betão realizaram-se ensaios de resistência à compressão à temperatura de 20°C (temperatura ambiente), de 300°C, de 500°C e de 700°C para um nível de carregamento de $0,5f_{cd}$.

3.2 Composição do betão

Para a caracterização do betão quanto à sua resistência, durabilidade e economia, é decisivo a dosagem dos componentes do betão, como o cimento, os agregados e a água.

A betonagem foi realizada no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. As quantidades de cimento e agregados utilizados em cada amassadura foram verificados por meio de pesagem. As quantidades de água e superplastificante foram determinadas por medição de volume. A mistura de componentes foi feita com o auxílio de uma betoneira de eixo vertical.

Em cada amassadura foram retirados três cubos de 150mm de aresta para a determinação da resistência à compressão (f_c) e controlo de qualidade. Após a betonagem, os provetes foram curados em câmara húmida, durante 28 dias, sujeitos a condições de temperatura (20°C) e humidade (95%) controladas.

Para as quatro composições de betão foi usado um cimento (CEM) do tipo II/A-L 42,5R, dois tipos de agregados: areia fina (<4mm) (AF) e brita calcária (BC) (6,3 – 16 mm) (Figura 3.1a e 3.1b). A escolha do cimento deve-se ao facto de este ser um produto com boa trabalhabilidade, grande versatilidade, elevada resistência e um bom comportamento a altas temperaturas.

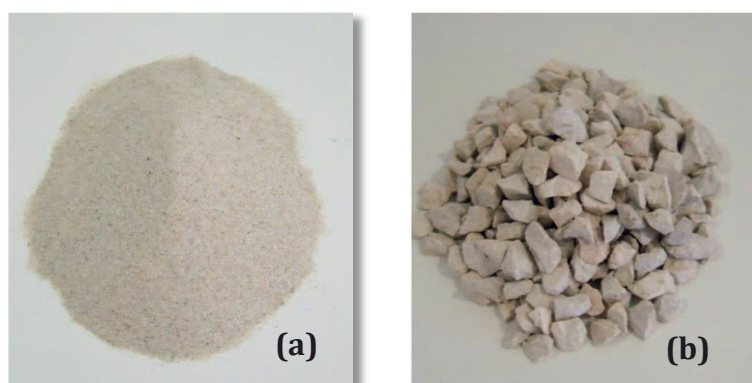


Figura 3.1 - Tipos de agregados: (a) - Areia fina; (b) - Brita calcária.

No quadro 3.1 apresentam-se as massas volúmicas dos agregados, do cimento e da água usados nas composições dos diferentes betões em estudo.

Quadro 3.1 - Massas volúmicas dos agregados

	Massa Volúmica - ρ [kg/m ³]
Água (A)	1000
Areia fina (AF)	2600
Brita Calcária (BC)	2700
Cimento (CEM)	3100

Quanto às composições do betão, consideraram-se quatro com a mesma relação água/cimento ($A/C=0,43$), diferindo apenas no tipo de fibras incorporadas nas misturas em substituição da brita calcária. Estudou-se uma composição de referência (BR) sem adição de fibras; uma composição com 50kg/m³ de fibras de aço recicladas de pneu (BFA) (Figura 3.2a); uma composição com 3kg/m³ de fibras têxteis recicladas de pneu (BFT) (Figura 3.2b); e por fim uma composição com uma mistura de 50kg/m³ de fibras de aço mais 3kg/m³ de fibras têxteis recicladas de pneu (BM).

Neste caso decidiu-se substituir a brita calcária (agregado de maior dimensão) pelas fibras porque, por um lado, as fibras têxteis permitem a saída de vapor do betão em caso de incêndio e assim evita-se o surgimento do spalling, por outro lado, as fibras de aço superam as tensões de origem térmica geradas.

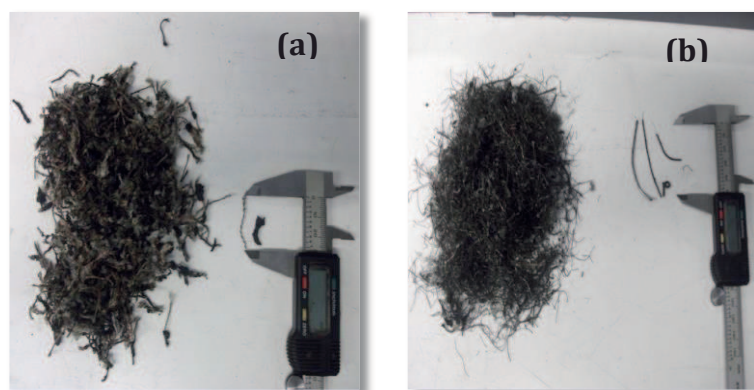


Figura 3.2 - Fibras recicladas de pneu: (a) - Fibras têxteis; (b) - Fibras de aço.

No quadro 3.2 pode-se observar as características físicas dos dois tipos de fibras aplicadas. Para a determinação das massas volúmicas das fibras de aço e têxteis foi utilizado o processo indicado na Norma NP EN 1097-3 (2000), recorrendo ao uso de um picnómetro.

Quadro 3.2 - Características das fibras de aço e fibras têxteis

Fibras	Massa Volúmica [kg/m³]	Comprimento [mm]	Diâmetro [mm]
Têxteis	1091	11,9 - 30	1
Aço	6787	7 - 55	0,2 - 2,1

É imprescindível a obtenção das dimensões máximas dos agregados naturais constituintes do betão, uma vez que o aumento da máxima dimensão dos agregados implica uma maior dificuldade de vibração do betão no seu estado fresco, assim como um aumento do efeito parede, facto associado ao aumento do índice de vazios. O efeito parede define-se como o fenómeno de movimentação da argamassa para as faces dos moldes e armaduras, caso existam. Este efeito provoca alterações na capacidade do betão criando espaços vazios na mistura.

Deve ser verificado o critério de Faury, para não ocorrer o efeito de parede:

- $H = 200 \text{ mm}$
- $\varnothing = 75 \text{ mm}$
- $h/\varnothing = 3$

$$R/D_{\text{máx}} > 0,75 \Leftrightarrow D_{\text{máx}} < \frac{4}{3}R$$

Em que:

- $D_{\text{máx}}$ – dimensão máxima do agregado (mm);
- R – raio médio do molde (mm).

$$R = \frac{\text{(Volume a encher de betão)}}{\text{(Área total das paredes)}}$$

$$V = \pi \times r^2 \times h = 883572,934 \text{ mm}^3$$

$$A = 2 \times \pi \times r \times h + 2 \times (\pi \times r^2) = 55959,62 \text{ mm}^2$$

$$R = \frac{883572,93}{55959,62} \Leftrightarrow R = 15,79 \text{ mm}$$

Assim sendo:

$$D_{\text{máx}} < \frac{4}{3} \times 15,79 \Leftrightarrow D_{\text{máx}} = 21,05 \text{ mm}$$

Confirma-se que o agregado passa sem segregação entre as paredes do provete, sem criação de espaços vazios, não ocorrendo o efeito de parede.

No quadro 3.3 apresenta-se a composição granulométrica dos agregados utilizados no fabrico do betão e na figura 3.3 visualiza-se as suas curvas granulométricas. O referido estudo seguiu as indicações da Norma Portuguesa NP EN 933-1 (2000).

Quadro 3.3 - Composição granulométrica dos agregados.

Peneiro		Agregados Passados (%)	
(")	(mm)	Areia	Brita
200	0,074	0.92	0.53
100	0,149	5.53	0.53
50	0,297	16.49	0.53
30	0,59	40.57	0.53
16	1,19	71.24	0.53
8	2,38	95.31	0.53
4	4,76	96	1.94
3/8"	9,52	100	70.51
1/2"	12,7	100	99.14
3/4"	19,1	100	100
1"	25,4	100	100
1 1/2"	38,1	100	100
2"	50,8	100	100
3"	76,2	100	100
Módulo de Finura		2,75	6,25

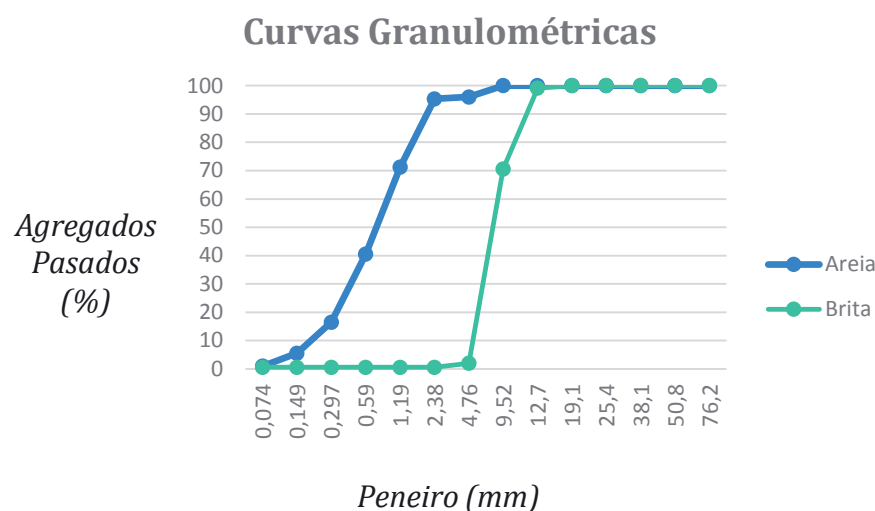


Figura 3.3 - Curvas granulométricas dos agregados.

3.3 Provetes

Conforme as recomendações do RILEM TC-200 HTC, os provetes têm de ter forma cilíndrica, em que a relação comprimento/diâmetro encontrar-se-á entre 3 e 5. Para este estudo foram usados provetes em moldes cilíndricos de poliestireno expandido com 225 mm de altura, 30 mm de espessura e 75 mm de diâmetro interno, com uma relação de altura/diâmetro de 3:1.

No Quadro 3.4, apresentam-se resumidamente os ensaios realizados no betão à temperatura ambiente, bem como os ensaios realizados a altas temperaturas (quadro 3.4).

Quadro 3.4 - Plano de ensaios.

Ensaio	Forma e dimensões do provete [mm]	Temperatura [°C]	Nível de carregamento
Resistência à compressão	Cúbico, 150 Cilíndrico, 75:200 (Ø:d)	20, 300, 500, 700	0,5 f_{cd}

Para avaliar as temperaturas nos provetes, foram inseridos cinco termopares tipo K (Cromo-Alumel), três no interior do provete e dois á superfície, com 0,5mm de diâmetro.

Um termopar é constituído por dois fios de metais diferentes, um fio positivo (Cromo) e um fio negativo (Alumel) que são ligados eletricamente numa extremidade (junção de medição) e ligados termicamente na outra extremidade (junção de referência). Esta junção dos fios foi realizada através de um processo de soldadura com mercúrio, o que gerou uma ligação mais homogênea para a propagação da temperatura. O processo usado para efetuar a soldadura pode-se visualizar na figura 3.4.

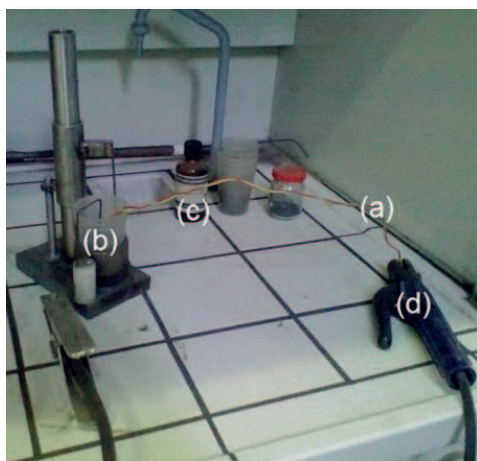


Figura 3.4 - Sistema de soldadura por mercúrio: (a) - Termopar; (b) - Recipiente com mercúrio; (c) - Mercúrio; (d) - Dispositivo de soldadura.

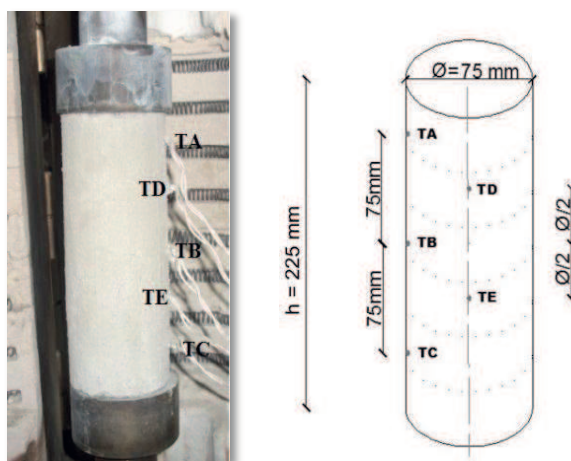


Figura 3.5 - Posição dos termopares no provete.

A localização dos termopares (TA, TB, TC, TD e TE) foi efetuada através das recomendações do RILEM TC-200 HTC, para assim determinar o gradiente térmico em profundidade, como se evidencia na figura 3.5.

Para a disposição dos termopares nos moldes de poliestireno expandido foi necessário recorrer a um fio guia para garantir a sua posição após a betonagem (figura 3.6).

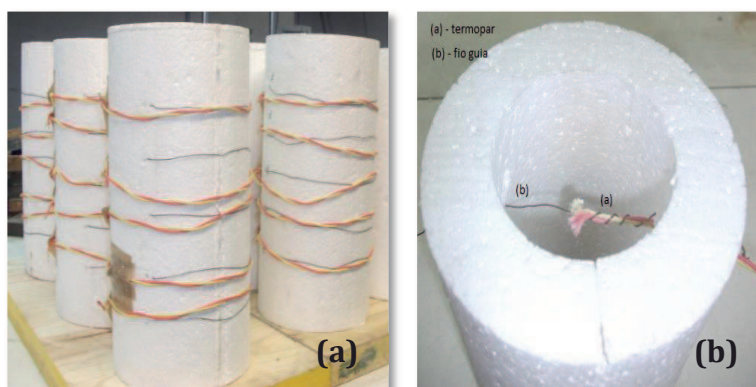


Figura 3.6 - Colocação dos termopares: (a) - Termopar; (b) - Fio guia

Posteriormente à aplicação dos termopares nos provetes e destes serem colados a bases de madeira, efetuou-se a sua betonagem e de seguida foram vibrados recorrendo a uma mesa vibratória (figura 3.7).



Figura 3.7 - Fabrico do betão: (a) - Betoneira; (b) - Betonagem dos provetes; (c) - Vibração dos provetes.

Passados vinte e oito dias de cura, os provetes foram submetidos à retificação das suas faces para obterem as dimensões desejadas de modo a garantirem um paralelismo entre as suas faces externas e a sua ortogonalidade em relação ao eixo do provete. Na figura 3.8 podemos observar os aparelhos necessários para o corte e retificação dos provetes.



Figura 3.8 - Equipamentos: (a) - Corte dos provetes; (b) - Retificação dos provetes.

3.4 Sistema experimental

A figura 3.9 apresenta o sistema de ensaio utilizado no presente estudo experimental.



Figura 3.9 - Sistema de ensaio.

O referido sistema é constituído por uma prensa de tração/compressão SERVOSIS com capacidade de 600 kN (A), um forno cilíndrico SERVOSIS (B) que pode atingir 1200°C de temperatura máxima e com um diâmetro interior de 90 mm e uma altura interior de 300 mm. Do sistema faz ainda parte um DATA LOGGER TDS-601 (C) para a aquisição dos valores necessários (força aplicada, deslocamento e temperaturas do forno e do provete), um controlador do forno (D) e um controlador da máquina de ensaios (E).

Os valores das forças e dos deslocamentos foram monitorizados no controlador da máquina de ensaios e os valores da evolução das temperaturas no provete e no interior do forno foram registados no DATA LOGGER.

3.5 Classe de resistência do betão

As proporções das diferentes composições de betão em estudo estão registadas no quadro 3.5. Para cada composição de betão foram realizados ensaios de resistência à compressão em provetes cúbicos (150 x 150 x 150 mm), determinando a resistência à compressão do betão de acordo com a NP EN 206-1 (2007), foram realizados ensaios de compressão após cura, cujos resultados são apresentados no quadro 3.6. Os provetes foram curados, durante 28 dias, numa sala com um ambiente de vapor saturado (humidade relativa > 98%) e temperatura de 20°C. Após cura, foram removidos e colocados em ambiente de laboratório (temperatura entre os 18°C e 20°C) e humidade (entre 40 e 50%). Os provetes foram testados pelo menos com três meses de idade.

Quadro 3.5 - Composição do betão por m³.

	CEM [kg/m ³]	AF [kg/m ³]	BC [kg/m ³]	A [l/m ³]	A/C	FA [kg/m ³]	FT [kg/m ³]
BR	400	698	1097	173	0,43	-	-
BFA	400	698	1047	173	0,43	50	-
BFT	400	698	1094	173	0,43	-	3
BM	400	698	1044	173	0,43	50	3

Quadro 3.6 - Classe de resistência à compressão.

Tipo de betão	f_{cm} (MPa)	f_{ck} (MPa)	Classe de Resistência
BR	64,65	63,65	C 50/60
BA	67,30	66,30	C 50/60
BT	66,69	65,69	C 50/60
BM	67,11	66,11	C 50/60

3.6 Programa de ensaios

Para cada composição de betão definiu-se a carga de rotura à compressão a aplicar nos ensaios de resistência à compressão a altas temperaturas (quadro 3.7). Assumiu-se um nível de carregamento de $0,5f_{cd}$ uma vez que as combinações de ações assumidas na realidade tomam valores de carregamentos inferiores a 70% e superiores a 30% da carga de rotura. Visto o tempo ser limitado para a realização de ensaios com ambas as cargas, admitiu-se assim um valor de 50% da carga de rotura.

Surgiu a necessidade de estabelecer uma correlação entre os valores obtidos com o tipo de provete utilizado neste estudo, uma vez que os valores regulamentares dizem respeito a provetes com 300 mm de altura e 150 mm de diâmetro. Segundo a norma DIN 1045, a correlação depende, entre outros fatores, do nível de resistência do betão. Assim, a partir do valor médio da resistência à compressão obtido nos provetes cúbicos aos vinte e oito dias foram feitas correlações entre os valores obtidos com intuito de obter a carga a aplicar nos provetes durante os ensaios.

Segundo a norma DIN 1045, através do valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão, f_{ck} , obtido através dos provetes cúbicos (150 x 150 x 150 mm), foi obtido o valor de $f_{ck,200}$ para provetes cúbicos de 200 mm de aresta. Em que $f_{ck,200}$ é o resultado da multiplicação da tensão de rotura do betão à compressão dos provetes cúbicos de 150 mm de aresta por um fator de 0,95. Posteriormente, para se determinar o valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão para provetes cilíndricos, f_{ck} , de 75 mm de diâmetro, foi feita uma multiplicação de $f_{ck,200}$ por um coeficiente de 0,85 que depende do diâmetro do provete e da relação altura/diâmetro. Por último, o cálculo de f_{cd} é a divisão entre o f_{ck} , dos provetes cilíndricos de 75 mm de diâmetro, com o fator de 1,5 como a norma refere.

Quadro 3.7 - Cargas a aplicar nos provetes a altas temperaturas.

Composição do Betão	Provete Cúbicos		Provetes Cilíndricos			
	$f_{ck,150}$ (MPa)	$f_{ck,200}$ (MPa)	$f_{ck,75}$ (MPa)	f_{cd} (MPa)	f_{cd} (kN)	50% f_{cd} (kN)
BR	64,65	61,42	52,20	34,8	153,68	76,84
BA	67,30	63,94	54,34	36,23	159,98	79,99
BT	66,69	63,36	53,85	35,90	158,53	79,26
BM	67,11	63,75	54,19	36,13	159,53	79,76

Quadro 3.8 - Programa de ensaios.

Temperatura	Composição	Nível de Carregamento
20°C	BR	50%
	BFA	
	BFT	
	BM	
300°C	BR	50%
	BFA	
	BFT	
	BM	
500°C	BR	50%
	BFA	
	BFT	
	BM	
700°C	BR	50%
	BFA	
	BFT	
	BM	

No quadro 3.8 apresenta-se o plano de ensaios que se realizou depois de calculadas as cargas a aplicar em cada composição de betão. Em suma, para cada composição de betão foi aplicada uma determinada carga e submetida a quatro níveis de temperatura.

3.7 Procedimento de ensaio

Após a retificação dos provetes e dos cálculos da carga a aplicar efetuado, procedeu-se à realização dos ensaios seguindo as recomendações do RILEM (RILEM TC 129-MHT,2000).

Para a concretização dos ensaios procedeu-se do seguinte modo:

1. Ligação do DATA LOGGER, para adquirir os dados de minuto a minuto e a ligação do controlador da prensa e do forno;
2. Programação do controlador da prensa para uma carga de compressão a uma velocidade de 0,25 kN/s, até que o valor pretendido ($0,5f_{cd}$) fosse atingido. Este é mantido constante ao longo do aquecimento;
3. Configuração do forno para o aquecimento do provete, com uma taxa de $3^{\circ}\text{C}/\text{mim}$, com carregamento constante, até à temperatura desejada (300°C , 500°C e 700°C);
4. Segundo as especificações do RILEM 129 MHT, quando a média das temperaturas dos três termopares superficiais do provete igualar a temperatura do forno, esta era mantida durante um intervalo de 60 ± 5 minutos para a estabilização da temperatura. Averiguação também da diferença de temperaturas entre os termopares do mesmo nível, do interior e do exterior do provete, não devendo esta diferença superar os 20°C ;
5. Realizado todo este processo, colocou-se o provete na base da prensa, centrado para evitar qualquer tipo de excentricidade;
6. Por fim, deu-se início ao ensaio, onde cada provete foi submetido a um carregamento constante, após o aquecimento limite, a carga era aumentada a uma velocidade de 0,25 kN/s.

4. Resultados

Neste capítulo analisam-se os resultados dos ensaios efetuados. É feita também uma apreciação quanto à influência de percentagens de fibras introduzidas na resistência à compressão do betão a altas temperaturas.

São apresentados, em forma de gráficos, os resultados da curva tensão-extensão, que foram adquiridos nos ensaios realizados nos provetes à compressão e sujeitos a altas temperaturas. São apresentados também a evolução das temperaturas nos provetes e no forno para as diferentes composições de betão.

Não são apresentados resultados relativamente ao nível de temperatura de 700°C, visto que todos os provetes, das diferentes composições em estudo, não resistiram a esta temperatura máxima, tendo sofrido rotura.

4.1 Resistência à compressão

A figura 4.1 apresenta a variação da resistência à compressão dos betões em estudo em função da temperatura máxima de exposição, para o nível de carregamento de 0,5 f_{cd} . Constata-se que à temperatura ambiente o betão com fibras de aço provenientes de pneu (BFA) e o betão com fibras têxteis provenientes de pneu (BFT) apresentam um pior desempenho que o betão de referência (BR).



Figura 4.1 - Comparação da resistência à compressão dos betões em estudo.

Da análise da figura 4.1 constata-se ainda que, aos 300°C, houve um aumento da resistência à compressão para o betão de referência, para o betão BFA e para o betão BFT. Situação não similar ocorreu para o betão com mistura das fibras de aço e das fibras têxteis provenientes de pneu (BM) que, qualquer que seja o nível de temperatura atingido, apresenta sempre pior desempenho quando comparado com a temperatura ambiente.

Aos 500°C, os vários tipos de betão em estudo apresentam decréscimos de resistência à compressão, não tendo sido tão significativo para o betão BFA. Para o nível de temperatura de 700°C não são apresentados resultados, uma vez que todos os provetes sofreram rotura antes de atingir este nível de temperatura, impossibilitando que os mesmos fossem ensaiados à compressão.

O quadro 4.1 mostra os resultados obtidos nos vários provetes de betão ensaiados.

Quadro 4.1 - Resistência à compressão dos provetes de betão ensaiados.

Composição	Temperatura (°C)	Nível de carregamento $0,5f_{cd}$ (MPa)	$f_{c,T}$ (MPa)	$f_{cm,T}$ (MPa)	Desvio padrão	$f_{cm,20}$ (MPa)	$\frac{f_{cm,T}}{f_{cm,20}}$
BR	300°C	17,40	85,45	86,27	0,93	83,36	1,03
			87,28				
			86,08				
	500°C		62,96	62,64	0,29		0,75
			62,55				
			62,41				
BFA	300°C	18,11	82,53	82,20	0,29	76,81	1,07
			82,08				
			81,99				
	500°C		78,88	72,79	5,33		0,95
			68,98				
			70,51				
BFT	300°C	17,95	78,43	76,48	2,11	72,36	1,06
			74,93				
			75,63				
	500°C		63,59	62,59	1,35		0,86
			61,06				
			63,12				
BM	300°C	18,06	81,64	74,26	7,19	78,75	0,94
			67,28				
			73,86				
	500°C		58,92	56,42	2,18		0,72
			55,45				
			54,89				

A figura 4.2 apresenta a comparação da variação da resistência à compressão máxima do betão de referência BR e do betão de fibras de aço (BFA).

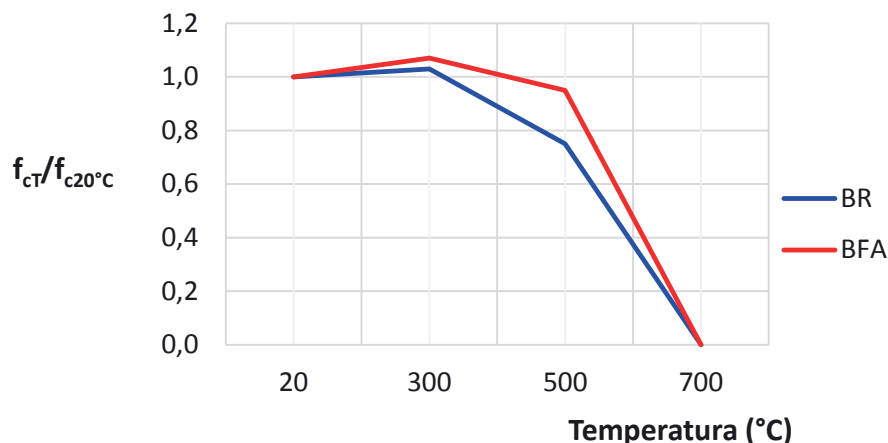


Figura 4.2 - Resistência à compressão do betão de referência (BR) e do betão de fibras de aço (BFA) em função da temperatura.

A análise da figura permite verificar que, nos ensaios a 300°C, houve um aumento de resistência à compressão de cerca de 3% para o betão de referência (BR) e de cerca de 7% para o betão BFA.

Nos ensaios a uma temperatura de 500°C, a resistência à compressão, tanto do betão de referência (BR) como do betão BFA, sofreu um decréscimo, no entanto mais acentuado no betão de referência do que no betão BFA.

A figura 4.3 apresenta a variação da resistência à compressão máxima do betão de referência (BR) com o betão de fibras têxteis (BFT).

Pode-se constatar que no caso do betão BFT houve um acréscimo na resistência à compressão em apenas de 5%, mais 2% do que o betão de referência para uma temperatura de 300°C.

Nos ensaios para a temperatura de 500°C voltou a existir um decréscimo na resistência à compressão para o betão BFT.

Aos 700°C, os provetes sofreram rotura antes de se atingir a temperatura desejada, não sendo possível ensaiá-los à compressão.

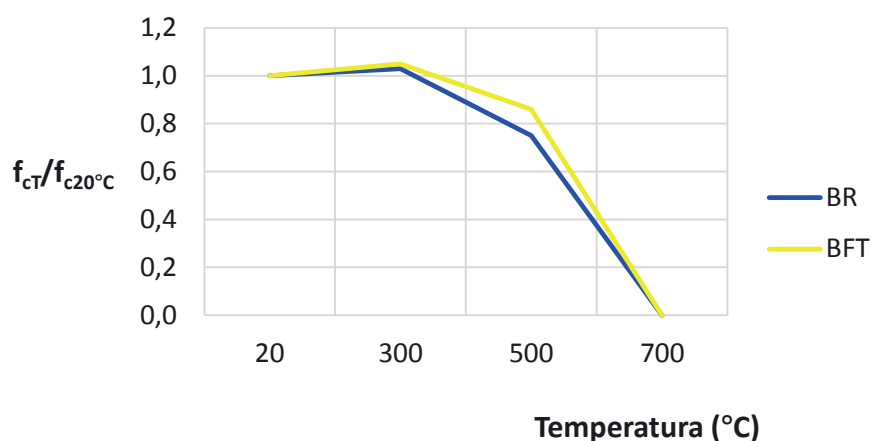


Figura 4.3 - Resistência à compressão do betão de referência (BR) e do betão com fibras têxteis (BFT) em função da temperatura.

A figura 4.4 apresenta os resultados obtidos na série de ensaios com carregamento de $0,5f_{cd}$, para as composições de betão (BR e BM) e para o nível de temperatura máxima de exposição.

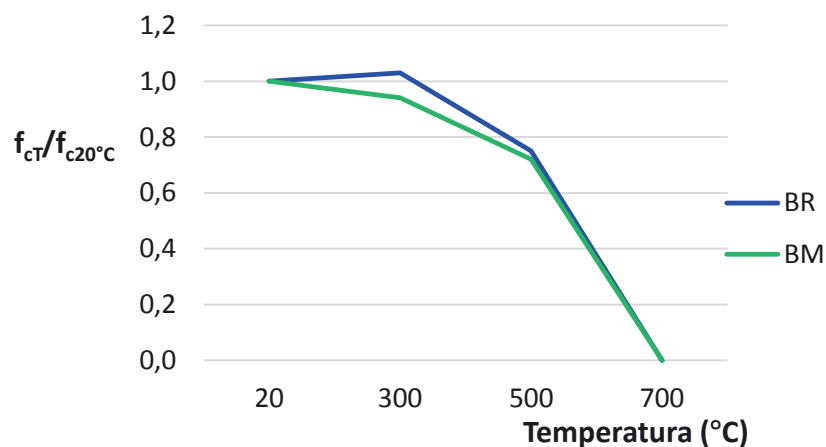


Figura 4.4 - Resistência à compressão do betão de referência (BR) e do betão de mistura (BM) em função da temperatura.

Nesta situação para a temperatura de 300°C verificou-se que o betão BM sofreu imediatamente um decréscimo na resistência à compressão, situação similar se verificou para o nível de temperatura de 500°C.

Aos 700°C e carregamento de $0,5f_{cd}$, os provetes sofreram rotura antes de se atingir a temperatura desejada, não sendo possível ensaiá-los à compressão.

A figura 4.5 apresenta a comparação do comportamento das diferentes composições do betão em estudo.

A análise da figura 4.5 permite concluir que o betão que apresenta um melhor comportamento à compressão, tanto para o nível de temperatura de 300°C como para o nível de temperatura de 500°C, é o betão de fibras de aço (BFA), apresentando valores superiores aos do betão de referência (BR).

O betão de mistura (BM) apresenta valores de resistência à compressão inferiores aos do betão de referência, para os níveis de temperatura em estudo, concluindo-se que este betão não se apresenta como uma solução viável.

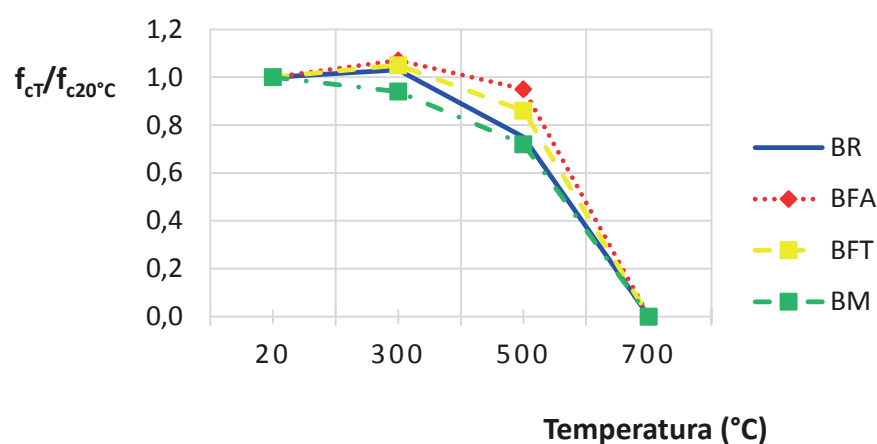


Figura 4.5 - Comparação da resistência à compressão dos betões em estudo.

De salientar, relativamente à resistência à compressão, a composição constituída por fibras de aço (BFA) é a que apresenta um melhor comportamento, uma vez que apresenta valores superiores para os diferentes níveis de temperatura em relação ao betão BR e ao betão constituído pelas fibras têxteis (BFT).

Os resultados analisados anteriormente revelaram uma boa correlação com alguns estudos já efetuados por vários autores. Segundo Çavdar (2011) a resistência à compressão diminui com o aumento de percentagem de fibras têxteis (polipropileno e vidro) introduzida na composição, o mesmo se verifica nos resultados obtidos para a composição BFT.

Relativamente à composição com fibras de aço, verifica-se um aumento na resistência à compressão, como Lau e Anson (2006) concluíram na sua investigação.

Como a quantidade de fibras introduzida nas composições é um fator muito relevante na resistência à compressão do betão, foram desenvolvidos gráficos de forma a comparar o betão de referência com os betões com adição de fibras.

Na figura 4.6 é comparada a composição BR com BFA. Constata-se que a composição de betão BFA tem um melhor desempenho que o betão BR, sendo este facto mais evidente aos 500°C.

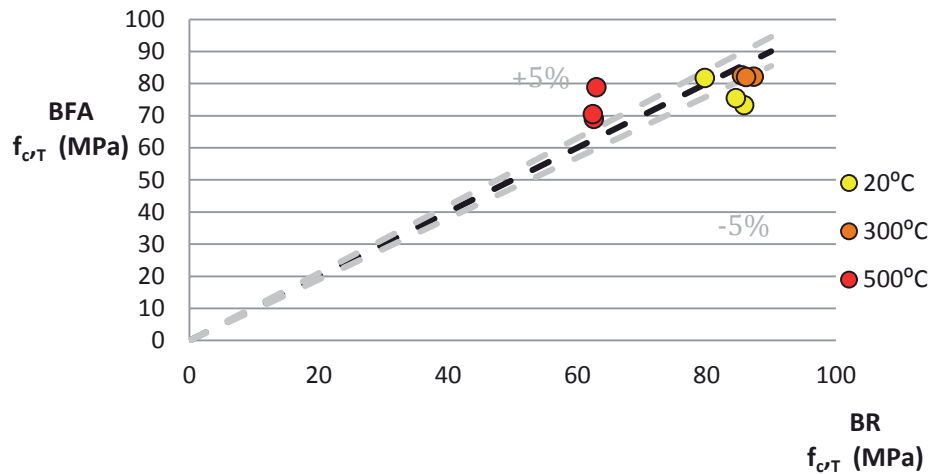


Figura 4.6 - Resistência à compressão - BR e BFA.

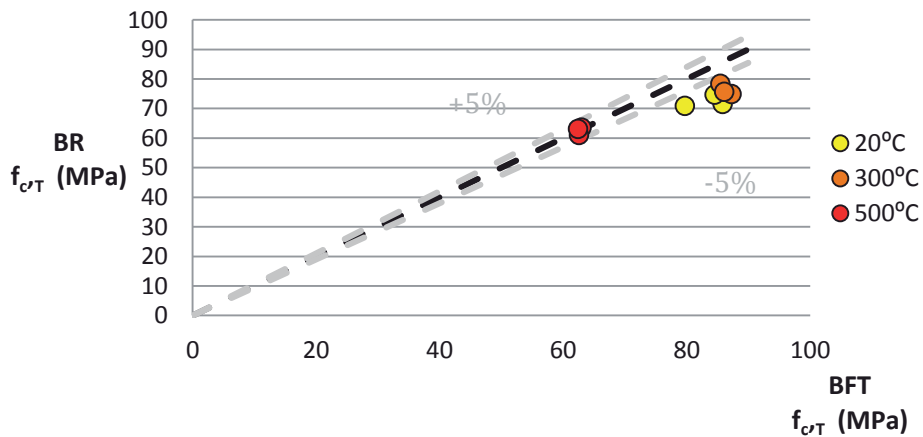


Figura 4.7 - Resistência à compressão - BR e BFT.

Pela análise da figura 4.7 conclui-se que a composição BFT apresenta melhor desempenho a 500°C do que o BR.

Através da figura 4.8 observa-se que o BR apresenta melhor desempenho do que o BM a qualquer temperatura.

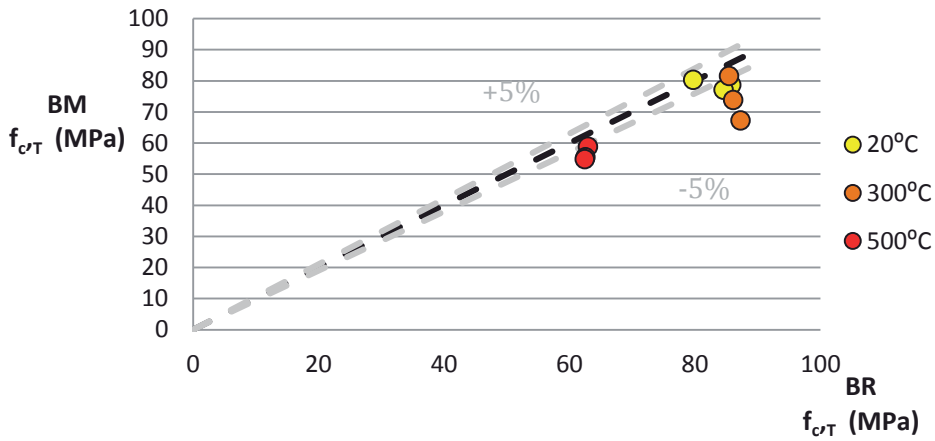


Figura 4.8 - Resistência à compressão - BR e BM.

Como foi referido anteriormente, a quantidade de fibras introduzida nas composições é um fator muito relevante na resistência à compressão do betão. A figura 4.9 compara as duas fibras aplicadas no betão. A análise da figura permite concluir que o betão que apresenta um melhor comportamento à compressão, para qualquer nível de temperatura, é o betão de fibras de aço (BFA).

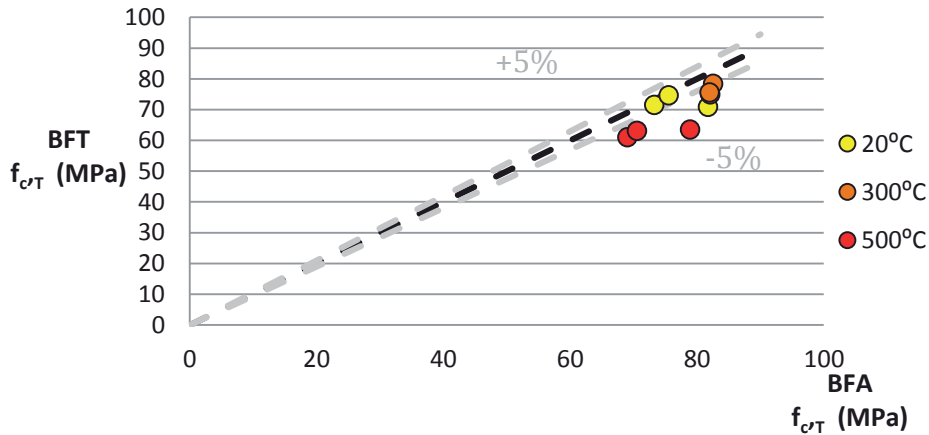


Figura 4.9 - Resistência à compressão - BFA e BFT.

4.2 Gráficos Tensão-Extensão

Durante a fase experimental dos ensaios de resistência à compressão a altas temperaturas foram registados os deslocamentos verticais dos provetes na fase de rotura.

Nas figuras que se seguem apresentam-se as curvas de tensão-extensão obtidas nos ensaios de compressão para os provetes expostos a temperaturas máximas de 20°C, 300°C e 500°C para um nível de carregamento de $0,5f_{cd}$ para os diferentes tipos de composição de betão.

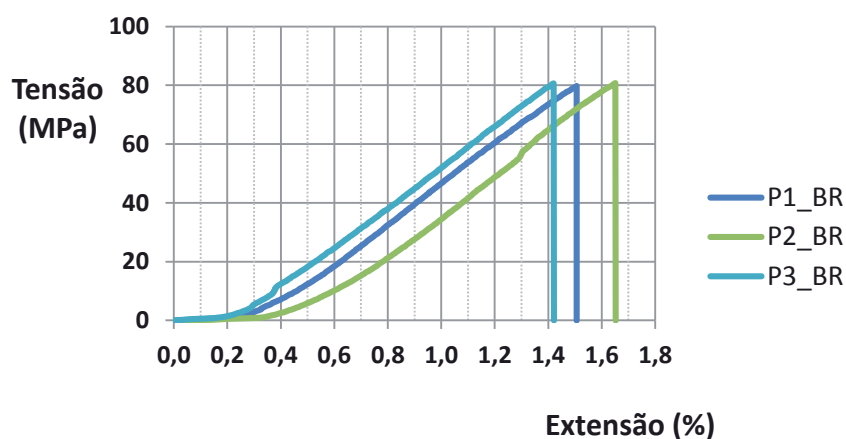


Figura 4.10 - Tensão-extensão dos provetes do BR a 20°C com carregamento de $0,5f_{cd}$.

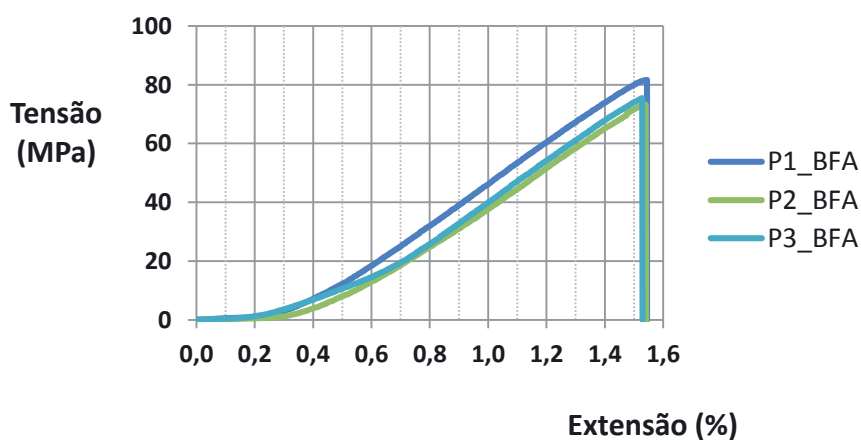


Figura 4.11 - Tensão-extensão dos provetes do BFA a 20°C com carregamento de $0,5f_{cd}$.

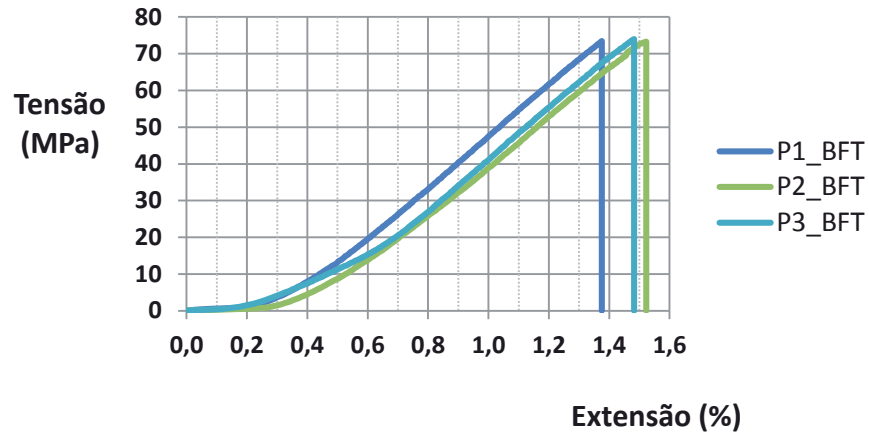


Figura 4.12 - Tensão-estiramento dos provetes do BFT a 20°C com carregamento de $0,5f_{cd}$.

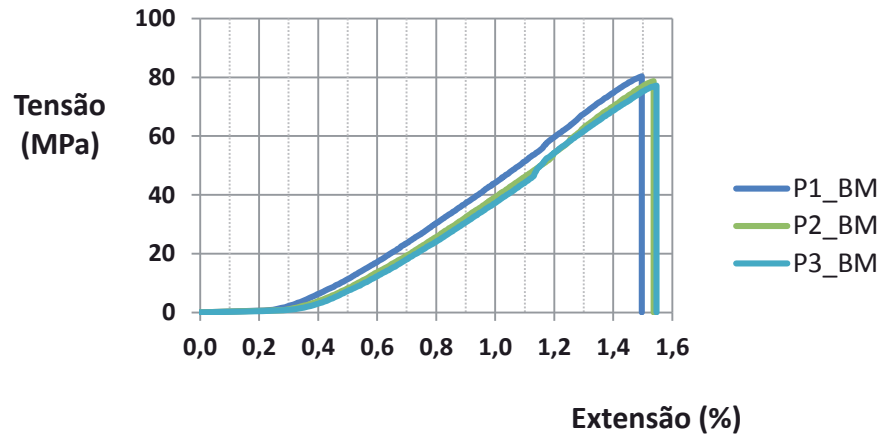


Figura 4.13 - Tensão-estiramento dos provetes do BM a 20°C com carregamento de $0,5f_{cd}$.

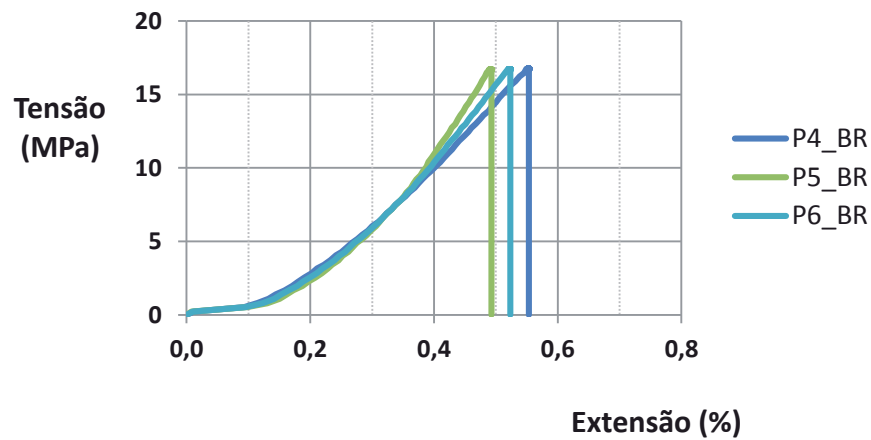


Figura 4.14 - Tensão-estiramento dos provetes do BR a 300°C com carregamento de $0,5f_{cd}$.

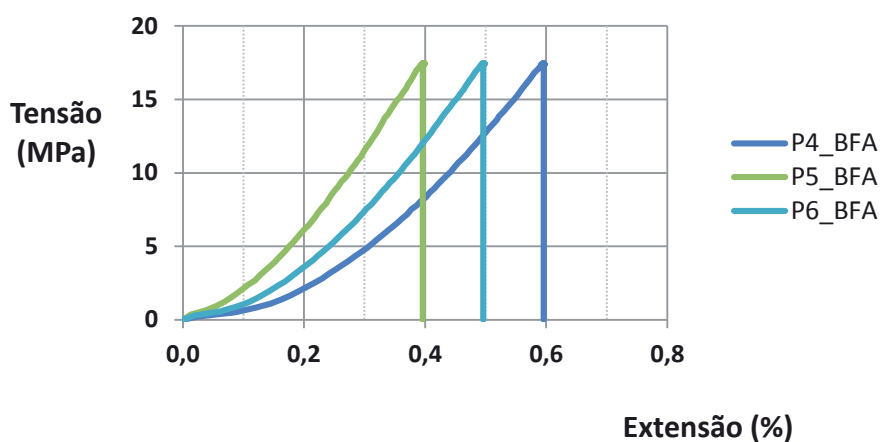


Figura 4.15 - Tensão-estiramento dos provetes do BFA a 300°C com carregamento de $0,5f_{cd}$.

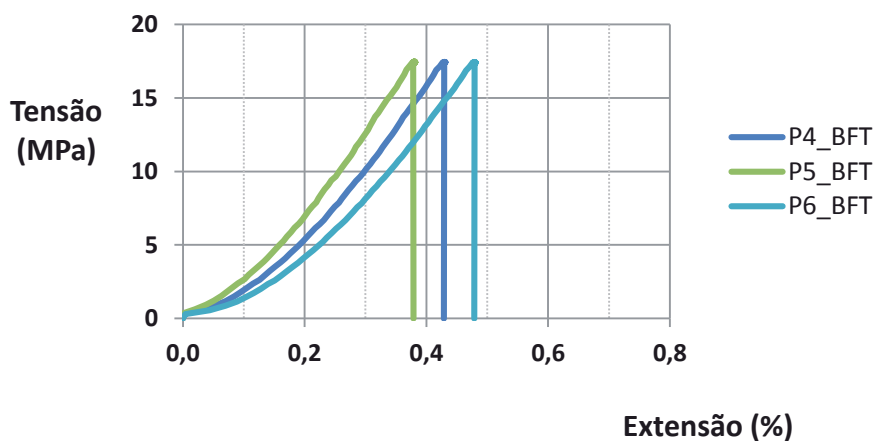


Figura 4.16 - Tensão-estiramento dos provetes do BFT a 300°C com carregamento de $0,5f_{cd}$.

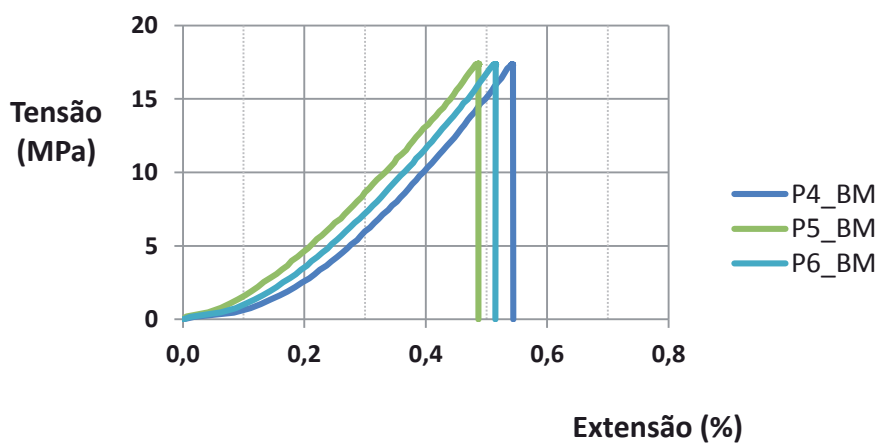


Figura 4.17 - Tensão-estiramento dos provetes do BM a 300°C com carregamento de $0,5f_{cd}$.

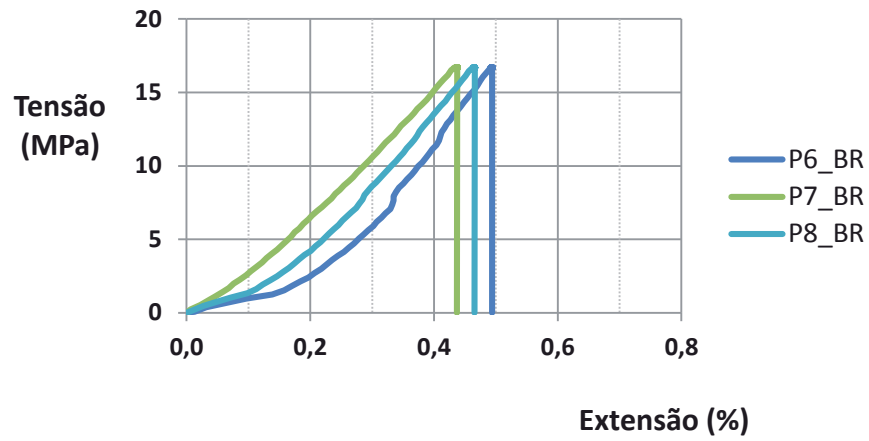


Figura 4.18 - Tensão-extensão dos provetes do BR a 500°C com carregamento de 0,5f_{cd}.

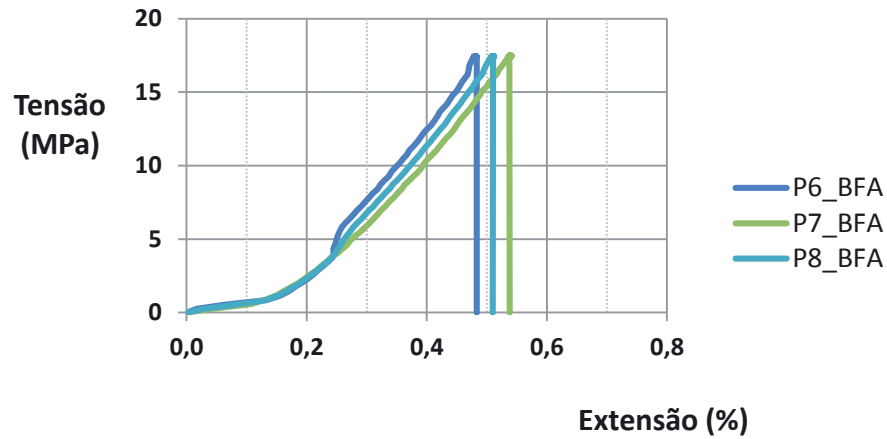


Figura 4.19 - Tensão-extensão dos provetes do BFA a 500°C com carregamento de 0,5f_{cd}.

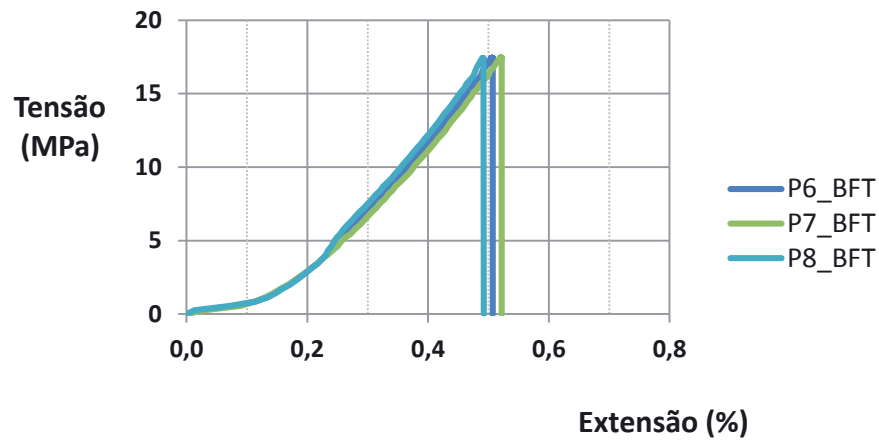


Figura 4.20 - Tensão-extensão dos provetes do BFT a 500°C com carregamento de 0,5f_{cd}.

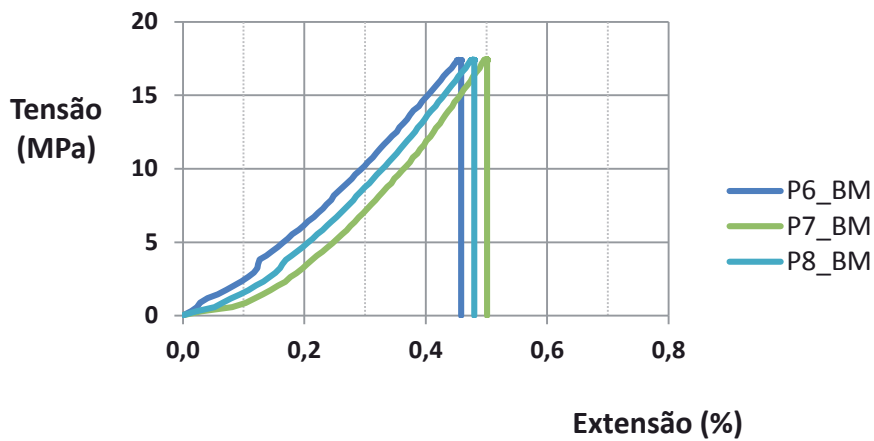


Figura 4.21 - Tensão-extensão dos provetes do BM a 500°C com carregamento de $0,5f_{cd}$.

Verifica-se que para a temperatura de 300°C o provete de betão BFA apresenta uma extensão superior ao provete de betão BFT.

Analisando os valores para as várias temperaturas, conclui-se que os valores da extensão diminuem á medida que a temperatura aumenta até aos 500°C.

4.3 Evolução de temperaturas

As figuras 4.22, 4.23, 4.24, 4.25 e 4.26 apresentam a evolução da temperatura no interior do forno e na secção transversal do provete de betão de referência, do provete de betão BFA, do provete de betão BFT e do provete de betão BM para o nível de temperatura de 300°C.

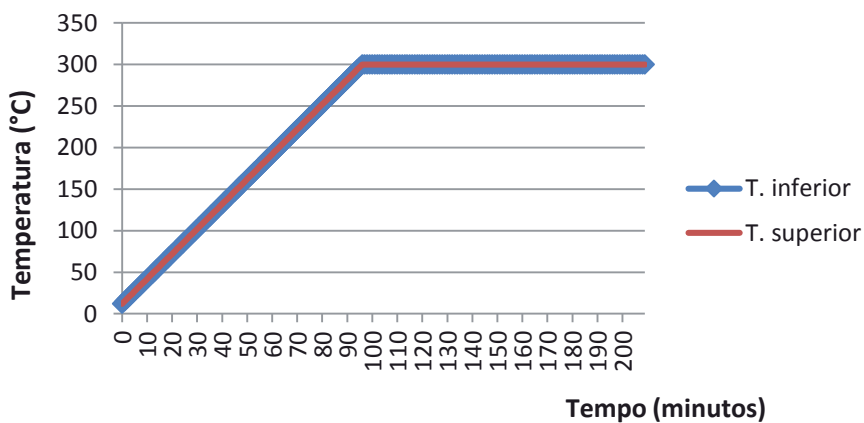


Figura 4.22 - Evolução da temperatura no forno - série de 300°C.

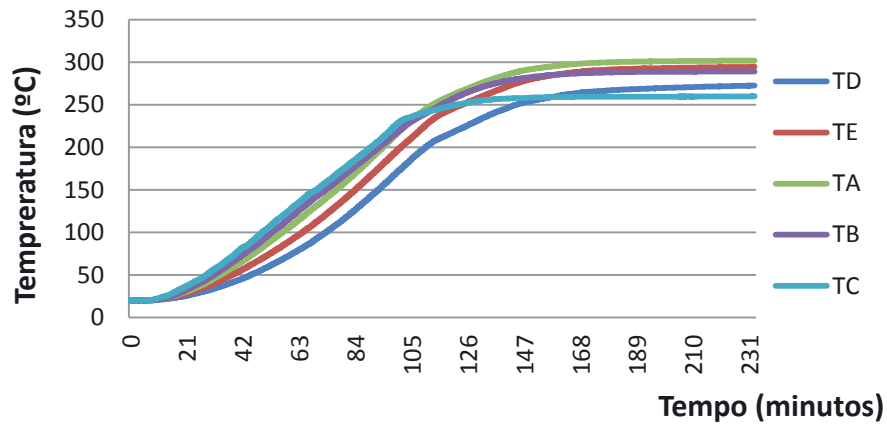


Figura 4.23 - Evolução da temperatura na secção transversal do provete BR - série de 300°C.

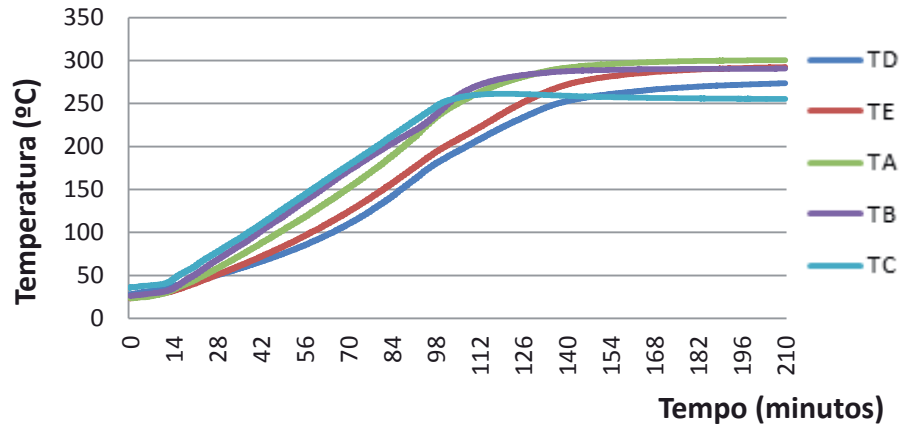


Figura 4.24 - Evolução da temperatura na secção transversal do provete BFA - série de 300°C.

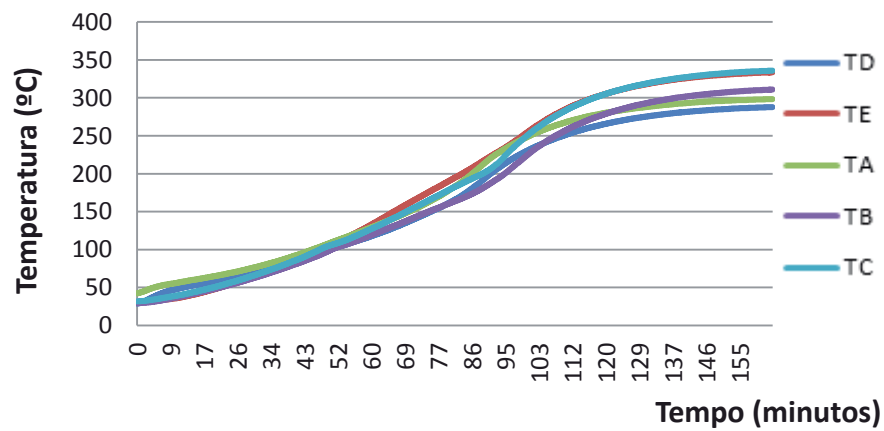


Figura 4.25 - Evolução da temperatura na secção transversal do provete BFT - série de 300°C.

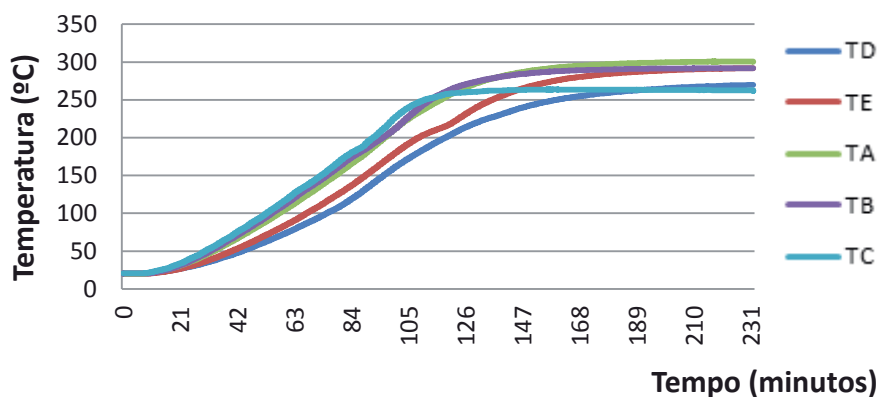


Figura 4.26 - Evolução da temperatura na secção transversal do provete BM - série de 300°C.

A figura 4.22 mostra a evolução da temperatura no interior do forno, ao nível do seu termopar superior e inferior, nos ensaios realizados para nível de temperatura máxima de 300°C. Da análise da figura verifica-se que o termopar localizado na parte superior do forno registou valores similares aos existentes na parte inferior do forno. Assim, a temperatura no interior do forno manteve-se bastante uniforme durante os ensaios, pois as curvas de temperatura inferior e superior são praticamente coincidentes. Este facto traduziu-se numa boa exposição térmica a que o provete esteve sujeito no forno cilíndrico.

A figura 4.23 mostra a evolução da temperatura nos termopares, localizados nos provetes, durante os ensaios do betão de referência da série de 300°C. Pode-se observar uma boa uniformidade da temperatura no interior do provete durante o aquecimento e na fase de estabilização da temperatura.

Na figura 4.24 apresentam-se os resultados da evolução da temperatura nos termopares, localizados nos provetes, durante os ensaios do betão com 50% de fibras de aço (BFA) da série de 300°C.

A figura 4.25 apresenta a evolução da temperatura nos provetes durante os ensaios do betão com 3% de fibras têxteis (BFT) para a série de 300°C. Verifica-se que a temperatura pretendida nos provetes foi atingida ao mesmo tempo que o forno atingiu a mesma. Este facto pode dever-se à porosidade do provete em virtude da adição de fibras têxteis na composição do betão e ao facto da taxa de aquecimento ser somente de 3°C/min.

Na figura 4.26 evidenciam-se os resultados da evolução da temperatura nos termopares durante os ensaios do betão com 50% de fibras de aço e 3% de fibras têxteis (BM) para a série de 300°C.

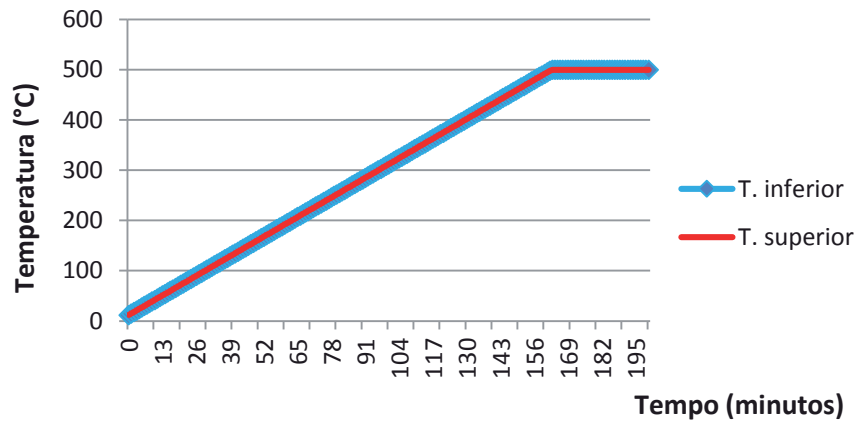


Figura 4.27 - Evolução da temperatura no forno - série de 500°C.

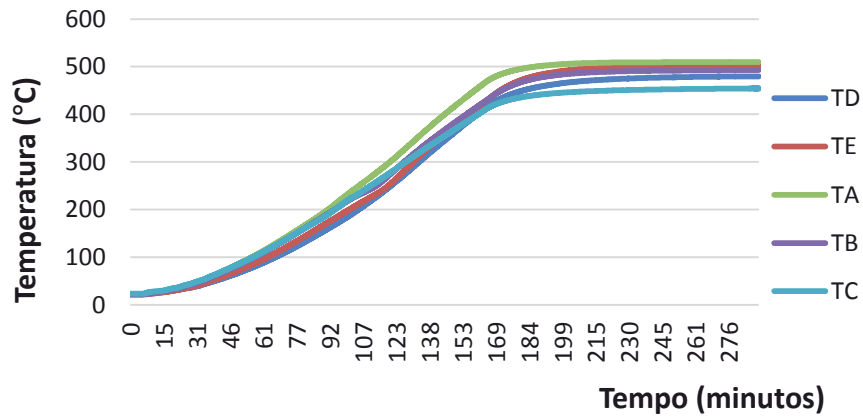


Figura 4.28 - Evolução da temperatura na secção transversal do provete BR - série de 500°C.

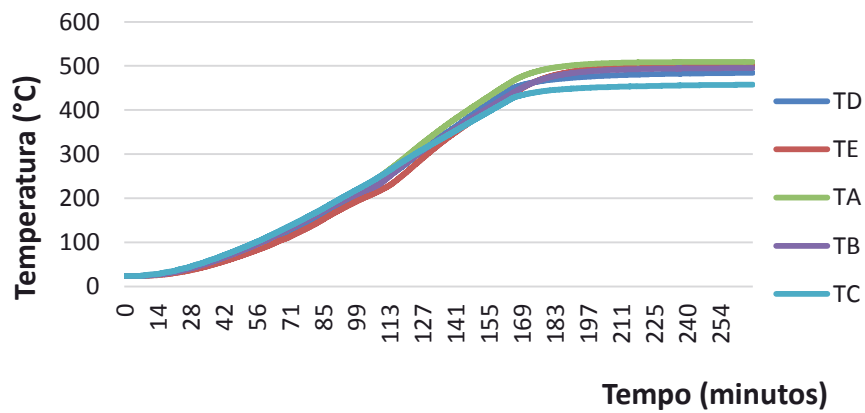


Figura 4.29 - Evolução da temperatura na secção transversal do provete BFA - série de 500°C.

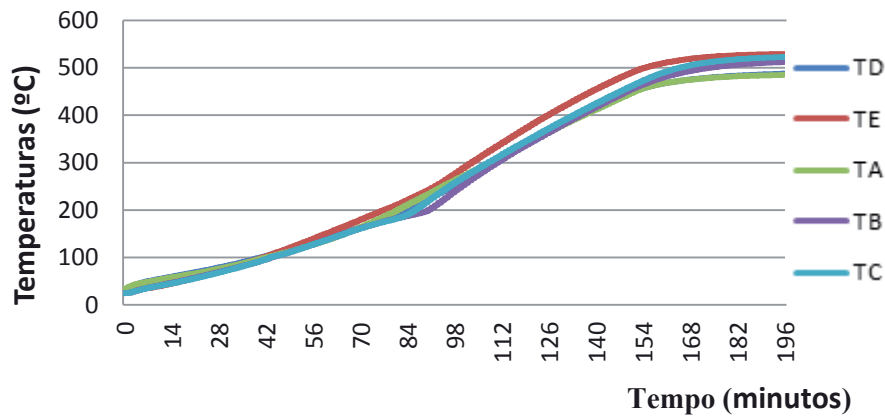


Figura 4.30 - Evolução da temperatura na secção transversal do provete BFT - série de 500°C.

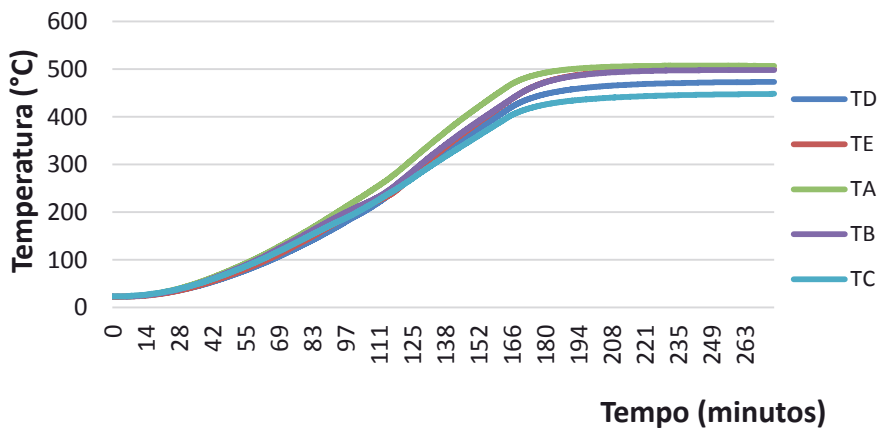


Figura 4.31 - Evolução da temperatura na secção transversal do provete BM - série de 500°C.

A figura 4.27 mostra a evolução da temperatura no interior do forno, ao nível do seu termopar superior e inferior, nos ensaios realizados para nível de temperatura máxima de 500°C. Da análise da figura verifica-se que o termopar localizado na parte superior do forno registou valores similares aos existentes na parte inferior do forno. Assim, a temperatura no interior do forno manteve-se bastante uniforme durante os ensaios, pois as curvas de temperatura inferior e superior são praticamente coincidentes. Este facto traduziu-se numa boa exposição térmica a que o provete esteve sujeito no forno cilíndrico.

A figura 4.28 mostra a evolução da temperatura nos termopares, localizados nos provetes, durante os ensaios do betão de referência da série de 500°C. Pode-se observar uma boa uniformidade da temperatura no interior do provete durante o aquecimento e na fase de estabilização da temperatura.

Na figura 4.29 apresentam-se os resultados da evolução da temperatura nos termopares, localizados nos provetes, durante os ensaios do betão com 50% de fibras de aço (BFA) da série de 500°C.

A figura 4.25 apresenta a evolução da temperatura nos provetes durante os ensaios do betão com 3% de fibras têxteis (BFT) para a série de 500°C. Como se pode observar, os termopares interiores (D e E) registaram menores temperaturas que os exteriores (A, B e C). O interior do provete foi o último ponto a aquecer, embora a variação da temperatura entre os dois pontos medidos no interior do provete fosse pouco significativa pelo que as diferenças entre as temperaturas ao longo do provete foram pequenas, mostrando uma boa uniformidade da temperatura no interior do provete.

Na figura 4.26 evidenciam-se os resultados da evolução da temperatura nos termopares durante os ensaios do betão com 50% de fibras de aço e 3% de fibras têxteis (BM) para a série de 500°C.

4.4 Provetes após ensaios

As figuras seguintes apresentam o registo fotográfico da rotura sofrida pelos provetes após a realização do ensaio de resistência à compressão para a série de 20°C, 300°C e 500°C.

Foi observada uma rotura menos explosiva nos provetes constituídos por fibras de aço, garantindo a eficiência destas fibras na obtenção de um betão mais dúctil e no controlo da fendilhação. Observa-se que quanto maior a quantidade de fibras adicionadas maior os danos apresentados nos provetes.

Verifica-se também que a percentagem de vazios nos provetes com fibras têxteis aumenta com o acréscimo de temperatura. Este facto ocorre devido ao aumento de carbonização nas fibras têxteis ao longo da evolução da temperatura.

4.4.1 Nível de Temperatura 20°C

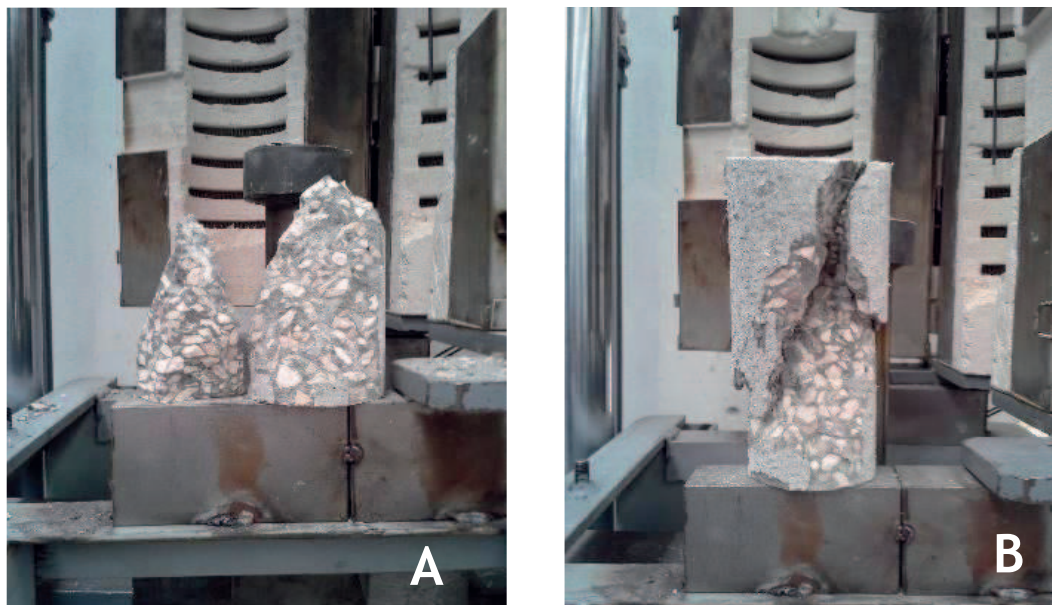


Figura 4.32 - Provete após ensaio: (A) - BR; (B) - BFA.

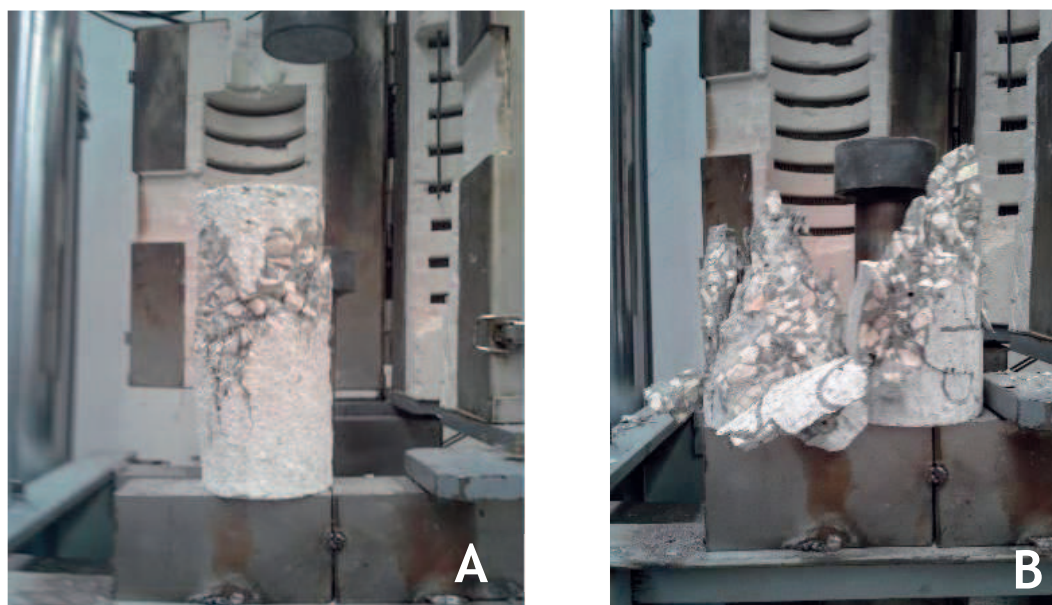


Figura 4.33 - Provete após ensaio: (A) - BFT; (B) - BM.

4.4.2 Nível de Temperatura 300°C

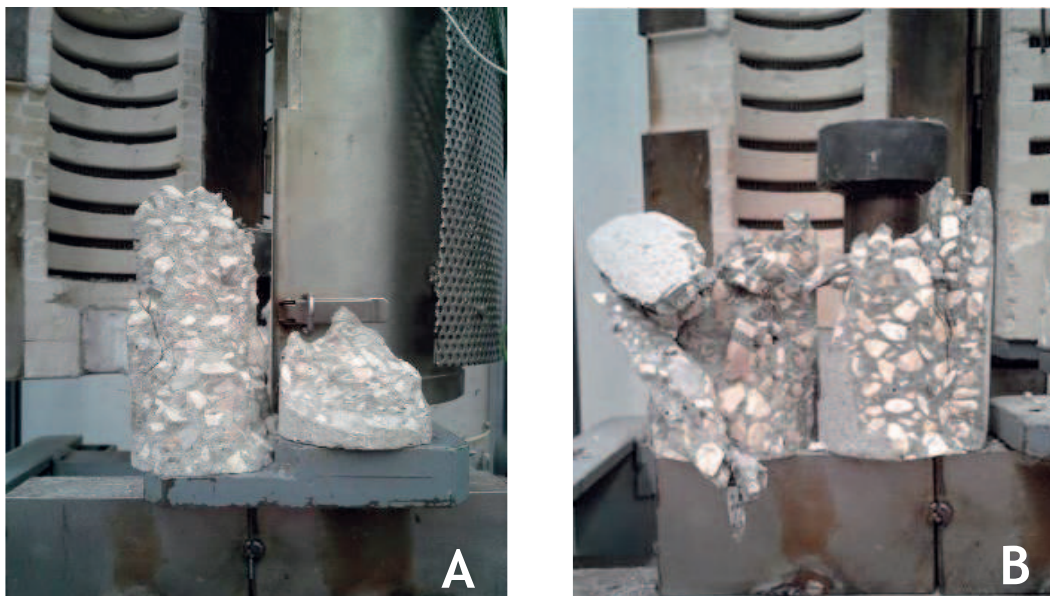


Figura 4.34 - Provete após ensaio: (A) - BR; (B) - BFA.

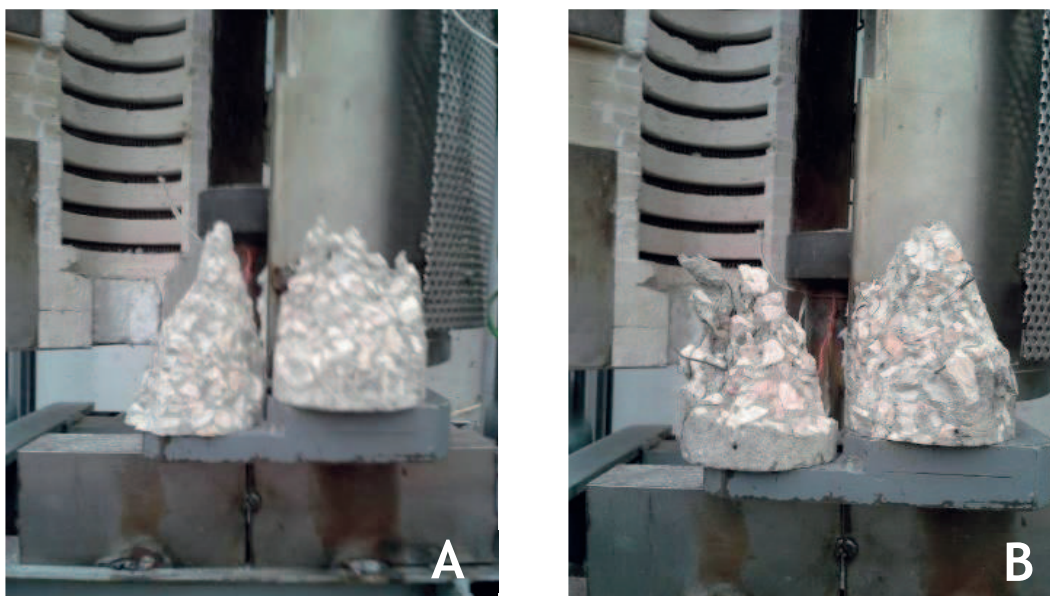


Figura 4.35 - Provete após ensaio: (A) - BFT; (B) - BM.

4.4.3 Nível de Temperatura 500°C

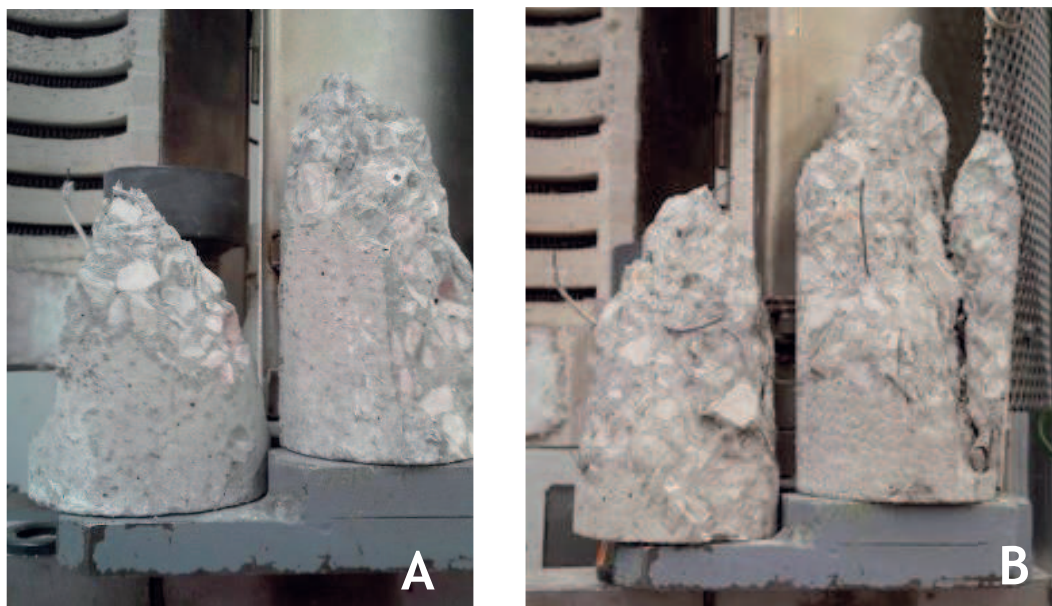


Figura 4.36 - Provete após ensaio: (A) - BR; (B) - BFA.

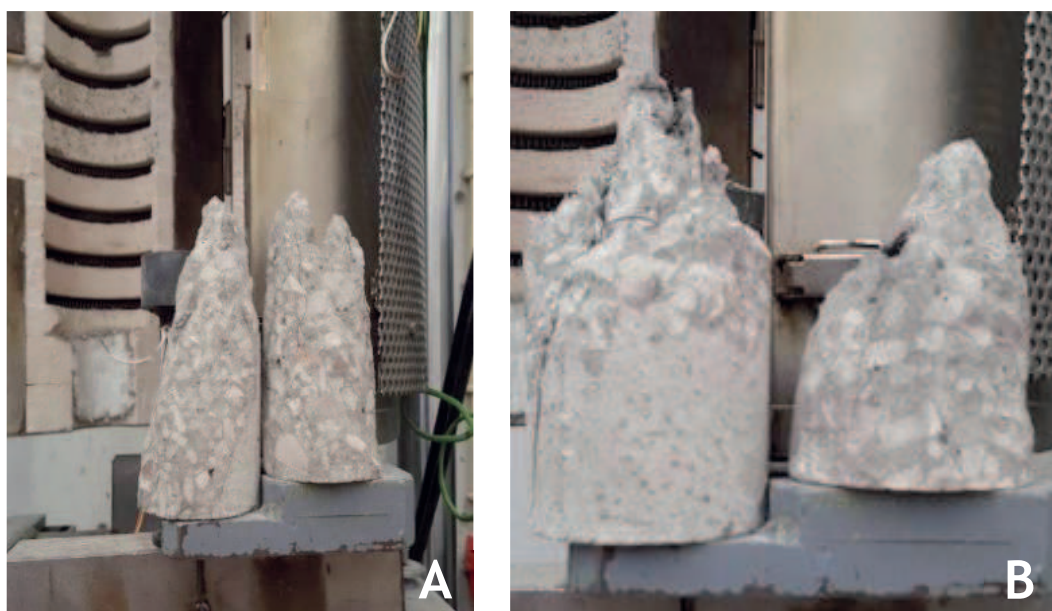


Figura 4.37 - Provete após ensaio: (A) - BFT; (B) - BM.

5. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

5.1 Conclusões

O trabalho experimental desenvolvido permitiu demonstrar que a temperatura afeta negativamente as propriedades mecânicas dos betões. Constatou-se que os betões em estudo sofreram reduções importantes na resistência à compressão quando submetidos a altas temperaturas.

Com a análise efetuada quanto à resistência à compressão do betão com fibras de aço e fibras têxteis recicladas de pneu sujeitas a temperaturas elevadas, retiram-se as seguintes conclusões:

- A resistência à compressão para o betão de referência (BR), BFA e BFT, e para temperaturas da ordem dos 300°C, apresentou um acréscimo. Para temperaturas da ordem dos 500°C, as composições de betão em estudo, revelaram resistências à compressão inferiores às registadas para a temperatura ambiente, 20°C.
- Todas as composições de betão para níveis de temperatura de 700°C não apresentaram valores de resistência à compressão, pois sofreram rotura antes de atingir o nível de temperatura.
- A composição que apresenta maior aumento de resistência á compressão é a composição BFA para os 300°C, pois para os 500°C a sua resistência à compressão é inferior à resistência a 20°C.
- Apesar da composição BFT apresentar também uma maior resistência à compressão para a temperatura a 300°C e para a temperatura de 500°C quando comparada com a resistência à compressão aos 20°C, esta composição apresenta valores inferiores aos da composição BFA.
- A composição BM, quer para a temperatura de 300°C quer para a temperatura de 500°C, apresenta valores de resistência à compressão sempre inferiores à da temperatura de 20°C, o que indica que esta composição não apresenta qualquer vantagem na sua utilização.
- Para a temperatura no interior do forno observou-se durante os ensaios que a temperatura inferior e superior foram praticamente coincidentes ao longo do ensaio, uma vez que a evolução era de 3°C/min até atingir a temperatura ambicionada.
- Verificou-se durante os ensaios que os termopares TB, TC e TD apresentavam maiores valores de temperatura.
- Nos gráficos da evolução da temperatura, observa-se uma boa homogeneidade nas curvas dos termopares colocados nos provetes das quatro composições de

betão, para 300°C e para 500°C. Isto ocorre devido à taxa de aquecimento ter sido apenas de 3°C/min.

- Após os ensaios foi observado uma rotura menos explosiva na composição com fibras de aço.
- As fibras de aço e têxtil de pneus reciclados apresentou-se ser uma boa solução na composição do betão para controlar a fendilhação e o spalling e podem ser um bom substituto para as fibras de aço e polipropileno comerciais.

5.2 Desenvolvimentos futuros

O presente trabalho incidiu essencialmente no estudo da resistência à compressão do betão de alta resistência quando submetido a temperaturas elevadas. No entanto, constata-se que ficaram algumas questões por clarificar, o que leva a necessidade de aprofundar as propriedades mecânicas dos betões com fibras têxteis e/ou de aço recicladas de pneu em fim de vida útil quando expostos a altas temperaturas.

Sublinha-se:

- Avaliar a resistência à compressão a altas temperaturas de betões com quantidades diferentes de fibras têxteis e fibras de aço, com o objetivo de chegar à percentagem de inserção ideal de fibras no betão.
- Realizar ensaios para temperaturas intermédias às consideradas no presente estudo, por exemplo de 50 em 50°C até a resistência do betão ser nula (700°C).
- Estudar a influência das dimensões das fibras na resistência à compressão de betão quando exposto a altas temperaturas.
- Avaliar a influência de diferentes níveis de carregamento na resistência à compressão de composições de betão com fibras ($0,15f_{cd}$, $0,3f_{cd}$, $0,7f_{cd}$ e $1,0f_{cd}$).
- Avaliar a influência do tipo de arrefecimento (natural, água ou espuma) nas propriedades mecânicas de BFT, BFA e BM quando sujeitos a altas temperaturas.
- Proceder a simulações numéricas do comportamento ao fogo dos betões com fibras têxteis e de aço recicladas de pneu.

6. Referências Bibliográficas

Abrams, M. (1971). "Compressive strength of concrete at temperatures to 1600F". ACI, SP-25, Temperature and Concrete Detroit, p. 33-58.

Arioz, Omer (2007) "Effects of elevated temperatures on properties of concrete" Fire Safety Journal 42, Elsevier, p. 516-522.

Bayramov, F., Tasdemir, C., Tasdemir, M.A. (2004). "Optimisation of steel fibre reinforced concretes by means of statistical response surface method". Cement and Concrete Composites, v. 26, p. 665-675.

Bangi, M.R., Horiguchi, T. (2012). "Effect of fibre type and geometry on maximum pore pressures in fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures". Cement and Concrete Research, v. 42, 2012, p. 459-466.

Cánovas, M.F. (1988). "Patologia e Terapia do Concreto Armado". Ed. PINI, São Paulo.

Coutinho, S. (1988). "Fabrico e propriedade do betão". Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, v. 1, 401 p.

Çavdar, A. (2012). "A study on the effects of high temperature on mechanical properties of fiber reinforced cementitious composites". Composites, Part B, v. 43, p. 2452-2563.

DIN 1045-1 (2008). "Beton-technische Daten: Beton nach DIN 1045: 9. Prüfen von Beton, 12, Auflage".

Eldin, N.; Senouci, A. (1993). "Observations on Rubberized Concrete Behavior". Cement, Concrete and Aggregates, v. 15, n.1, p. 74-84.

Eldin, N.; Senouci, A.B. (1993). "Rubber-Tire Particles as Concrete Aggregate". Journal of concrete. Cement and Concrete Composites, v. 5, n.4.

Freita, C.; Galvão, L.; Portella, K.; Joukoski, A.; Filho, C. (2009) "Desempenho físico-químico e mecânico de concreto de cimento Portland com borracha de estireno-butadieno reciclada de pneus". Química Nova, v. 32, p. 913-918.

Georgali, B.; Tsakiridis, P.E. (2005). "Microstructure of fire-damaged concrete. A case study". Cement and Concrete Composites, v. 27, n.2, p. 255-259.

Gesoğlu, M.; Güneyisi, E (2011). "Permeability properties of self-compacting rubberized concretes". Construction and Building Materials, v. 25, Elsevier, p. 3319-3326.

Hernández-Olivares, F.; Barluenga, G. (2004). "Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete". Cement and Concrete Research, v. 34, p. 109-117.

Khaloo, A.R.; Dehestani, M.; Rahmatabadi, P. (2008). "Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles". *Waste Management*, v. 28. Elsevier, p. 2472-2482.

Khoury, G.A. (2000). "Effect of fire on concrete and concrete structures". *Progress in Structural Engineering and Design*, n.156, p 313-321.

Lau A.; Anson M. (2006), "Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete". *Cement and Concrete Research*, v. 36, n.9, p. 1698-1707.

Marques, A. (2010). "Comportamento ao fogo com agregados reciclados de borracha". *Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa*.

Mays, C. (1992). "The behavior of concrete". In: Geoff Mays (Editor), *Durability of concrete structures – Investigation, repair, protection*, E & FN Spon, Chapman & Hall, London, 267 p.

Neville, M. (1995). "Properties of concrete". 4th edition, Longman Group Limited, England, 844 p.

NP EN 206-1 (2007). "Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade". Norma portuguesa, Instituto Português da Qualidade, 84 p.

NP EN 933-1 (2000). "Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração". Norma Portuguesa, Instituto Português da Qualidade, 16p.

NP EN 933-1 (1999). "Ensaio para a determinação das características geométricas dos agregados: Determinação da distribuição granulométrica. Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas." Norma Portuguesa, Instituto Português da Qualidade, 7 p.

NP EN 1097-3 (2000). Ensaio para determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: "Método para determinação da massa volúmica e dos vazios". IPQ.

NP EN 12390-3 (2003). "Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio". Norma Portuguesa, Instituto Português da Qualidade, 21 p.

Phan, L.T.; Carini, N.J. (2000). "Fire performance of High Strength Concrete". *ASCE/SEI Structures Congress*, Philadelphia.

RECIPNEU@ (2015). <http://www.recipneu.com/default.aspx?lang=1>. Empresa Nacional de Reciclagem de Pneus, Lda, (Sines).

RILEM TC 129 HTC (2000). "Test methods for mechanical properties of concrete at high temperature". *Materials and Structures*, v. 33, p. 224-228.

RILEM TC 200 HTC (2005). "Mechanical concrete properties at high temperature – Modelling and applications". *Materials and Structures*, v. 38, p. 913-919.

Sakr, K.; El-Hakim, E. (2005). "Effect of high temperature or fire on heavy weight concrete properties". *Cement and Concrete Research*, v. 35, p. 590-596.

Turki, M.; Bretagne, E.; Rouis, M.J.; Quéneudec, m. (2009). "Microstructure, physical and mechanical properties of mortat rubber aggregates mixtures". *Construction and Building Materials*. v. 23. Elsevier, p. 2715-2722.

Valadares, F. (2009). "Desempenho Mecânico de Betões com a Incorporação de Borracha Proveniente de Pneus Usados". Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa.

ValorPneu@ (2015). <http://www.valorpneu.pt/default.aspx?lang=pt>. VALORPNEU – Sociedade de Gestão de Pneus, Lda, (Lisboa).

West, G. (1996). "Alkali-aggregate reaction in concrete roads and bridges". Thomas Telford Publications, London, 167 p.

Vieira, R.; Soares, R.; Pineiro, S.; Paiva, O.; Eleutério, J.; Vasconcelos, R. (2010) "Completely random experimental design with mixture and procees variables for optimization of rubberized concrete". *Construction and Building Material*.