

Influência das Elevadas Temperaturas e as Propriedades Mecânicas Residuais do Concreto Normal

Santos, Cristina Calmeiro¹, Rodrigues, João Paulo C.²

1: Instituto Politécnico de Castelo Branco, ISISE

ccalmeiro@ipcb.pt

2: Universidade de Coimbra, ISISE

jpaulocr@dec.uc.pt

RESUMO

O concreto, de um modo geral, apresenta um bom comportamento em situação de incêndio quando comparado com o aço, todavia em função da temperatura ocorrem algumas transformações químicas e físicas que podem comprometer esse desempenho. Apesar das alterações das propriedades mecânicas e térmicas do concreto quando sujeito a temperaturas elevadas e após situação de incêndio já terem sido avaliadas em vários estudos, ainda é um campo aberto onde é necessário muita investigação. O presente artigo apresenta os resultados de um estudo experimental sobre a avaliação das propriedades mecânicas residuais de concretos normais após incêndio. Para o efeito foram selecionados agregados graníticos e agregados calcários, dado serem os agregados mais utilizados na construção civil em Portugal e em muitos outros países. Os parâmetros testados foram: o nível de carregamento ($0,3f_{cd}$ e $0,7f_{cd}$); o processo de arrefecimento (arrefecimento ao ar e arrefecimento por jato de água) e o nível máximo de temperatura atingida (20, 300, 500 e 700°C). As propriedades mecânicas estudadas foram a resistência à compressão residual, resistência à tração direta e resistência à tração por compressão diametral, resistência à flexão, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. As temperaturas atingidas e o arrefecimento rápido do concreto apresentaram um efeito negativo sobre as propriedades mecânicas residuais. Este efeito foi mais notório na resistência à compressão residual do que nas restantes propriedades mecânicas estudadas.

Palavras chave: concreto, incêndio, residual, propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Concrete is known to have an enhanced behaviour in fire when comparing with bare steel, however there are some chemical and physical transformations in function of temperature that may compromise this performance. The mechanical and thermal properties of concrete at high temperatures and after fire have changes that have been evaluated in a lot of works, however this is still an open field where a lot of research is needed. This paper presents the results of a research on the assessment of the residual mechanical properties of ordinary concretes after fire. It was chosen for studying granite and calcareous aggregate concretes, as they are the most used in the civil construction in Portugal and in a lot of countries around the world. The following parameters were tested: loading level ($0.3f_{cd}$ and $0.7f_{cd}$), cooling process (cooling in the air and cooling by water jet) and maximum temperature level attained (20, 300, 500 and 700°C). The mechanical properties studied were the residual compression, direct and splitting tensile and flexural strengths, modulus of elasticity and Poisson's ratio. The high temperatures attained and the rapid cooling process on the concrete showed a negative effect on its residual mechanical properties. This effect was more notorious in the residual compression strength than in the other mechanical properties.

Keywords: concrete, fire, residual, mechanical properties.

1. INTRODUÇÃO

O concreto sujeito a temperaturas elevadas perde resistência. Propriedades como a resistência à compressão, resistência à tração, resistência à flexão, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson diminuem significativamente com a temperatura.

1.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão do concreto varia em função de diversas variáveis, de entre as quais Khoury et al (2002) sublinham os constituintes do concreto, o nível de carregamento durante o período de aquecimento e a taxa de aquecimento e de arrefecimento, como das mais importantes.

Abrams (1971) estudou a influência do tipo de agregado na determinação da resistência residual à compressão do concreto sujeito a altas temperaturas. O autor testou o comportamento do concreto constituído por agregados calcários, siliciosos e leves. O autor verificou que o concreto constituído por agregados siliciosos perde maior resistência à compressão do que o concreto constituído por agregados calcários ou agregados leves. Abrams (1971) estudou ainda a influência do carregamento durante o aquecimento no comportamento mecânico do concreto normal constituído por agregados calcários, agregados siliciosos e agregados leves. Os ensaios realizados permitiram ao autor concluir que o concreto normal, independentemente do tipo de agregado utilizado na sua constituição, apresenta valores de resistência à compressão residuais inferiores aos obtidos a quente. Verificou ainda que os provetes com aplicação de pré-carga durante a fase de aquecimento apresentam valores da resistência à compressão maiores (cerca de 5 a 25%) que os provetes sem aplicação de pré-carga durante o aquecimento.

Estudos conduzidos por Khoury (1992) também mostram que a aplicação de uma pré-carga pode conduzir ao aumento da resistência do concreto submetido a altas temperaturas, porque a pré-carga aplicada durante a fase de aquecimento compacta o concreto, limitando o surgimento da fissuração.

Husem (2006) testou a influência do processo de arrefecimento na variação da resistência residual à compressão do concreto normal e de alta resistência. Para o efeito submeteu os provetes a diferentes níveis de temperatura e seguidamente procedeu ao seu arrefecimento - uns provetes foram arrefecidos ao ar e outros sujeitos ao arrefecimento por jato de água. Husem concluiu que a resistência à compressão do concreto (normal e de alta resistência), arrefecido ao ar ou com água, diminui quando comparado com provetes de referência. No entanto, verificou que a redução é maior nos provetes arrefecidos mediante jato de água.

1.2 Resistência à tração

Estudos realizados por Thelandersson (1971) demonstram que existe uma relação entre a classe de resistência do concreto e o grau de degradação da resistência à tração. Os resultados experimentais obtidos por este autor permitiram verificar que os concretos de maior classe de resistência apresentam valores mais elevados para a resistência à tração em função da temperatura que os concretos de menor classe de resistência. Os ensaios de tração direta dão valores para a resistência à tração menores que os resultados de compressão diametral.

Schneider (1988) também estudou a resistência à tração de concretos de resistência normal sujeitos a altas temperaturas e após ciclo de aquecimento/arrefecimento. O autor observou que a redução da resistência residual à tração é ligeiramente inferior à redução da resistência à tração do concreto a altas temperaturas.

1.3 Resistência à flexão

Os resultados dos ensaios de resistência à flexão conduzidos por Li et al (2004), realizados em provetes de concreto normal e de alta resistência permitiram verificar que a resistência à flexão do concreto de alta resistência diminui de forma mais acentuada do que a do concreto normal, especialmente no intervalo dos 200 aos 400°C.

Husem (2006) estudou também a variação da resistência à flexão de concreto normal e de alta resistência após aquecimento/arrefecimento, submetendo uns provetes ao arrefecimento ao ar e outros ao arrefecimento mediante jato de água. O autor concluiu que os concretos normais e de alta resistência após exposição a temperaturas elevadas apresentam uma diminuição da resistência à flexão com o aumento da temperatura. Husem verificou ainda que a redução da resistência à flexão é maior nos provetes arrefecidos em água.

1.4 Módulo de elasticidade

Neville (1995) estudou o módulo de elasticidade do concreto, verificando que é fortemente influenciada pela temperatura e pelo tipo de agregado usado.

Os trabalhos experimentais conduzidos por Schneider (1988) para estudar a redução do módulo de elasticidade para diferentes tipos de concreto, mostram a influência do tipo de agregado no módulo de elasticidade. O autor verificou que o concreto de agregados siliciosos e o concreto de agregados basálticos sofrem maior redução do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura que o concreto de agregados calcários. Por outro lado, Schneider verificou ainda que o concreto de agregados leves apresenta uma diminuição menor do módulo de elasticidade que o concreto de agregados siliciosos. O autor considera que a

redução do módulo de elasticidade com a temperatura deve-se principalmente a uma rotura nas ligações internas entre a pasta de cimento e os agregados.

Furumura (1995) também realizou ensaios para a determinação do módulo de elasticidade residual do concreto. Estes ensaios foram realizados para concretos de resistência normal e de alta resistência. Os resultados obtidos permitiram concluir que a influência da classe do concreto na redução do módulo de elasticidade residual é pouco significativa.

Phan e Carino (2000) realizaram estudos de comparação da variação do módulo de elasticidade residual para concretos de resistência normal e de alta resistência submetidos a temperaturas elevadas e sem carregamento durante a fase de aquecimento. Os autores observaram uma redução mais acentuada no módulo de elasticidade em função da temperatura nos concretos de alta resistência do que nos concretos de resistência normal.

Kodur e Harmathy (2002) também estudaram a evolução do módulo de elasticidade em função da temperatura. Nos seus trabalhos experimentais, utilizaram um concreto de resistência normal constituído por diferentes agregados. Os autores concluíram que não existe uma influência significativa do tipo de agregado na variação do módulo de elasticidade em função da temperatura.

Os estudos desenvolvidos por Xiao e König (2004) permitiram determinar a alteração do módulo de elasticidade do concreto de resistência normal com a temperatura. Os autores verificaram que, por um lado, o valor residual do módulo de elasticidade do concreto após arrefecimento é menor que o módulo de elasticidade a altas temperaturas e, por outro lado, enquanto o concreto normal apresenta um comportamento decrescente quase linear, o mesmo não se verifica no concreto de alta resistência (apresentando um pior comportamento).

Lau e Anson (2006) também estudaram a redução do módulo de elasticidade em função da temperatura para os concretos normal e de alta resistência. Concluíram que, à semelhança dos autores anteriores, a redução do módulo de elasticidade em função da temperatura é muito mais acentuada para o concreto de alta resistência do que para o normal.

Estudos realizados por Bamonte e Gambarova (2007) permitiram igualmente concluir que o módulo de elasticidade diminui à medida que a temperatura aumenta, independentemente do tipo de concreto.

1.5 Coeficiente de Poisson

Estudos realizados por Marechal e Hertz citados por Schneider (1982) permitiram apresentar resultados da variação do coeficiente de Poisson com o aumento da temperatura. Os autores verificaram uma diminuição do coeficiente de Poisson até temperaturas de 400°C.

Schneider (1982) apresentou um conjunto de resultados sobre a variação do coeficiente de Poisson a elevadas temperaturas em função da relação entre a tensão instalada no concreto e a resistência à compressão do mesmo a 20°C. Verificou que o coeficiente de Poisson à temperatura ambiente assume um valor ligeiramente superior a 0,2 e mantém-se constante até 70% da tensão última, enquanto a 450°C é constante apenas até 20% da tensão última. Para valores do coeficiente de Poisson superiores a 0,5 a altas temperaturas, os materiais desviam-se do comportamento elástico.

Estudos conduzidos por Hirano et al (2005) permitiram determinar a evolução do coeficiente de Poisson de um concreto constituído por agregados areníticos em função do número de dias de aquecimento. Nestes estudos, os autores utilizaram provetes selados e não selados sujeitos a uma temperatura de 175°C. Os valores obtidos traduzem uma inconstância do coeficiente de Poisson em função da temperatura, demonstrando, no entanto, uma diminuição do coeficiente de Poisson até cerca dos sete dias de aquecimento, situação que se inverteu para períodos mais longos de aquecimento, uma vez que se verificou o aumento deste valor. Os autores observaram ainda a influência da selagem do provete: a partir dos três dias de aquecimento o coeficiente de Poisson apresenta valores superiores para o caso de provetes selados.

Lau e Anson (2006) apresentaram também os resultados dos seus estudos para o coeficiente de Poisson em função da temperatura. Nos seus estudos utilizaram concreto normal e concreto de alta resistência. Testaram também o efeito da adição de 1% de fibras de aço em ambos os concretos. Os autores verificaram uma descida mais acentuada do coeficiente de Poisson em função da temperatura para os concretos de alta resistência, mostrando que a influência da adição de fibras de aço é pouco relevante.

Tal como referido em diversos estudos, o concreto sofre perdas significativas nas propriedades mecânicas devido às temperaturas elevadas durante a exposição ao fogo, ao nível de carga e ao método de extinção de incêndio utilizado. A fim de clarificar a influência dos referidos parâmetros foi desenvolvido um estudo experimental no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas da Universidade de Coimbra.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Composição do concreto

O concreto com agregados calcários e o concreto com agregados graníticos foram objeto de estudo do presente trabalho uma vez que são os mais utilizados na construção civil em Portugal. O tipo e dimensão dos agregados utilizados nas composições são apresentados na Tabela 1. Nas composições de concreto foi utilizado cimento Portland CEM II/AL 42,5R. A

Tabela 2 apresenta algumas informações sobre o cimento, em termos de composição química e propriedades mecânicas.

Tabela 1: Tipo e dimensão dos agregados.

Tipo de agregado		Dimensão do agregado
Grosso	brita 1 (B1)	12,7mm
	brita 2 (B2)	19,1mm
Fino	areia fina (A1)	< 4mm
	areia grossa (A2)	

Tabela 2: Propriedades do cimento Portland CEM II/A-L 42,5R.

Composição química			Propriedades mecânicas		
Elementos	SO ₃	Cl	Resistência à compressão	idade - 2 dias	idade - 28 dias
%	≤ 4	≤ 0,10	MPa	≥ 20	≥ 42,5 e ≤ 62,5

O superplastificante (SP) utilizado foi o Sikament®195R, redutor de água e retardador de presa, permitindo o aumento da trabalhabilidade do concreto. As composições de concreto são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Composição do concreto com agregados calcários (BC) e com agregados graníticos (BG) por m³.

Composição do concreto	CEM (kg)	água (dm ³)	SP (dm ³)	A1 (kg)	A2 (kg)	B1 (kg)	B2 (kg)	A/C
BC	300	166	3,30	364	495	505	377	0,56
BG	320	165	3,20	310	511	617	459	0,52

Os provetes foram mantidos durante 24 horas na zona de betonagem, ou seja, em ambiente de laboratório, de modo a adquirirem endurecimento suficiente (presa) para poderem ser descofrados e transportados até à zona de cura. O período de cura foi de 28 dias. Para determinar a classe de resistência do concreto de acordo com a NP EN 206-1 (2007), foram realizados ensaios de compressão após cura, cujos resultados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados dos ensaios de compressão do concreto com agregados calcários (BC) e com agregados graníticos (BG).

Tipo de concreto	f _c [MPa]	f _{cm} [MPa]	Classe de resistência
BC	45,4	44,05	C30/37
	43,8		
	43,0		
BG	40,6	40,23	C30/37
	39,4		
	40,7		

2.2 Plano de ensaios

O trabalho experimental realizou-se em três fases: na primeira fase procedeu-se à preparação de todo o material necessário para a realização dos ensaios, obtenção de agregados a serem incorporados, bem como areia e cimento. A segunda fase experimental teve por objetivo avaliar os diferentes tipos de concretos fabricados sob o ponto de vista do desempenho mecânico e da deformabilidade. A última fase do trabalho experimental foi reservada à avaliação do comportamento do concreto quando exposto a diferentes níveis de temperatura máxima (300, 500, 700°C) e a diferentes níveis de carregamento ($0,3f_{cd}$ e $0,7f_{cd}$ sendo f_{cd} o valor de cálculo da resistência à compressão do betão à temperatura ambiente). Foram realizados três ensaios por cada combinação de parâmetros.

Na Tabela 5 apresentam-se resumidamente os ensaios realizados após submissão do concreto a ciclo de aquecimento/arrefecimento.

Tabela 5: Plano de ensaios.

Ensaio residual	Forma e dimensões do provete [mm]	Nível de carregamento	Temperatura (°C)
resistência à compressão	cilíndrico, d=75:h=200	$0,3f_{cd}$	20, 300, 500, 700
		$0,7f_{cd}$	20, 300, 500, 700
resistência à tração direta	cilíndrico, d=75: h=200	-	20, 300, 500, 700
resistência à tração por compressão diametral	cilíndrico, d=150: h=300	-	20, 300, 500, 700
resistência à flexão	prismático, b=150: h=600	-	20, 300, 500, 700
módulo de elasticidade	cilíndrico, d=150: h=300	-	20, 300, 500, 700
coeficiente de Poisson	cilíndrico, d=150: h=300	-	20, 300, 500, 700

2.3 Provetes e metodologia de ensaio

Nos ensaios realizados foram testados dois processos de arrefecimento, arrefecimento ao ar (que pretendia simular um incêndio extinto de uma forma natural) e arrefecimento por jato de água (que pretendia simular a ação dos bombeiros no combate ao incêndio). Os provetes foram submetidos a um ciclo de aquecimento/arrefecimento. Para controlar a evolução da temperatura no interior dos provetes, estes foram providos com cinco termopares tipo K. A localização dos termopares nos provetes foi definida tendo por base as recomendações do RILEM TC – 200 HTC (2005).

Ensaio de resistência à compressão

Os ensaios foram realizados em provetes cilíndricos com 75mm de diâmetro e 225mm de altura, com uma relação de altura/diâmetro de 3:1. Para a concretização dos ensaios usou-se uma máquina universal de tração/compressão Servosis com capacidade de carga de 600kN,

um forno cilíndrico com uma câmara de aquecimento de 90mm de diâmetro e 300mm de altura (temperatura máxima de 1200°C) e um sistema de aquisição de dados TML TDS-530. O procedimento de ensaio respeitou as recomendações do RILEM TC – 200 HTC (2005).

Para determinar a resistência residual à compressão, foram utilizados dois sistemas de ensaio similares, diferindo apenas no tipo de arrefecimento dos provetes. Um conjunto de provetes foi sujeito ao arrefecimento ao ar e um outro conjunto arrefecido por jato de água. Os provetes foram submetidos a um nível de carregamento de $0,3f_{cd}$ ou $0,7f_{cd}$, o qual foi mantido constante durante o processo de aquecimento/arrefecimento. Quando se atingiu o nível de carregamento pretendido, os provetes foram aquecidos a uma taxa de 3°C/min, até ser obtido o nível de temperatura desejado. Foram testados três níveis de temperatura máxima (300, 500 e 700°C). Para controlo do concreto foram também testados provetes à temperatura ambiente.

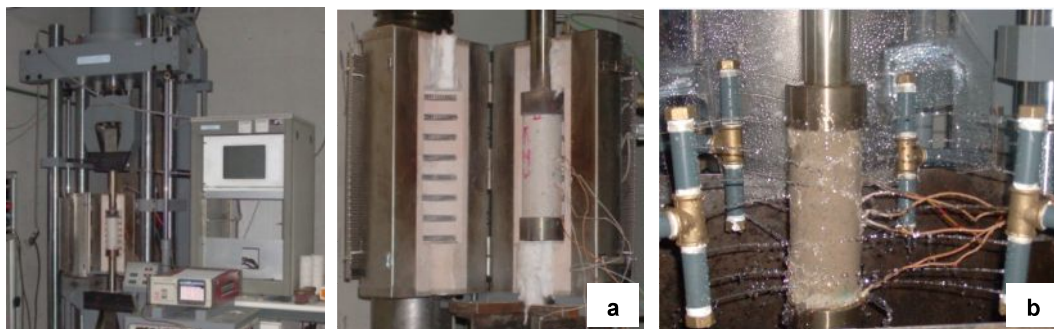


Figura 1: Sistema experimental – resistência à compressão
a) arrefecimento ao ar b) arrefecimento por jato de água

Considerou-se atingido o nível de temperatura desejado quando a temperatura média nos três termopares superficiais do provete em estudo igualava a temperatura do forno. O provete foi mantido a esta temperatura durante uma hora para estabilização. Após a estabilização da temperatura, o provete foi arrefecido ao ar (Figura 1a), ou por jato de água (Figura 1b). O caudal de água aplicado foi de $3,9 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{s}$ e a pressão de $3,5 \times 10^5 \text{Pa}$. Quando o provete atingia a temperatura ambiente (cerca de 20°C), realizava-se o ensaio de compressão. A carga foi incrementada a uma taxa de 0,25kN/s até se atingir a rotura do provete.

Ensaio de resistência à tração direta

Nos ensaios de tração direta usaram-se provetes cilíndricos com 75mm de diâmetro e 225mm de altura, com uma relação de altura/diâmetro de 3:1. O sistema de ensaio consistiu numa máquina universal de tração Servosis com capacidade de carga até 600kN. Utilizou-se ainda uma mufla com uma câmara de aquecimento com as dimensões 210mmx320mmx145mm (temperatura máxima de 1100°C) para os provetes atingirem os vários níveis de temperatura desejados. Para a aquisição de dados foi usado um datalogger TML TDS-530.



Figura 2: Sistema de ensaio – resistência à tração direta

Os provetes foram aquecidos a uma taxa de $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$, até se atingir o nível de temperatura pretendido. Para controlo do concreto ensaiaram-se provetes à temperatura ambiente e provetes sujeitos a três níveis de temperatura (300 , 500 e 700°C). Após a estabilização da temperatura, procedeu-se ao arrefecimento dos provetes. Um conjunto de provetes foram arrefecidos ao ar mediante a abertura da mufla, um outro conjunto foi arrefecido bruscamente mediante a aplicação de jatos de água. Quando se atingiu a temperatura ambiente (cerca de 20°C), realizou-se o ensaio de tração residual, aplicando uma carga de tração diretamente nos provetes, a uma taxa de $0,25\text{kN}/\text{s}$, até à rotura (Figura 2).

Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

A fim de determinar a resistência à tração por compressão diametral foram respeitadas as orientações da NP EN 12390-6 (2003), utilizando-se provetes cilíndricos com 150mm de diâmetro e 300mm de altura. O sistema de ensaio foi composto por uma máquina de tração universal Servosis com capacidade de carga de até 600kN , um forno retangular Termolab com uma câmara de aquecimento com as dimensões $150\text{mm}\times 150\text{mm}\times 100\text{mm}$ (temperatura máxima de 1200°C) e um sistema de aquisição de dados TML TDS-530 (Figura 3).



Figura 3: Sistema de ensaio – resistência à tração por compressão diametral.

O procedimento de ensaio iniciou-se pelo aquecimento dos provetes, no forno referido, para diferentes níveis de temperatura e a uma taxa de $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Seguidamente arrefeceram-se os provetes até atingirem a temperatura ambiente. À semelhança dos ensaios descritos anteriormente, aplicaram-se os dois processos de arrefecimento em estudo, ao ar e por jacto de água.

Ensaio de resistência à flexão

Os ensaios de resistência à flexão foram realizados em provetes prismáticos com 150mm de lado e 600mm de comprimento em conformidade com a NP EN 12390-5 (2009) (Figura 4).

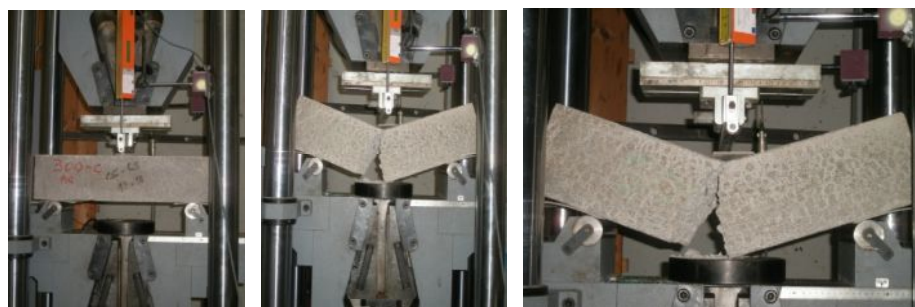


Figura 4: Sistema de ensaio – resistência à flexão.

Os ensaios de resistência residual à flexão foram realizados seguindo a metodologia de ensaio similar à descrita para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Os ensaios efetuados foram do tipo flexão em três pontos (Figura 4). A carga foi aumentada a uma velocidade constante de 0,05MPa/s, sem choques e de forma contínua, até à rotura do provete.

Ensaio de módulo de elasticidade

Este ensaio foi realizado em provetes cilíndricos com 150mm de diâmetro e 300mm de altura. Para medir o módulo de elasticidade foram aplicados três extensómetros nos provetes (TML tipo PFL-30-11). O procedimento de ensaio seguiu as orientações do RILEM TC 129-MHT (2004).



Figura 5: Sistema de ensaio – módulo de elasticidade.

O aquecimento e arrefecimento dos provetes seguiu o procedimento dos referentes aos ensaios de tração por compressão diametral e módulo de elasticidade. Os provetes foram aquecidos a uma taxa de 3°C/min até se atingir o nível de temperatura pretendido (300, 500 e 700°C). Após a estabilização da temperatura, os provetes foram arrefecidos (uns ao ar e outros por jato de água) e seguidamente submetidos a ensaios cíclicos, realizados sob controlo de força, para níveis de carga compreendidos entre 0,5MPa e $f_{c20°C}/3$ da força de rotura estimada. A Figura 5 ilustra os dispositivos de ensaio utilizados.

Ensaio do coeficiente de Poisson

Este ensaio foi realizado em provetes cilíndricos com 150mm de diâmetro e 300mm de altura. Para o cálculo do coeficiente de Poisson foram aplicadas duas rosetas nos provetes (TML tipo PFLC-30-11). Os provetes cilíndricos de concreto instrumentados para permitir o cálculo do coeficiente de Poisson estão representados na Figura 6. A metodologia de ensaio foi similar à descrita para o ensaio de módulo de elasticidade. As rosetas permitem o cálculo dos valores da extensão longitudinal e da extensão transversal.

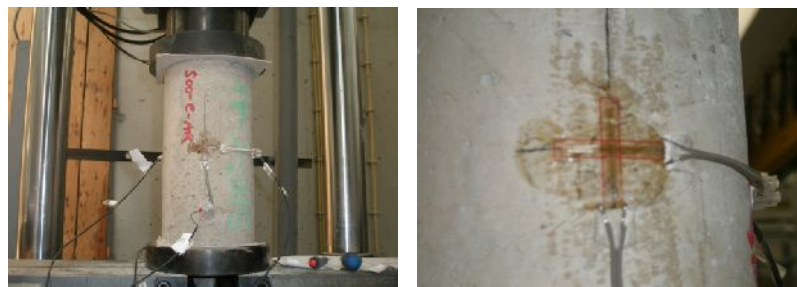
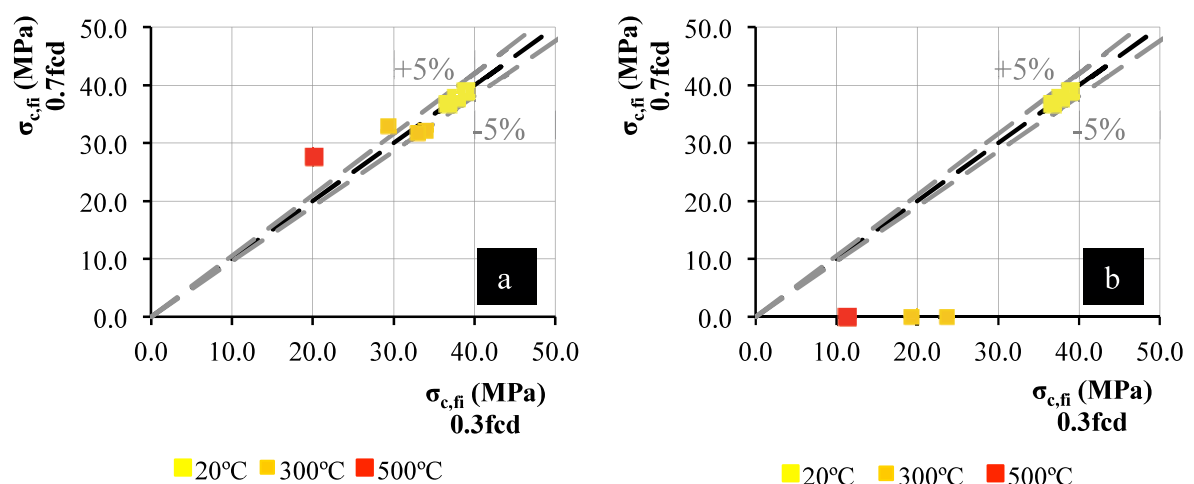


Figura 6: Sistema de ensaio – coeficiente de Poisson.

3. RESULTADOS

3.1 Resistência residual à compressão

A Figura 7 mostra a influência do nível de carregamento e do processo de arrefecimento na resistência residual à compressão do concreto.



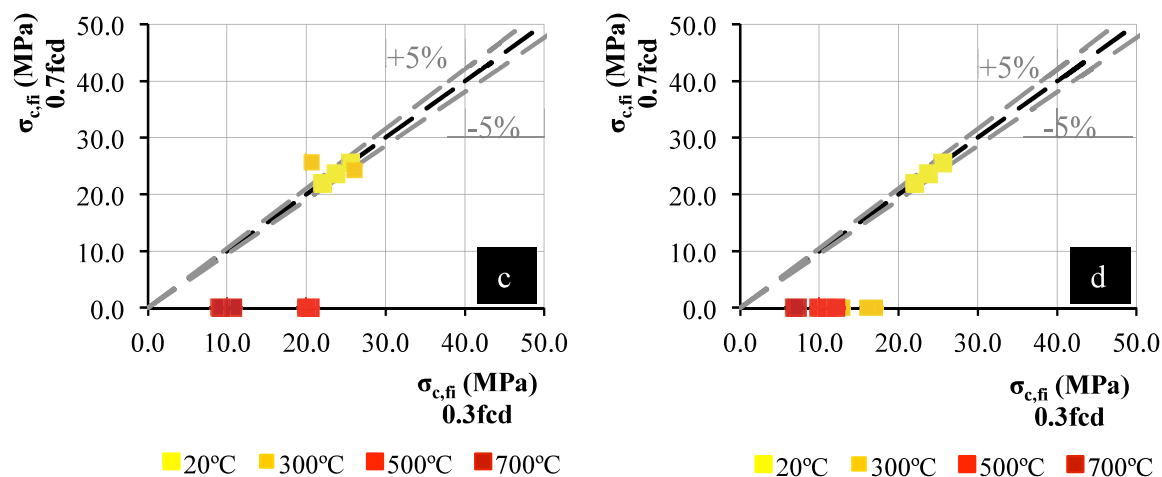


Figura 7: Resistência residual à compressão – influência do nível de carga. a) BC - arrefecimento ao ar. b) BC - arrefecimento por jato de água. c) BG - arrefecimento ao ar. d) BG - arrefecimento por jato de água.

Para o concreto de agregados calcários e arrefecimento ao ar (Figura 7a), o nível de carregamento não apresenta influência significativa, situação que se inverte no caso de arrefecimento por jato de água (Figura 7b) dado que essa influência se começa a evidenciar logo após a temperatura ambiente. Para o concreto de agregados de granito e arrefecimento ao ar (Figura 7c), o nível mais elevado de carregamento testado ($0,7f_{cd}$) começou a apresentar influência significativa sobre a redução da resistência residual à compressão do concreto para temperaturas a partir de 300°C. No caso de arrefecimento por jato de água (Figura 7d) a influência do nível de carregamento foi relevante desde a temperatura ambiente.

3.2 Resistência residual à tração direta

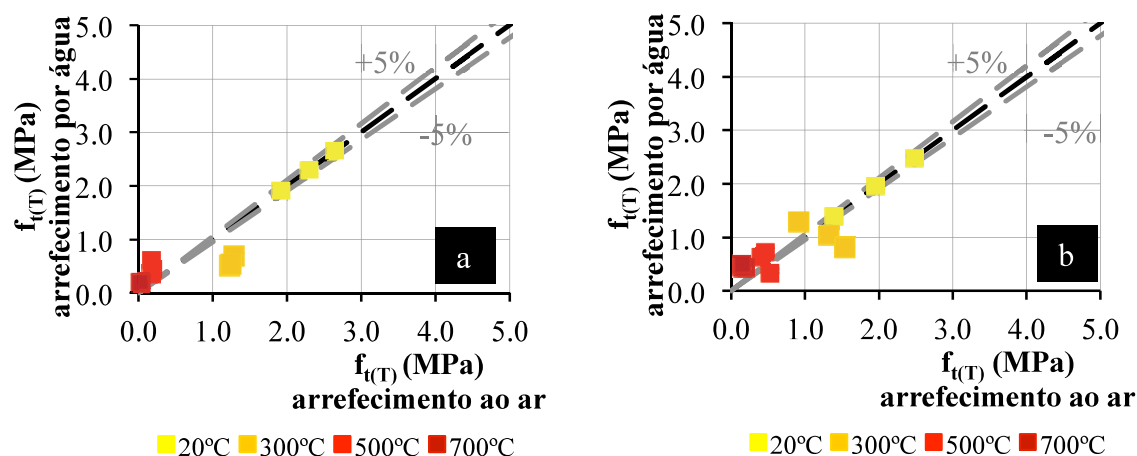


Figura 8: Resistência residual à tração direta – influência do processo de arrefecimento a) Concreto de agregados calcários b) Concreto de agregados graníticos

A Figura 8 apresenta a influência do processo de arrefecimento sobre a resistência residual à tração direta para o concreto de agregados calcários (a) e para o concreto de agregados graníticos (b). Como se verifica, não houve uma influência determinante do processo de arrefecimento, dado que ambos conduziram a uma redução similar da resistência residual à tração direta.

3.3 Resistência residual à tração por compressão diametral

Para os dois tipos de concreto testados não é significativa a influência do processo de arrefecimento aplicado na resistência residual à tração por compressão diametral (Figura 9).

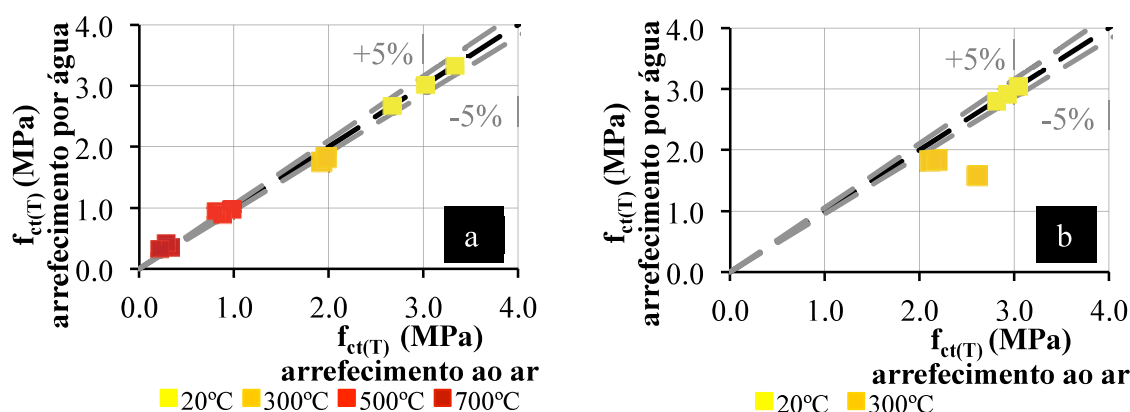


Figura 9: Resistência residual à tração por compressão diametral – influência do processo de arrefecimento a) Concreto de agregados calcários b) Concreto de agregados graníticos

Da aplicação das duas metodologias para calcular a resistência residual à tração do concreto (tração direta e tração por compressão diametral), não resulta uma correlação entre os valores obtidos. Verificou-se uma diferença entre o mecanismo de rotura em tração uniaxial e o mecanismo de rotura em compressão diametral. Por outro lado, verificou-se que nos ensaios de tração direta o concreto de agregados graníticos apresentou um comportamento mais satisfatório quando comparado com o concreto de agregados calcários. Situação similar se observou nos ensaios de tração por compressão diametral até temperaturas próximas dos 350°C. No entanto, esta situação inverteu-se para níveis mais elevados de temperatura em que o concreto de agregados se recuperou, apresentando maior capacidade residual à tração que o concreto de agregados graníticos.

3.4 Resistência residual à flexão

A Figura 10 indica que a influência do processo de arrefecimento por jato de água quando comparado com arrefecimento ao ar é mais evidente para temperaturas até 300°C. Para temperaturas mais elevadas esta influência mostra-se pouco relevante.

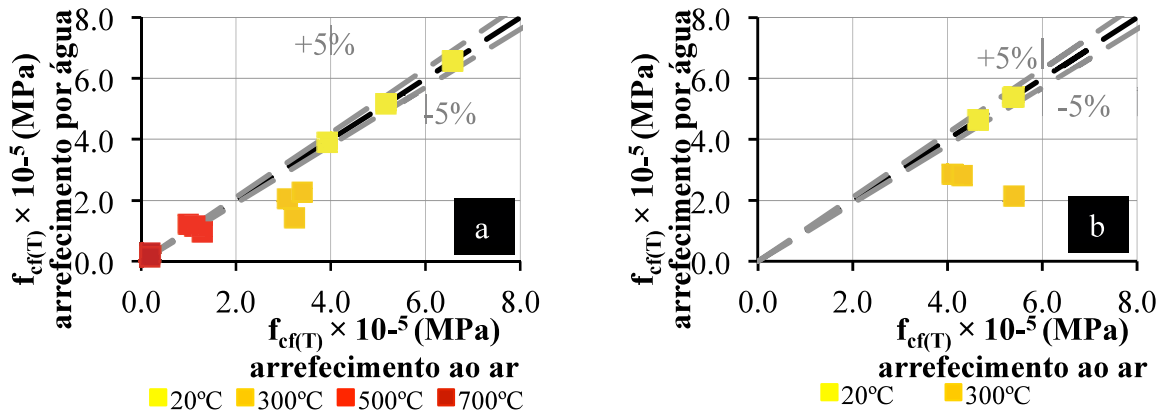


Figura 10: Resistência residual à flexão – influência do processo de arrefecimento. a) Concreto calcário. b) Concreto granítico.

3.5 Módulo de elasticidade residual

A análise da Figura 11 permite verificar que a influência do processo de arrefecimento não é muito evidente nesta propriedade mecânica. Até aos 350°C os concretos testados apresentaram um comportamento similar. Aos 500°C o módulo de elasticidade residual do concreto de agregados graníticos apresentou um valor nulo enquanto o concreto de agregados calcários ainda apresentava cerca de 10% do valor à temperatura ambiente.

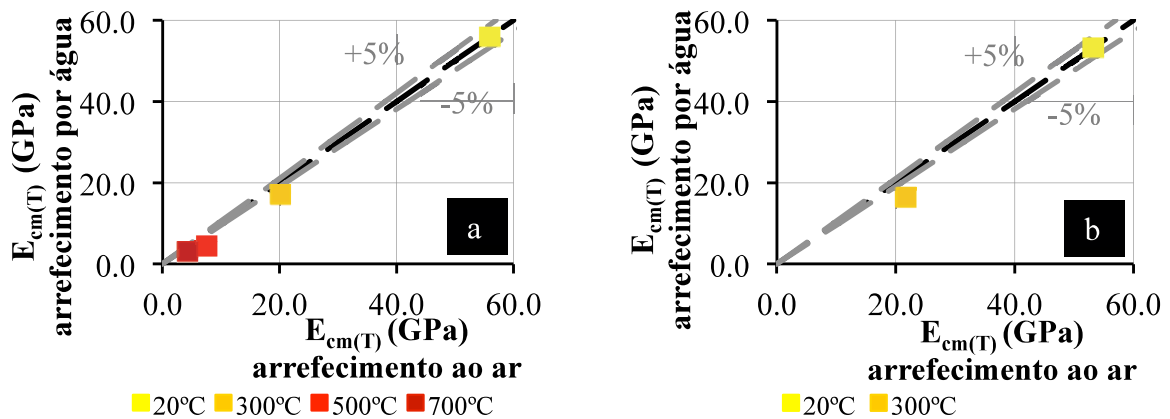


Figura 11: Módulo de elasticidade residual – influência do processo de arrefecimento a) Concreto de agregados calcários b) Concreto de agregados graníticos

3.6 Coeficiente de Poisson residual

O arrefecimento por jato de água em comparação com o arrefecimento ao ar para temperaturas superiores a 500°C apresenta um efeito significativo sobre o coeficiente de Poisson residual do concreto de agregados calcários (Figura 12). Para os outros níveis de temperatura testados o processo de arrefecimento aplicado não é relevante.

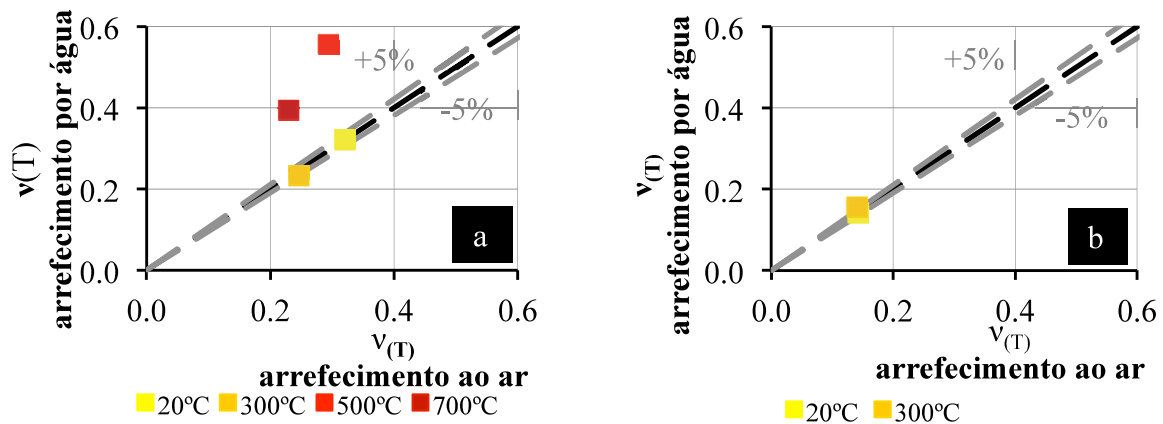


Figura 12: Coeficiente de Poisson residual – influência do processo de arrefecimento a) Concreto de agregados calcários b) Concreto de agregados graníticos

4. CONCLUSÕES

O trabalho de pesquisa experimental desenvolvido permitiu verificar que as propriedades mecânicas residuais do concreto, constituído por agregados calcários ou por agregados graníticos, sofrem alterações quando o concreto é submetido a altas temperaturas e arrefecido. Atendendo às variáveis testadas, pode-se extrair as seguintes conclusões:

- A resistência à compressão do concreto diminui com o aumento da temperatura, independentemente do tipo de betão;
- O processo de arrefecimento também interfere na redução da resistência à compressão do concreto. Arrefecimento por jato de água: o concreto calcário apresenta pior desempenho quando comparado com o concreto granítico, independentemente do nível de carga e do nível de temperatura atingido; Arrefecimento ao ar: o concreto granítico apresenta melhor desempenho que o concreto calcário para o nível de carga de $0.3f_{cd}$. Situação que se mantém para nível de carga $0.7f_{cd}$ mas apenas até aos 350°C ;
- À medida que o nível de carga aumenta mais significativa é a influência do processo de arrefecimento na redução da resistência à compressão residual do concreto. Comparando os dois processos de arrefecimento aplicados, verifica-se que essa influência é mais negativa no arrefecimento por jato de água.
- A resistência residual à tração do concreto também diminui com o aumento da temperatura. O estudo desta propriedade mecânica mostrou que a composição do concreto (composição e natureza de agregados) é uma variável que influencia essa diminuição em

virtude das transformações térmicas ocorridas nos seus componentes. Constatou-se que essa redução é maior no concreto de agregados calcários.

- A resistência residual à flexão sofre alterações em função do tipo de arrefecimento aplicado. O arrefecimento ao ar tem um efeito menos acentuado quando comparado com o arrefecimento por jato de água, independentemente do tipo de concreto. Todavia, o uso de agregados calcários melhora o comportamento à flexão quando comparado com o caso dos agregados graníticos.
- O módulo de elasticidade do concreto decresce com o aumento da temperatura, independentemente do tipo de agregados constitutivos do concreto e do método de arrefecimento aplicado (ainda que o arrefecimento por jato de água cause mais danos do que o arrefecimento ao ar).
- O coeficiente de Poisson diminui à medida que a temperatura aumenta, ainda que se tenha verificado uma dispersão e inconstância de valores.

5. REFERÊNCIAS

ABRAMS, M.. **Compressive strength of concrete at temperatures to 1600F**. American Concrete Institute, SP-25, Temperature and Concrete, Detroit, p. 33-58, 1971.

EN 12390-6:2003. Testing hardened concrete Part 6: Tensile splitting strength of test specimens, 14 p., 2003.

EN 12390-5:2009. Testing hardened concrete Part 5: Flexural strength of test specimens, 13 p., 2009.

HUSEM, M. **The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete**. Fire Safety Journal, vol. 41(2), p. 155-163, 2006.

KHOURY, G. A.. **Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment**. Magazine of Concrete Research, vol. 44, p. 291-309, 1992.

NP EN 206-1:2007. Concrete. Part 1: Specification, Performance, Production and Conformity. 84 p., 2007.

RILEM TC 129-MHT. Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures. Materials and Structures, vol. 37, p 139-144, 2004.

RILEM TC 200-HTC. Mechanical concrete properties at high temperature – Modeling and applications. Materials and Structures, vol.38, p. 913-919, 2005.

SCHNEIDER, U.. **Behaviour of concrete at high temperatures**. RILEM - report to committee n° 44 - PHT, Paris, 72 p., 1982.