

Resumo

O betão é o material de construção mais utilizado no mundo (em termos de toneladas usadas anualmente). É usado para a construção de inúmeros edifícios e estruturas, havendo deste modo a necessidade de se exercer um controle efectivo antes, durante e após a construção. A função primária do betão numa estrutura sujeita a forças é a resistência à compressão, sendo que as tensões de rotura que mais frequentemente se determinam experimentalmente são as de compressão. Do ponto de vista do engenheiro a resistência é um parâmetro fundamental no dimensionamento de estruturas e o seu conhecimento permite obter informações sobre a uniformidade e durabilidade.

A solução mais utilizada para avaliar o controle de qualidade do betão durante a construção é o recurso a ensaios de compressão de provetes moldados normalizados (cubos ou cilindros). O objectivo desta dissertação é o de contribuir para a avaliação das tensões de rotura à compressão, em provetes cúbicos e cilíndricos em diferentes idades, formados com betão da mesma família e relacioná-los entre si, com recurso a ensaios de compressão.

Para tal, numa primeira fase, faz-se uma abordagem geral do tema recorrendo para o efeito a uma pesquisa bibliográfica. Esta pesquisa incidiu nos factores que influenciam na resistência do betão à compressão, nas fórmulas utilizadas para calcular a resistência, nos tipos de rotura normalmente obtidos durante os ensaios e finalmente nos módulos de elasticidade.

Na segunda parte do estudo, de carácter experimental, fizeram-se diversas betonagens com diferentes tipos de betão, obtendo-se deste modo os provetes cúbicos e cilíndricos, que por sua vez foram submetidos a ensaios de compressão aos sete, catorze e vinte e oito dias de idade. Em cada uma destas idades, foram obtidas resistências à compressão nos cubos e cilindros, que posteriormente foram relacionadas entre si.

Abstract

Concrete is the most extensively used building material in the world (in terms of tons used annually). It has been used successfully for the construction of numerous buildings and structures, therefore it needs effective control before, during and after construction. The primary function of a concrete structure subjected to forces is the compression stress, so the rupture stresses that are more often determined experimentally are the compression ones. From the engineer perspective, resistance is often an essential parameter in the design of structures and its knowledge allows to obtain information on the uniformity and durability.

The solution used to evaluate the quality control of concrete during construction is the use of compression tests of standard molded samples (cubes or cylinders).

The purpose of this dissertation is to contribute to the evaluation of compressive stresses in cylindrical and cubic specimens at different ages, formed with concrete from the same family and relate them to each other, using tests of compression.

For this purpose, in a first step, a general approach of the theme is done using for the effect a literature research. This research is focused on factors that influence the strength of concrete, in the formulas used to calculate the resistance, the type of failure usually obtained during the tests.

In a second step of this study, of experimental nature, a series of concreting experiments were conducted using different types of concrete with cubic and cylindrical shapes of samples. These samples were subjected to compression stress experiments at seven, fourteen and twenty eight days old. In each one of these experiments, compression stress resistance values were obtained for the cubic and cylindrical samples, which were intercorrelated after.

Key Words: Concrete, Compressive Stresses, Cubes, Cylinders

Conteúdo

Capítulo 1

Introdução	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objectivo	2
1.3 Metodologia	2
1.4 Estrutura da dissertação.....	3

Capítulo 2

Resistência do betão à compressão em cubos e cilindros.....	5
2.1 Influencia dos constituintes do betão na sua resistência à compressão	6
2.1.1 Cimento	6
2.1.2 Agregados.....	9
2.1.3 Água	10
2.1.4 Adições.....	14
2.1.5 Adjuvantes.....	14
2.2 Classificação do betão	16
2.2.1 Resistência à compressão	17
2.3 Rotura em compressão do betão	22
2.4 Comparação da resistência à compressão em cubos e cilindros	26
2.5 Módulo de elasticidade do betão	30
2.5.1 Definição e determinação do módulo de elasticidade do betão	30
2.5.2 Relação entre tensão de rotura e módulos de elasticidade	34

Capítulo 3

Instalações laboratoriais e instrumentação	37
3.1 Considerações gerais.....	37
3.2 Colheita/ Identificação dos provetes.....	37

3.3 Descrição do equipamento.....	40
3.4 Descrição do método de cura e ensaio de compressão	42
Capítulo 4	
Apresentação e discussão dos resultados.....	47
4.1 Tensões de rotura à compressão	47
4.2 Tipos de rotura obtidos.....	57
Capítulo 5	
Conclusões e sugestões para desenvolvimentos futuros.....	63
5.1 Conclusões.....	63
5.2 Sugestões para desenvolvimentos futuros	64
Referências bibliográficas	65
Anexo I.....	69
Resultados dos ensaios efectuados aos 7 dias.....	71
Resultados dos ensaios efectuados aos 14 dias.....	73
Resultados dos ensaios efectuados aos 28 dias.....	75

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Influência da dosagem de cimento nas tensões de rotura à compressão e flexão	8
Figura 2.2 – Variação relativa da resistência à compressão de um betão com a quantidade de água de amassadura.....	11
Figura 2.3 – Variação da tensão de rotura do betão com o valor de A/C	12
Figura 2.4 – Ganho da resistência em betões com diferentes valores de A/C nos primeiros 28 dias de idade.....	13
Figura 2.5 – Dimensões nominais para cubos e cilindros	19
Figura 2.6 – Relação entre a resistência de provetes normalizados e a resistência do betão in situ.....	20
Figura 2.7 – Valor característico da resistência.....	21
Figura 2.8– Roturas satisfatórias de provetes cúbicos.....	24
Figura 2.9 – Roturas satisfatórias de provetes cilíndricos.....	25
Figura 2.10 – Roturas não satisfatórias de provetes cúbicos.....	25
Figura 2.11- Roturas não satisfatórias de provetes cilíndricos.....	25
Figura 2.12 – Relação entre a resistência medida em provetes prismáticos e provetes cúbicos.....	28
Figura 2.13 – Efeito da relação altura/diâmetro na resistência do cilindro	29
Figura 2.14 – Esquema dos diagramas tensão-extensão com velocidade constante de subida de tensão e extensão	32
Figura 2.15 – Diagrama típico tensão-extensão do betão.....	32
Figura 2.16 – Diagramas tensão-extensão do betão para diferentes classes de resistência	33
Figura 3.1 – Moldes e enchimento dos cubos e cilindros.....	38
Figura 3.2 – Pesagem das amostras e amostra na prensa.....	41
Figura 3.3 – Máquina de ensaio.....	41
Figura 3.4 – Cubo e cilindro na prensa com os blocos espaçadores.....	45
Figura 4.1 – Resultados da tensão de rotura média obtidos aos 7 dias.....	48
Figura 4.2 – Resultados da tensão de rotura média obtidos aos 14 dias.....	49
Figura 4.3 – Resultados da tensão de rotura média obtidos aos 28 dias.....	51
Figura 4.4 – Evolução da tensão de rotura nos cubos.....	53

Figura 4.5 – Evolução da tensão de rotura nos cilindros.....	55
Figura 4.6 – Roturas satisfatórias obtidas em provetes cúbicos	57
Figura 4.7 – Roturas satisfatórias obtidas em provetes cilíndricos	58
Figura 4.8 – Roturas não satisfatórias obtidas em provetes cúbicos	59
Figura 4.9 – Roturas não satisfatórias obtidas em provetes cilíndricos.....	60

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Percentagem de resistência em relação ao tipo I	7
Tabela 2.2 – Classes de resistência do cimento.....	8
Tabela 2.3 – Características das águas para amassadura de betões.....	11
Tabela 2.4 – Classes de resistência à compressão para betão de massa volúmica normal	17
Tabela 2.5 – Resistência à compressão de cubos e cilindros	27
Tabela 2.6 – Relação entre tensões de compressão e módulos de elasticidade do betão	34
Tabela 3.1 – Tipos de betão ensaiados.....	39
Tabela 4.1 – Relações das resistências médias obtidas aos 7 dias em cubos e cilindros.....	48
Tabela 4.2 – Relações das resistências médias obtidas aos 14 dias em cubos e cilindros.....	50
Tabela 4.3 – Relações das resistências médias obtidas aos 28 dias em cubos e cilindros.....	52
Tabela 4.4 – Classes de resistências características obtidas.....	52
Tabela 4.5 - Evolução da tensão de rotura nos cubos.....	54
Tabela 4.6 - Evolução da tensão de rotura nos cilindros.....	55
Tabela I.1 – Resultados obtidos nos ensaios efectuados aos 7 dias	71
Tabela I.2 – Resultados obtidos nos ensaios efectuados aos 14 dias	73
Tabela I.3 – Resultados obtidos nos ensaios efectuados aos 28 dias	75

Simbologia

λ	Factor de probabilidade de 95% para uma distribuição nominal
$f_{c,cube}$	Tensão de rotura obtida num provete cúbico padrão (150 mm de aresta)
$f_{c,cyl}$	Tensão de rotura obtida num provete cilíndrico padrão (150 mm x 300 mm)
$f_{cm,cube7}$	Valor médio da tensão de rotura à compressão de n amostras de provetes cúbicos padrão (150 mm de aresta) aos sete dias de idade
$f_{cm,cube14}$	Valor médio da tensão de rotura à compressão de n amostras de provetes cúbicos padrão (150 mm de aresta) aos catorze dias de idade
$f_{cm,cube28}$	Valor médio da tensão de rotura à compressão de n amostras de provetes cúbicos padrão (150 mm de aresta) aos vinte e oito dias de idade
$f_{cm,cyl7}$	Valor médio da tensão de rotura à compressão de n amostras de provetes cilíndricos padrão (150 mm x 300 mm) aos sete dias de idade
$f_{cm,cyl14}$	Valor médio da tensão de rotura à compressão de n amostras de provetes cilíndricos padrão (150 mm x 300 mm) aos catorze dias de idade
$f_{cm,cyl28}$	Valor médio da tensão de rotura à compressão de n amostras de provetes cilíndricos padrão (150 mm x 300 mm) aos vinte e oito dias de idade
$f_{ck,cube28}$	Valor característico da tensão de rotura à compressão de n amostras de provetes cúbicos padrão (150 mm de aresta) aos vinte e oito dias de idade
$f_{ck,cyl28}$	Valor característico da tensão de rotura à compressão de n amostras de provetes cilíndricos padrão (150 mm x 300 mm) aos vinte e oito dias de idade
S_n	Desvio padrão obtido de um conjunto de n leituras directas

Abreviaturas

ACI	American Concrete Institute
FCT-UNL	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
EC2	Eurocódigo 2
IPQ	Instituto Português da Qualidade
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa (Portugal)
NP	Norma Portuguesa



Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

O betão é um material de construção formado essencialmente pela mistura de cimento, de agregados grossos e finos e de água. Para além destes componentes básicos, pode também conter adjuvantes e adições. Além destes requisitos de composição, para que o material possa ser considerado betão é necessário que seja convenientemente colocado e compactado. Assim deve apresentar, depois da compactação, uma estrutura fechada, isto é, o teor em ar em volume não deve exceder 3% quando a máxima dimensão dos agregados é maior ou igual a 16mm e 4% quando a máxima dimensão dos agregados é menor que 16mm. Este teor limite de ar não inclui ar introduzido nem os poros dos agregados, isto é, trata-se apenas de ar aprisionado que não foi expulso em resultado da compactação. O betão com estas características pode ser utilizado na execução de estruturas de betão simples, betão armado e betão pré-esforçado.

A avaliação das propriedades do betão, durante ou após a construção de uma determinada estrutura tem sido uma preocupação dos engenheiros ao longo dos tempos. A maioria das regras de dimensionamento são baseadas na resistência à compressão do betão, sendo por isso natural que esta propriedade seja da maior importância. As principais propriedades mecânicas do betão são a resistência à compressão, resistência à tracção e módulo de elasticidade.

Para garantir que o betão utilizado possua a resistência prescrita no dimensionamento de uma determinada estrutura, ou em conformidade com determinados requisitos, é necessário um bom controlo de qualidade bem como os meios para o garantir. Usualmente, o controlo de qualidade do betão numa estrutura é feito através de ensaios de determinação da resistência à compressão.

Desde longa data, o ensaio mais utilizado para o controlo de qualidade do betão tem sido a determinação da resistência à compressão através de ensaios em provetes

normalizados, cúbicos ou cilíndricos, moldados com o mesmo betão a utilizar na estrutura, sendo prática corrente das normas a determinação da resistência aos 28 dias. O ensaio é fácil de realizar, quer em termos da preparação das amostras quer na obtenção de resultados.

Esta dissertação surge assim no âmbito de contribuir para os estudos das tensões de rotura à compressão em cubos e cilindros formados a partir de betões de massa volúmica normal da mesma classe de resistência.

1.2 Objectivo

Os objectivos desta dissertação são:

- Obter experimentalmente as tensões de rotura à compressão em provetes cúbicos e cilíndricos aos sete, catorze e vinte e oito dias de idade;
- Relacioná-las entre si com base nos resultados obtidos.

1.3 Metodologia

Para concretizar os objectivos foram feitos em primeiro lugar dez betonagens de diferentes tipos de betão, sendo feitos 12 moldes de cubos de 0,15m x 0,15m e nove moldes de cilindros de 0,3m de altura e 0,15m de diâmetro em cada uma destas betonagens. Estes provetes foram submetidos a ensaios laboratoriais aos 7, 14 e 28 dias de idade que consistiram a submeter os provetes a ensaios de compressão simples até estes atingirem a rotura, conseguindo-se deste modo avaliar a resistência à compressão das amostras cúbicas e cilíndricas. Foram também colocados quatro deflectómetros na prensa de modo a registar os valores de deformação sofridos pela amostra durante o ensaio, com o objectivo de avaliar a deformação sofrida pelo provete ao longo do ensaio. Todos os valores de carga revelados pela prensa bem como os valores lidos pelos deflectómetros, foram registados no software “*Catman Version 6.00*” que através dele foi possível realizar o primeiro objectivo desta dissertação. Como os provetes apresentavam diferentes formas (cubos e cilindros) foram estudadas as propriedades para cada um destes em separado, sendo posteriormente relacionadas.

1.4 Estrutura da dissertação

A presente dissertação é composta por 5 capítulos, organizados como se explica nos parágrafos seguintes.

A dissertação inicia no **capítulo 1**, que corresponde à introdução, onde se faz uma primeira abordagem ao tema, e referem-se os principais objectivos desta tese. Faz-se também uma referência ao modo de como os objectivos foram realizados.

No **capítulo 2** faz-se uma abordagem à resistência à compressão nos cubos e nos cilindros, aos seus mecanismos de rotura e às causas que influenciam na resistência do betão à compressão. Serão também relacionadas as tensões de rotura dos cubos e dos cilindros. Será também introduzido o conceito de módulo de elasticidade, assim como serão mostradas diversas maneiras utilizadas para o calcular e relacioná-lo com as tensões de rotura à compressão nos cubos e nos cilindros.

No **capítulo 3** faz-se uma descrição detalhada do equipamento utilizado nas instalações laboratoriais. Ainda neste capítulo será feita uma descrição dos ensaios de compressão efectuados assim como as condições de cura que devem ser efectuadas aos provetes.

O **capítulo 4** contém a apresentação e a discussão dos resultados obtidos. Em particular é calculada a tensão de rotura nos cubos e nos cilindros, através dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais, e serão feitas relações entre ambos para as idades que foram feitos os ensaios.

A dissertação encerra no **capítulo 5** onde se apresentam as conclusões e as propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Resistência do betão à compressão em cubos e cilindros

O betão é obtido a partir da mistura de diversos tais como cimento, agregados, água e eventualmente adições e adjuvantes dos quais, em geral apenas um é certificado: o cimento. Para além deste aspecto, o fabrico e a colocação do betão nas estruturas envolve, a diversos níveis a utilização de uma elevada mão de obra, cuja finalidade influencia de forma determinante a qualidade do material final. Deste modo o betão é considerado um material cujas propriedades apresentam uma elevada variabilidade que deve ser tida em conta no projecto de dimensionamento de estruturas. Por outro lado por se tratar de um material constituído por componentes que vão reagindo ao longo do tempo, as suas propriedades também são dependentes do tempo. Acresce ainda que o comportamento do betão pode ser significativamente afectado pelas condições de exposições ambientais que envolvem as estruturas.

Tudo isto implica a necessidade do engenheiro envolvido no projecto e execução de estruturas conhecer o melhor possível os materiais constituintes do betão e o efeito que esses materiais podem ter no comportamento mecânico e durabilidade de obras. Sob o ponto de vista do projecto de estruturas interessam basicamente duas propriedades fundamentais que o betão deve satisfazer: resistência e durabilidade. No entanto, para que estas propriedades possam ser atingidas é necessário que o betão possa ser colocado e compactado de forma adequada, surgindo assim uma terceira propriedade fundamental: a trabalhabilidade. Desta forma, o estudo da composição do betão deve ser efectuado tendo por base o objectivo de, para cada situação particular, o betão atingir a resistência, durabilidade e trabalhabilidade adequadas.

Assim sendo, neste capítulo vai-se começar por referir alguns aspectos básicos relativos aos diversos componentes do betão por forma a que se possa compreender melhor o comportamento estrutural deste material e verificar qual o seu peso na resistência à compressão do betão.

2.1 Influência dos constituintes do betão na sua resistência à compressão

2.1.1 Cimento

O cimento é um material inorgânico finamente moído que, quando misturado com água forma uma pasta e endurece em virtude das reacções e processos de hidratação e que, depois de endurecer, mantém a sua resistência e estabilidade mesmo debaixo de água [23]. O cimento está inserido no grupo dos ligantes, cuja designação se deve à facilidade que têm em aglomerar uma porção elevada de inertes de diferentes tipos, conferindo ao conjunto grande coesão e resistência, tornando-os deste modo aptos a serem utilizados na construção sob a forma de argamassas ou betões. Dentro dos ligantes, o cimento é considerado um ligante hidráulico [7].

O cimento é obtido pela cozedura a temperaturas na ordem de 1450°C de uma mistura devidamente proporcionada de calcário e argila. O ligante assim obtido é designado correntemente por cimento portland. No processo de cozedura das matérias primas anteriormente citadas, são originadas diversas reacções químicas, formando-se novos compostos que, ao arrefecerem, aglomeram-se em pedaços com dimensões variáveis (2 a 20mm) designados por clínquer. Após o arrefecimento, o clínquer é moído juntamente com adjuvantes, para facilitar a moagem e gesso para regular o tempo de presa. Os principais componentes do cimento são:

- Silicato tricálcico;
- Silicato bicálcico;
- Aluminato tricálcico;
- Aluminoferrato tetracálcico;

Dos componentes referidos, os que contribuem para a resistência da pasta de cimento são essencialmente o silicato tricálcico e o silicato bicálcico. O primeiro, por reagir mais rapidamente com a água, contribui para as resistências iniciais, enquanto o segundo contribui em maior grau para as reacções a longo prazo, dado a sua reacção ser bastante mais lenta. O comportamento mecânico do cimento, depende da sua composição química e da finura obtida na moagem. A finura é medida pela superfície específica, e

dado que só a superfície dos grãos de cimento participa nas reacções de hidratação, quanto maior a finura do cimento, maior é a quantidade de componentes hidratados e assim, maior a resistência da pasta de cimento. Os cimentos podem ser classificados quanto ao tipo e composição ou quanto à classe de resistência à compressão [24].

Apresenta-se de seguida uma tabela onde se pode verificar os diferentes tipos de cimentos existentes classificados quanto ao tipo e composição, e observar a percentagem da sua resistência em relação ao tipo I para diferentes idades.

Tabela 2.1 – Percentagem de resistência em relação ao tipo I (adaptado de [7])

Tipo de Cimento [Portland ASTM]	Natureza	Resistência à compressão (% em relação ao Tipo I ou betão de cimento Portland Comum)			
		1 dia	7 dias	28 dias	90 dias
I	Normal ou uso comum	100	100	100	100
II	Calor de hidratação moderado e moderada resistência a sulfatos	75	85	90	100
III	Alta resistência inicial	190	120	110	100
IV	Baixo calor de hidratação	55	65	75	100
V	Resistente a sulfatos	65	75	85	100

Os cimentos de classe de resistência mais elevada apresentam maior quantidade de silicatos tricálcico e maior finura relativamente aos cimentos menos resistentes. Como se pode verificar esses cimentos desenvolvem maiores resistências iniciais, embora exibam menor crescimento das resistências a longo prazo. Apresenta-se de seguida na tabela 2.2 os diferentes tipos de cimentos existentes classificados quanto à classe de resistência à compressão:

Tabela 2.2 – Classes de resistência do cimento (adaptado de [6])

Classes	Resistência à compressão (MPa)		
	Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência
	2 dias	7 dias	28 dias
32.5	-	≥ 16	≥ 32.5
32.5 R	≥ 10	-	≤ 52.5
42.5	≥ 10	-	≥ 42.5
42.5 R	≥ 20	-	≤ 56.5
52.5	≥ 20	-	≥ 52.5
52.5 R	≥ 30	-	

A dosagem de ligante num betão influencia essencialmente a trabalhabilidade, embora tenha também uma influência importante na resistência e durabilidade do betão. As misturas quando são pobres em ligantes apresentam-se ásperas, pouco trabalháveis, com tendência a segregar e têm um acabamento superficial difícil. Por outro lado, quando são muito ricas em ligante encontram-se excessivamente coesivas e aderentes sendo mais difíceis de colocar e compactar em obra [11].

Na figura 2.1, pode-se verificar a influência da dosagem de cimento nas tensões de rotura de compressão e de flexão, para betões fabricados com cimento da mesma amostra com trabalhabilidade, idade e cura iguais.

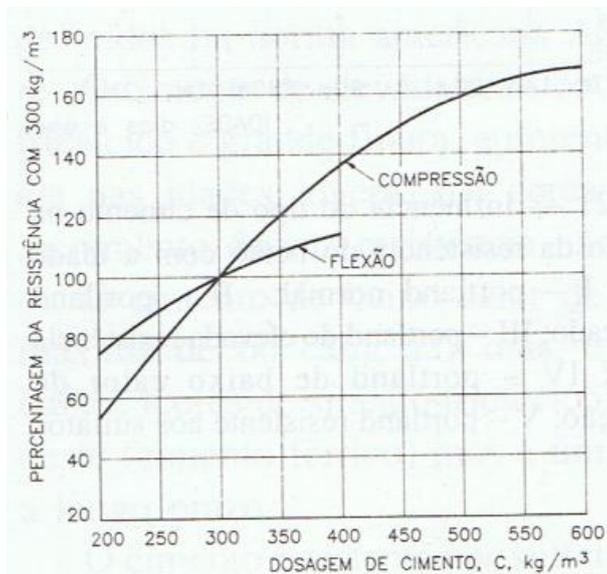


Figura 2.1 – Influência da dosagem de cimento nas tensões de rotura à compressão e flexão [9]

Como se pode verificar, para dosagens compreendidas entre 200 e 400 Kg/m³, as tensões de rotura do betão, por cada 50 Kg/m³ de aumento da dosagem de cimento sobem em média 20% na compressão e 10% na flexão. Este crescimento pressupõe que a natureza do cimento, a trabalhabilidade e as condições de cura se mantêm constantes [9].

2.1.2 Agregados

Os agregados são constituídos por elementos naturais ou artificiais, britados ou não, com partículas de tamanho e forma adequadas para o fabrico do betão. Estes ocupam em geral 70 a 80 % do volume do betão, ou seja cerca de $\frac{3}{4}$ do seu volume total e podem classificar-se segundo vários aspectos: petrográfico, massa volúmica, modo de obtenção e dimensão das partículas [7]. Quanto à petrografia classificam-se de acordo com as rochas de onde são originários: sedimentares, metamórficos e ígneos. No que se refere à massa volúmica classificam-se em agregados leves ($\gamma < 2000 \text{ kg/m}^3$), agregados normais ($2000 \leq \gamma \leq 3000 \text{ kg/m}^3$) e agregados muito densos ($\gamma > 3000 \text{ kg/m}^3$). Quanto ao modo de obtenção classificam-se em naturais e britados. Relativamente às dimensões classificam-se em areias e agregados grossos. As areias são agregados com máxima dimensão inferior a 5mm. Os agregados grossos apresentam dimensões superiores a 5mm, e deles fazem parte as britas [7].

O inerte influi em todas as propriedades do betão e especialmente na sua resistência através da composição granulométrica, da sua própria tensão de rotura e da resistência da ligação entre a pasta de cimento e a sua superfície. À medida que cresce a dosagem de cimento de um betão a sua tensão de rotura tende para um valor constante, que depende da tensão de rotura da rocha que constitui o agregado. Como normalmente a tensão de rotura das rochas utilizadas como agregados é superior a 60 ou 70 MPa, a resistência do betão só depende da resistência da pasta de cimento. Apenas no caso de se utilizarem rochas com tensões de rotura inferiores a cerca de duas vezes a da pasta de cimento, a resistência do betão depende da resistência do agregado, como no caso de betão constituído por agregados leves. Deste modo é conveniente fixar um limite para a tensão de rotura da rocha que constitui o inerte, sendo em regra suficiente para as necessidades correntes o de 60 a 70 MPa. Quando se pretende obter um betão com

tensões de rotura superiores aquelas é necessário elevar bastante o tal limite, pois as tensões desenvolvidas nas zonas de contacto entre as partículas do agregado são consideravelmente maiores do que as tensões médias aplicadas [7].

2.1.3 Água

A água desempenha dois papéis fundamentais na massa fresca e na fase de endurecimento do betão. No betão fresco, a água confere à massa trabalhabilidade adequada para permitir uma boa colocação e compactação. Na fase de endurecimento a água participa nas reacções de hidratação do cimento que conferem a resistência necessária ao betão. Todavia deve-se limitar ao mínimo a quantidade de água utilizada no fabrico do betão, pois a água em excesso evapora-se criando no betão uma rede de poros capilares que prejudicam a sua resistência e durabilidade. Assim a quantidade de água a utilizar deverá ser a indispensável para se obter a trabalhabilidade pretendida. Para que a água seja adequada ao fabrico do betão é necessário que não contenha matérias prejudiciais. As águas potáveis e outras que não apresentem cheiro nem sabor podem ser utilizadas no fabrico do betão. Não devem ser utilizadas águas com pH inferior a 4 nem águas que contenham óleos, gorduras, hidratos de carbono e sais prejudiciais. Quando as águas apresentam resíduos em suspensão deve limitar-se a sua utilização, dado que estas matérias prejudicam a ligação pasta de cimento-agregados [7].

Na tabela seguinte estão apresentadas as características a que devem obedecer as águas de amassadura para betões:

Tabela 2.3 – Características das águas para amassadura de betões [6]

Característica	Documento normativo	Valor a satisfazer	
		Betão simples	Betão armado e betão pré-esforçado
PH	NP 411	≥ 4	≥ 4
Resíduo dissolvido (g/dm^3)	E 380	≤ 35	≤ 10
Resíduo em suspensão (g/dm^3)	E 380	≤ 5	≤ 2
CQO (1) (mg/dm^3)	NP 1414	≤ 500	≤ 500
Teor de cloretos (mg/dm^3)	NP 423	≤ 4500	≤ 600
Teor de sulfatos (mg/dm^3)	NP 413	≤ 2000	≤ 2000
Teor de ortofosfatos (mg/dm^3)	E 379	≤ 100	≤ 100
Teor de nitratos (mg/dm^3)	E 382	≤ 500	≤ 500
Teor de sulfuretos (mg/dm^3)	NP 1417	≤ 100	≤ 100
Teores de sódio e de potássio (mg/dm^3)	E 381	≤ 1000	≤ 1000

De acordo com [9], é bem conhecida a influência da quantidade de água na tensão de rotura. A grandeza da sua acção depende do nível de resistência, pois um aumento de 10 litros por metro cúbico tanto pode provocar uma diminuição de 5 ou 6 MPa na tensão de rotura como cerca de 1 MPa. Este facto pode ser observado na fig.2.2:

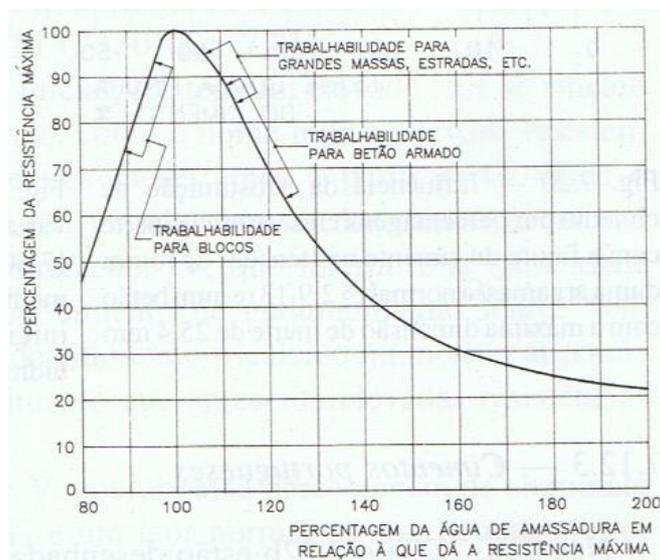


Figura 2.2 – Variação relativa da resistência à compressão de um betão com a quantidade de água de amassadura [9]

No entanto, se a água é em quantidade insuficiente obtém-se um betão muito seco com o qual será impossível conseguir uma compactidade satisfatória pois o atrito entre as partículas é tão grande que impede a sua arrumação perfeita.

A relação água-cimento (A/C) é o parâmetro que mais influencia as propriedades do betão. Esta razão representa a razão entre a dosagem efectiva de água e a dosagem de cimento. A dosagem efectiva de água é a diferença entre a quantidade total de água presente no betão fresco e a quantidade de água absorvida pelos agregados. Já em 1892 Feret descobre que sejam quais forem a natureza do inerte, as suas dimensões, as proporções relativas do ligante, inerte e água, as características e o grau de compactação da mistura, a tensão de rotura é função da relação entre os volumes absolutos do cimento e a soma dos volumes de água e vazios. Esta data marcou definitivamente o início do estudo da composição racional do betão e desde aí, o quociente A/C entre a dosagem de água, A, e a dosagem de cimento, C, popularizou-se de tal forma que hoje é considerado aferidor corrente das propriedades do betão [8].

Quanto maior for o seu valor, mais porosa e permeável é a pasta de cimento, tornando o betão menos resistente e mais sensível à acção dos agentes agressivos que originam a deterioração das estruturas [6].

Na figura 2.3 está ilustrada a influência da razão A/C na resistência do betão à compressão, com medições efectuadas em cubos com 20cm de aresta ensaiados aos 28 dias e conservados dentro de água:

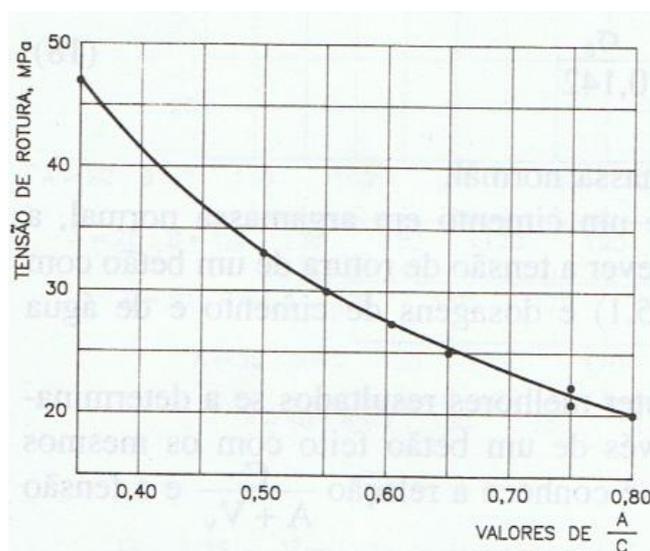


Figura 2.3 – Variação da tensão de rotura do betão com o valor de A/C [9]

Como se pode verificar, os resultados indicados mostram que duplicando a razão A/C a resistência do betão é reduzida na ordem de 50% logo pode-se concluir que quanto maior o valor de A/C menor será o valor da tensão de rotura. Para se obter betões de boa qualidade é sempre necessário limitar a razão A/C a valores baixos conforme se pode observar na figura atrás apresentada [9].

Na ausência de adjuvantes, o crescimento inicial da resistência do betão é muito influenciado pelo seu valor de A/C [9]. Assim, como se pode ver na figura 2.4, misturas com uma relação A/C menor, apresentam mais resistência que uma mistura com uma relação A/C superior.

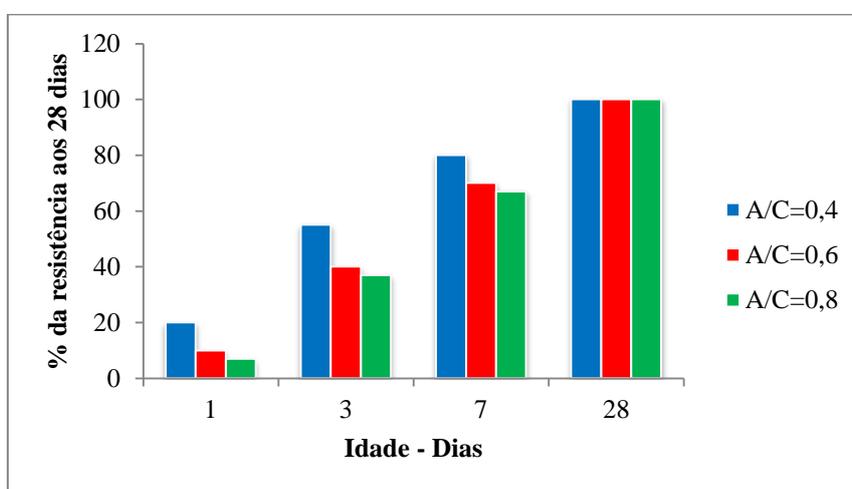


Figura 2.4 – Ganho da resistência em betões com diferentes valores de A/C nos primeiros 28 dias de idade (adaptado de [17])

Isto acontece pois numa mistura com uma relação A/C menor, ou seja num betão com uma elevada dosagem de cimento e relativamente pouca água os grãos de cimento estão mais próximos uns dos outros, e encadeiam-se de tal forma que não permitem a entrada de água atingindo assim uma consistência adequada mais rapidamente. Por outro lado, num betão formado por uma elevada dosagem de água em relação à de cimento, a hidratação dos componentes deste é mais fácil devido à maior dispersão das partículas do ligante, obtendo-se assim uma resistência mais lenta [9].

Refira-se que actualmente é possível fabricar betões com razões água-cimento até valores da ordem de 0,2, atingindo resistências na ordem dos 150MPa. Estes betões são praticamente impermeáveis, apresentando características de durabilidade excepcionais, permitindo a sua utilização em ambientes extremamente agressivos sem que existam preocupações relativas à deterioração das construções [6].

2.1.4 Adições

As adições são materiais inorgânicos, finamente divididos que podem ser adicionados ao betão com a finalidade de melhorar certas propriedades ou para adquirir propriedades especiais. De acordo com [11], as adições classificam-se em dois tipos consoante tenham ou não propriedades hidráulicas latentes ou propriedades pozolânicas:

- As adições do tipo I são adições quase inertes, como o filler calcário, não têm propriedades hidráulicas latentes nem propriedades pozolânicas.
- As adições do tipo II são as que apresentam propriedades hidráulicas latentes, como a escória de alto forno, ou propriedades pozolânicas, como as pozolanas naturais, as cinzas volantes ou a sílica de fumo.

Quando as adições foram inicialmente introduzidas como um componente do betão foram vistas essencialmente como um produto substituto do cimento sendo a sua utilização considerada apenas sob o ponto de vista económico. Todavia esta situação tem vindo a mudar, sendo que a utilização destes produtos tem sido incrementada com o objectivo de melhorar algumas propriedades do betão, tais como a durabilidade e a resistência [6].

As adições do tipo I têm um efeito benéfico nas seguintes propriedades do betão: trabalhabilidade, permeabilidade, calor de hidratação e atenuam ainda a tendência do betão para fendilhar [11].

Por outro lado, os betões fabricados com adições do tipo II apresentam, em geral, menores resistências iniciais, mas a longo prazo (3-6 meses) apresentam maiores resistências mecânicas em resultado da sua maior compacidade e do maior teor em silicatos de cálcio, maior resistência ao ataque químico devido à menor porosidade e maior resistência à penetração de cloretos [11].

2.1.5 Adjuvantes

Designa-se por adjuvante a substância utilizada em percentagem inferior a 5% da massa do cimento, adicionada durante a amassadura, aos componentes normais das argamassas e betões, com a finalidade de modificar certas propriedades destes materiais, quer no

estado fluido, quer no estado sólido, quer ainda no momento da passagem de um estado ao outro. Com a utilização de adjuvantes no betão, procura-se alcançar os seguintes efeitos: melhorar a trabalhabilidade, retardar ou acelerar a presa, acelerar o endurecimento nas primeiras idades, aumentar a resistência aos ciclos gelo – degelo, diminuir a permeabilidade e inibir a corrosão de armaduras [7]. Embora todos os adjuvantes sejam importantes para se atingir uma determinada propriedade do betão, os que merecem melhor atenção são os destinados a melhorar a trabalhabilidade. Como foi referido anteriormente, deve limitar-se ao máximo a quantidade de água utilizada no fabrico do betão. Os adjuvantes aqui têm um papel importante, pois permitem reduzir a água de amassadura sem prejudicar a trabalhabilidade. Estes adjuvantes são designados por redutores de água, distinguindo-se dois tipos: os plastificantes e os superplastificantes.

Os plastificantes permitem em geral uma redução de água da ordem de 5 a 15% mantendo a trabalhabilidade do betão, enquanto que os superplastificantes permitem reduções de água muito superiores, na ordem dos 25-35% ou mais. A actuação destes produtos no betão pode ser resumida da seguinte forma:

- Redução da tensão superficial da água, aumentando a sua capacidade de alastramento sobre as superfícies das partículas e o seu poder de penetração;
- Efeito lubrificante, diminuindo o atrito existente entre as partículas finas e entre esta e a água;
- Efeito dispensor devido à absorção das moléculas do adjuvante pelas partículas sólidas que as torna electricamente carregadas e assim repelentes.

Enquanto que nos plastificantes o efeito lubrificante é preponderante, nos superplastificantes o efeito dispensor é predominante. Deste modo com a utilização destes adjuvantes consegue-se:

- Aumentar a tensão de rotura do betão;
- Reduzir a dosagem de cimento, sem alterar a tensão de rotura nem a trabalhabilidade;
- Aumentar a trabalhabilidade, mantendo as dosagens de água e cimento;
- Diminuir a porosidade e permeabilidade;

Dado que as propriedades do betão dependem em grande parte da razão A/C, pode afirmar-se que o surgimento dos superplastificantes revolucionou de certa forma a

utilização do betão, tornando possível colocá-lo e compactá-lo onde anteriormente não era viável e permitindo o fabrico de betões de alta resistência e alto desempenho [6].

2.2 Classificação do betão

Desde a fabricação até à fase em que desempenha funções estruturais, o betão passa por dois estados diferentes: betão fresco e betão endurecido. O primeiro é definido como betão ainda no estado plástico e capaz de ser compactado por métodos normais. O segundo é definido como o betão que endureceu e desenvolveu uma certa resistência. O endurecimento do betão começa poucas horas após o seu fabrico e atinge aos 28 dias de idade cerca de 60 a 90% da sua resistência final, dependendo do tipo de cimento e do tipo de cura utilizado [6]. De acordo com [23] o betão endurecido é classificado de acordo com a sua massa volúmica em três categorias:

- Betão normal: Betão com uma massa volúmica após secagem em estufa (105° C) entre 2000 Kg/m³ e 2600 kg/m³
- Betão pesado: Betão com uma massa volúmica obtida após secagem em estufa superior a 2600 Kg/m³
- Betão Leve: Betão com uma massa volúmica após secagem em estufa não superior a 2000 Kg/m³, total ou parcialmente fabricado com agregados leves.

O betão normal é designado pelo símbolo C, o betão pesado pelo símbolo HC e o betão leve pelo símbolo LC.

Os betões são também classificados em diferentes classes de resistência de acordo com a resistência à compressão medida em cubos e em cilindros. Deste modo, ainda de acordo com [23], quando o betão for classificado em relação à sua resistência à compressão, as classes de resistência à compressão para betões de massa volúmica normal, são identificadas pela sigla “Cy/z” (tabela 2.4) onde “y” e “z” representam o valor característico mínimo de tensão de rotura à compressão, obtido aos 28 dias de idade do betão, a partir, respectivamente de provetes cilíndricos de 150mm de diâmetro de 300mm de altura ($f_{ck,cyl}$) e de provetes cúbicos com 150 mm de aresta ($f_{ck,cube}$) fabricados e curados conforme a referida norma. As classes de resistência do betão de massa volúmica normal podem ser observadas na seguinte tabela:

Tabela 2.4 – Classes de resistência à compressão para betão de massa volúmica normal [23]

Classe de resistência à compressão	Resistência característica mínima em cilindros $f_{ck,cyl}$ [MPa]	Resistência característica mínima em cubos $f_{ck,cube}$ [MPa]
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60

Para estarmos dentro dos critérios de controlo de qualidade e segurança, a resistência característica do betão deve ser igual ou superior à mínima resistência à compressão característica requerida para a classe de resistência à compressão especificada.

2.2.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão é a característica mecânica mais importante do betão, pois nas estruturas a função deste material é essencialmente resistir às tensões de compressão. Antes de falar propriamente acerca da resistência à compressão deste material, vai-se fazer uma referência aos diferentes tipos de ensaios efectuados ao betão. Assim sendo, de acordo com [1] e [28] os testes efectuados ao betão podem ser classificados em três categorias:

- **Ensaio de Controle de fabrico:** normalmente realizados pelo dono da obra ou pelas empresas de fabrico de betão para se proceder a ajustamentos necessários de modo a assegurar a qualidade do produto fornecido;
- **Ensaio de controle de conformidade:** realizados ou solicitados pelo engenheiro de acordo com determinado planeamento, para avaliar a conformidade com determinada especificação;

-
- **Ensaio suplementares:** ensaios que se realizam quando os resultados dos ensaios em provetes moldados não satisfizerem as exigências de conformidade ou não estiverem disponíveis, ou se existirem dúvidas quanto aos resultados, ou se os defeitos de execução ou a influência das condições meteorológicas extremas originarem dúvidas quanto à resistência, durabilidade ou segurança da estrutura.

A avaliação da resistência de um betão *in situ* é normalmente elaborada por duas razões: acompanhamento da resistência do betão antes e durante a construção ou a avaliação de uma estrutura existente. Em relação ao betão fresco, de acordo com [13] e [14] as situações mais frequentes são:

- Não conformidade do betão fornecido em termos de uma determinada especificação.
- Incertezas respeitantes à qualidade da mão-de-obra envolvida na fabricação do betão e a sua influência nas propriedades futuras do betão.
- Controle de qualidade da construção ou fabrico do betão.
- Acompanhamento do desenvolvimento da resistência, quando se procede a operações que têm lugar nas primeiras horas ou dias de uma estrutura, nomeadamente os trabalhos de descofragem, termo da cura, aplicação de cargas e aplicação de pré-esforço.

Para determinar a resistência à compressão de um determinado tipo de betão, normalmente submetem-se amostras de betão a ensaios de compressão. Os ensaios de compressão devem ser realizados com um número elevado de amostras. Os provetes utilizados para determinar a resistência à compressão do betão têm a forma cúbica ou cilíndrica. A norma [24] sugere as seguintes dimensões nominais para os cubos e cilindros:

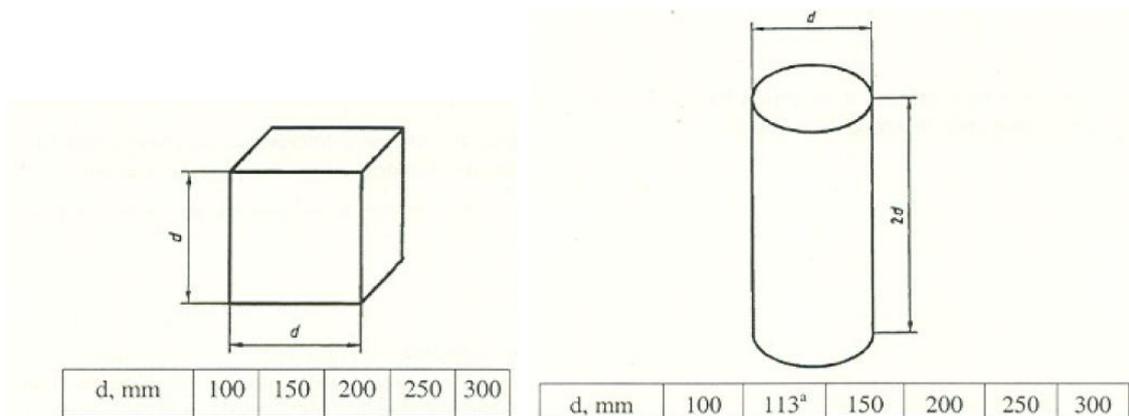


Figura 2.5 – Dimensões nominais para cubos e cilindros [26]

Os cubos são utilizados no Reino Unido e na Alemanha, entre outros países da Europa. Por outro lado os cilindros são as amostras mais utilizadas nos Estados Unidos da América, França, Canadá, Austrália e Nova Zelândia. Em Portugal o cubo com 20cm de aresta tem sido o espécime tradicionalmente usado para a determinação da tensão de rotura à compressão [17].

Os testes de resistência à compressão do betão podem ser classificados como destrutivos e não destrutivos, sendo que os não destrutivos permitem submeter o mesmo provete a diversos testes, permitindo deste modo o estudo da variação das suas propriedades com o tempo. Os ensaios destrutivos são elaborados há muitos anos, no entanto não há nenhum teste padrão disponível universalmente aceite. Diferentes técnicas e métodos são utilizados em diferentes países para a elaboração deste ensaio. Estes testes são efectuados em laboratórios e podem ser elaborados por diversas razões, mas o principal motivo que leva à sua realização é o de avaliar a tensão de rotura do próprio betão [17]. É do conhecimento da grande maioria dos engenheiros, que a resistência determinada por este método apenas representa uma aproximação da resistência real do betão *in situ*, pois num grande número de situações os provetes utilizados (cubos, cilindros) não reflectem as condições existentes na própria estrutura (não homogeneidade do betão, diferentes condições de cura, diferença de maturidade e do grau de humidade, segregação do betão, grau de compactação) e variação de resistência de elemento para elemento. Uma alternativa aos ensaios em provetes normalizados é a avaliação da resistência através de amostras (carotes) da própria estrutura, para examinar e ensaiar posteriormente, o que permite aproximar as condições das peças à situação real da estrutura. Embora os resultados obtidos proporcionem uma

melhor avaliação da qualidade do betão e da resistência de cada elemento da própria estrutura, os danos causados, a dificuldade, o tempo de execução e da obtenção de resultados são geralmente grandes inconvenientes. Deste modo, na figura 2.6 é possível observarem-se as diferenças existentes entre a classe de resistência especificada para um dado betão aos 28 dias e a resistência referida a provetes cúbicos de medições efectuadas *in situ* em diversos elementos.

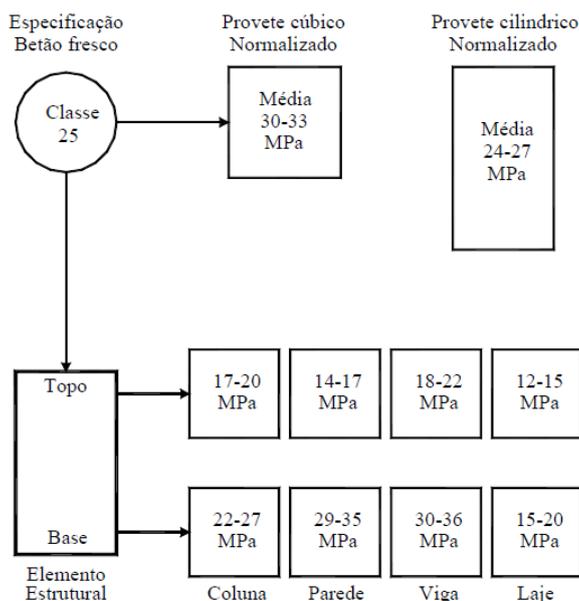


Figura 2.6 – Relação entre a resistência de provetes normalizados e a resistência do betão *in situ* (adaptado de [1])

A resistência de um betão é classificada como uma tensão, que por sua vez pode ser de compressão ou de tracção. Uma vez que o objectivo deste trabalho é a determinação das tensões de rotura à compressão em cubos e cilindros, de acordo com [23], a tensão de rotura à compressão é dada pela equação:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (2.1)$$

em que:

f_c é a resistência à compressão;

F é a carga associada à rotura;

A_c é a área da secção transversal do provete na qual se aplica a força de compressão;

Uma vez que o endurecimento do betão se processa ao longo do tempo, a resistência à compressão, tal como outras características deste material evolui também no tempo. Como para o efeito de dimensionamento das estruturas se considera a resistência aos 28 dias, estabeleceu-se esta idade para caracterizar esta propriedade.

A resistência do betão apresenta uma variabilidade significativa resultante quer da própria heterogeneidade do material, quer das condições de fabrico (controlo de qualidade). Desta forma, a resistência não pode ser caracterizada apenas pelo valor médio dos resultados obtidos dos ensaios de um determinado número de provetes. É também necessário ter em conta a dispersão dos valores. Assim sendo adoptou-se o conceito de resistência característica (f_{ck}) que tem em conta o resultado médio das tensões de rotura (f_{cm}) obtidos nos ensaios de provetes, e o desvio padrão (S) que tem em conta a dispersão dos valores. Quando os ensaios são elaborados com um número muito elevado de amostras, pode ser feito um gráfico com os valores obtidos de f_c vs a quantidade de amostras relativas a determinado valor de f_c também denominada frequência. A curva encontrada denomina-se curva de distribuição normal ou curva de Gauss para a resistência do betão à compressão e pode ser observada na figura 2.7:

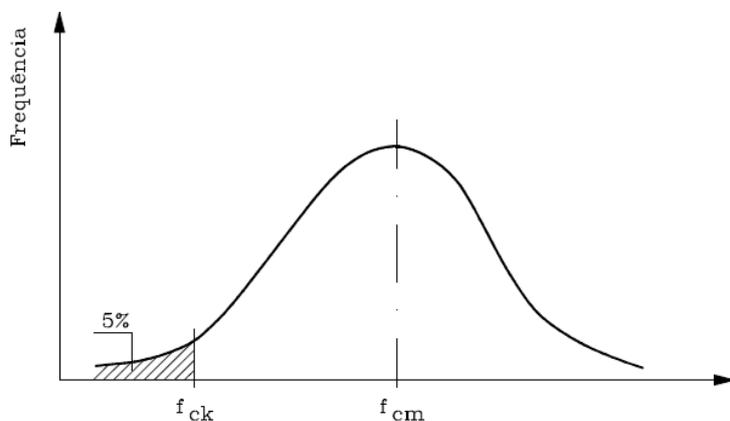


Figura 2.7 – Valor característico da resistência [16]

Nesta curva encontram-se dois valores de extrema importância:

f_{cm} que corresponde ao valor médio da resistência do betão à compressão;

f_{ck} que corresponde à resistência característica do betão à compressão;

O valor de f_{cm} corresponde à média dos valores de f_c obtidos para cada provete, ou seja:

$$f_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{ci}}{n} \quad (2.2)$$

O valor da resistência característica f_{ck} ou valor da população das resistências do betão especificado que é atingido com probabilidade de 95% é obtido com base na seguinte expressão:

$$f_{ck} = f_{cm} - \lambda \cdot S_n \quad (2.3)$$

O valor de λ depende do número de amostras, sendo que para um número elevado de amostras adopta-se 1,65. O valor de 1,65 corresponde ao quantilho de 5%, ou seja apenas 5 % das amostras possuem $f_c < f_{ck}$.

O desvio padrão S que corresponde à distância assinalada na curva de Gauss é calculado com base na seguinte fórmula:

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{ci} - f_{cm})^2}{n - 1}} \quad (2.4)$$

2.3 Rotura em compressão do betão

Para se conhecer qualquer tipo de resistência de um material incluindo a resistência à compressão, é necessário, em primeiro lugar perceber o que se entende pelo fenómeno de rotura. Do ponto de vista do engenheiro a rotura pode ser definida sob três aspectos principais:

- Separação de um sólido contínuo em dois ou mais pedaços distintos;
- Carga máxima suportada por uma peça solicitada de maneira geometricamente fixa

- Estado de deformação ou fissuração de tal modo excessivo que o material já não é utilizável.

Nos ensaios laboratoriais de compressão, aparecem geralmente dois tipos de rotura:

- rotura sujeita ao efeito do atrito entre a placa através da qual se aplica a compressão e o topo do espécime de ensaio
- rotura por arranque ou descoesão.

Aparece muitas vezes um terceiro tipo que consiste numa rotura cujo plano é inclinado em relação à direcção da compressão, aparentemente por corte. Deve-se à falta de planura das faces de compressão ou à falta de paralelismo entre elas.

O primeiro tipo de rotura aparece quando sistema de forças a que o provete está sujeito não é unidireccional devido à complexidade do que se passa na zona de aplicação das forças, resultante da restrição à expansão lateral sob carga, provocada pelo atrito das placas da prensa sobre aquelas superfícies. Sabe-se que a cada tensão de compressão que actua num dado material está sempre associada uma deformação transversal, cuja grandeza é regulada pelo coeficiente de Poisson. Os elementos do provete próximos da superfície de contacto estão sujeitos a um estado triplo de tensões: à tensão de compressão aplicada ao cubo/cilindro somam-se as forças de atrito, que actuam num plano normal ao daquela tensão. Tudo se passa portanto como se este elemento tivesse uma resistência muito maior do que aqueles que estão situados a uma maior distância dos pratos. A grandeza desta força depende não só do atrito entre os pratos da máquina e da superfície dos espécimes como também da própria deformabilidade daqueles. É como se o volume influenciado pelas faces laterais que impedem a dilatação dos topos esteja impedido de se deformar [9]. Como resultado desta restrição, num provete testado até à rotura, forma-se uma pirâmide não danificada com base no topo do elemento e vértice a uma distância aproximadamente igual a $1/2.d.\sqrt{3}$ (sendo d a dimensão lateral da amostra) [17]. À medida que a carga aumenta essa pirâmide penetra em cunha na parte não influenciada pelas forças de atrito, obtendo-se então uma rotura em pirâmide (fig 2.8.b e 2.9.a) [9]. Mas se a dimensão do provete for superior a $1,7.d$ significa que uma parte dele não vai sentir o efeito desta restrição, que é precisamente o que acontece com os cilindros. Pode-se anotar que os provetes cuja altura é inferior a $1,5.d$ revelam

uma resistência consideravelmente superior aqueles que apresentam uma altura maior [17].

Aparentemente quando uma tensão de corte actua em conjunto com a compressão uniaxial, a rotura é retardada, e pode-se concluir que não é a tensão de compressão que provoca a rotura, mas sim o aparecimento de tensões de tracção na parte lateral do provete. O colapso em si pode ser devido, pelo menos em alguns casos, à desintegração do centro do provete. A separação vertical tem sido observada em numerosos ensaios de cilindros, particularmente em provetes de alta resistência. Este efeito é menos comum em betão normal quando este tem na sua constituição agregado mais grosso, dado que fornece continuidade lateral (fig. 2.11a).

A rotura por descoesão ou arranque aparece tanto na tracção como na compressão quando não há impedimento da livre expansão do provete, não havendo deste modo as forças de atrito citadas anteriormente. Num ensaio de compressão, os vértices da amostra ficam sujeitos a concentrações de tensões de tracção, o que leva ao aparecimento de fissuras de dilatação com uma direcção paralela à do esforço. Este modo de rotura ocorre mais nos cubos do que nos cilindros devido à diferença de altura entre ambos. Com o decorrer do ensaio, devido ao aumento da carga estas tendem a juntar-se aumentando de comprimento, dando origem a uma fissuração generalizada conduzindo assim à rotura por arranque ou descoesão [9].

Nos ensaios laboratoriais aparecem geralmente roturas satisfatórias assim como roturas não satisfatórias. Uma rotura pode ser considerada satisfatória quando todas as quatro faces expostas estão fissuradas aproximadamente da mesma maneira, e geralmente com pequenos danos nas faces em contacto com os pratos [26]. Apresentam-se de seguida imagens de roturas satisfatórias e não satisfatórias para cubos e cilindros:



Figura 2.8 – Roturas satisfatórias de provetes cúbicos [26]

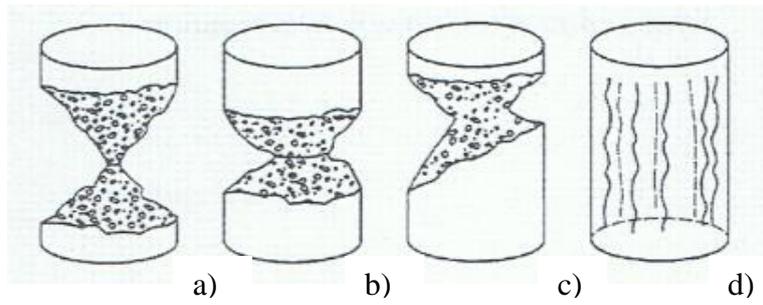


Figura 2.9 – Roturas satisfatórias de provetes cilíndricos [26]

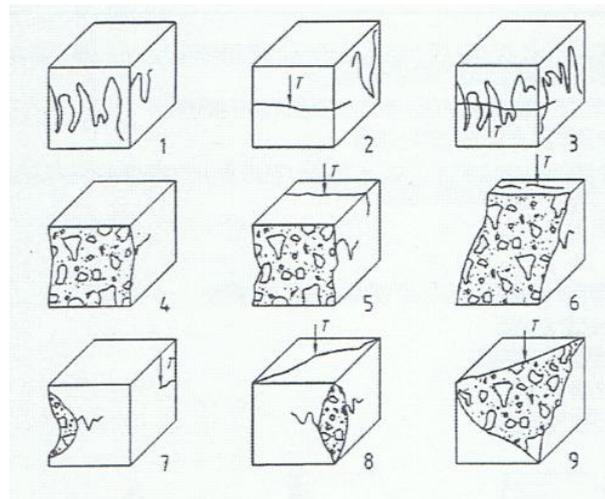


Figura 2.10 – Roturas não satisfatórias de provetes cúbicos [26]

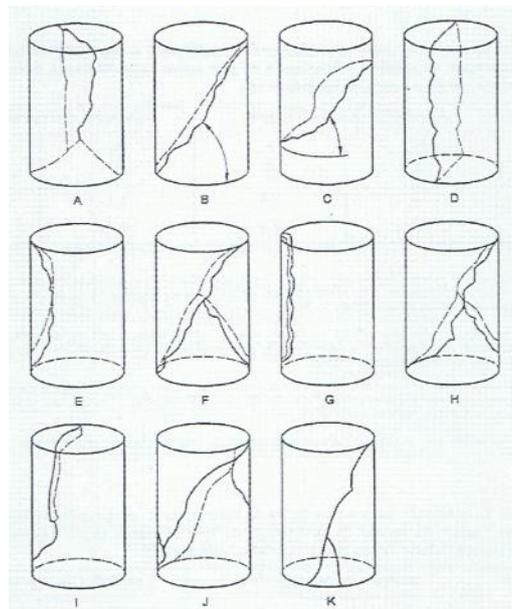


Figura 2.11- Roturas não satisfatórias de provetes cilíndricos [26]

Como se pode observar, a rotura é considerada não satisfatória quando as faces estão fissuradas de maneiras completamente diferentes. De acordo com [26] as roturas não satisfatórias podem ser causadas por:

- Atenção insuficiente aos procedimentos de ensaio, especialmente ao posicionamento do provete;
- Defeito na máquina de ensaio.

No capítulo 4 vai-se observar alguns tipos de rotura observados durante os ensaios de compressão efectuados.

2.4 Comparação da resistência à compressão em cubos e cilindros

De acordo com [17] a resistência cilíndrica é da ordem dos 0,80 da resistência cúbica, com provetes formados a partir de betões da mesma família:

$$f_{c,cyl} = 0,8 \times f_{c,cube} \quad (2.5)$$

Esta diferença de resistência é originada pelo atrito entre as faces dos provetes e os pratos das prensas que impedem a deformação transversal do betão conduzindo a maiores valores de resistência, tornando-se deste modo o cubo mais resistente que o cilindro [24]. No entanto diversos testes efectuados com ambas as formas, mostraram que afinal não existe uma fórmula assim tão simples que relacione as resistências de ambas as amostras. A relação da resistência cilindro/cubo depende em primeiro lugar da classe de resistência do betão através do qual foram obtidas as amostras, sendo mais alta quanto mais alta for a resistência do betão utilizado, como se pode ver na tabela abaixo representada.

Tabela 2.5 – Resistência à compressão de cubos e cilindros (adaptado de [17])

Valores médios de resistências características		Relação da resistência Cilindro/Cubo	Diferença da resistência (cubos-cilindro)
Cubo [MPa]	Cilindro [MPa]		
9	6,9	0,77	2,1
15,2	11,7	0,77	3,5
20	15,2	0,76	4,8
24,8	20	0,81	4,8
27,6	24,1	0,87	3,5
29	26,2	0,91	2,8
29,6	26,9	0,91	2,7
35,8	31,7	0,89	4,1
36,5	34,5	0,94	2
42,1	36,5	0,87	5,6
44,1	40,7	0,92	3,4
48,3	44,1	0,91	4,2
52,4	50,3	0,96	2,1

De acordo ainda com [17], foi então possível estabelecer uma fórmula que relaciona a relação entre a tensão de rotura do cilindro americano (15 cm de diâmetro por 30 cm de altura) e do cubo com 20 cm de aresta, sendo esta dada por:

$$\frac{f_{c,cyl}}{f_{c,cube}} = 0,76 + 0,2 \log_{10} \frac{f_{c,cube}}{19,59} \quad (2.6)$$

Onde $f_{c,cube}$ é a resistência à compressão obtida no cubo em MPa. Contudo, alguns factores secundários que afectam a resistência podem influenciar a resistência das duas formas da seguinte maneira: por exemplo, quanto maior for a dimensão do agregado constituinte do betão, menor vai ser a relação da resistência à compressão cilindro/cubo (admitindo que a mistura tem um traço de cimento constante e boa trabalhabilidade). Outro factor que afecta a relação da resistência à compressão dos dois tipos de amostras são as condições de humidade a que as amostras estão sujeitas durante os testes [20].

É difícil dizer que tipo de forma é melhor para ser utilizada, mas parece haver uma tendência, pelo menos para fins de pesquisa, a usar os cilindros em vez de cubos, sendo esta informação recomendada pela RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions), organização internacional de testes de laboratório. Isto porque os cilindros fornecem um leque de resultados mais

uniformes para amostras semelhantes. A sua resistência é menos afectada pelas propriedades e pelas dimensões do agregado usado na mistura, e a distribuição das tensões num plano horizontal é mais uniforme, contrariamente ao cubo. Recorde-se que os cilindros são betonados e testados na mesma posição enquanto nos cubos isso não acontece. Em estruturas de betão armado, verifica-se que o comportamento da estrutura quando solicitado à compressão é semelhante ao que ocorre quando se testa os cilindros, sendo por este motivo que os testes em cilindros são mais realistas [17].

Na figura 2.12 está indicada a relação entre a resistência medida em cubos e em prismas, verificando-se que, tal como foi dito a resistência do betão diminui com o aumento da esbelteza dos provetes.

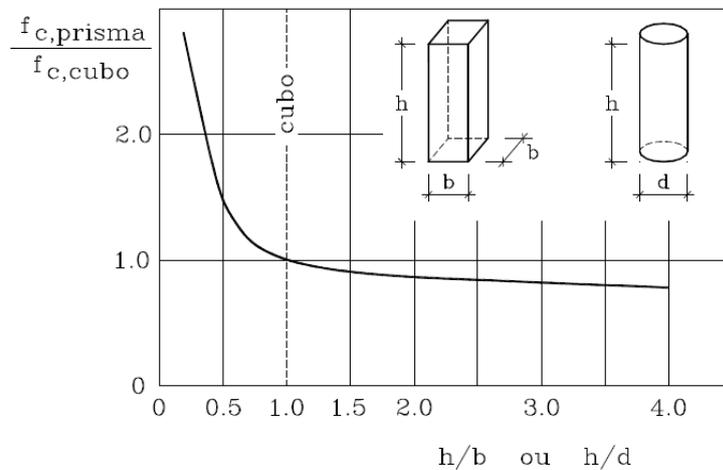


Figura 2.12 – Relação entre a resistência medida em provetes prismáticos e provetes cilíndricos [6]

Por outro lado, a relação altura/diâmetro do cilindro tem uma contribuição para a sua resistência. Apresenta-se de seguida a figura 2.13, onde se pode ver o efeito desta relação na resistência do cilindro:

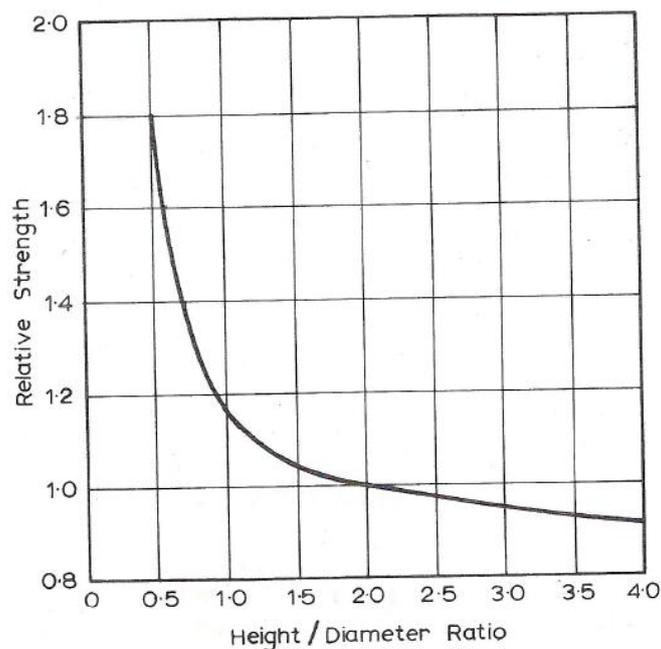


Figura 2.13 – Efeito da relação altura/diâmetro na resistência do cilindro [17]

Como se pode verificar, para valores de h/d mais baixos que 1,5, a resistência aumenta rapidamente devido ao efeito de restrição provocado pelos pratos da máquina de ensaio, que já foi explicado no capítulo 2.4. Por outro lado, quando o rácio h/d varia entre 1,5 e 4, a resistência é afectada mas numa maneira muito mais pequena, e para valores de rácio h/d situados entre 1,5 e 2,5, verifica-se que a resistência varia cerca de 5% da resistência obtida nos provetes standard ($h/d=2$). Para valores de $h/d > 5$ a resistência decresce mais rapidamente, tornando-se o efeito da esbelteza mais aparente.

Parece portanto que a escolha da relação altura/diâmetro de dois é adequada, não só porque o efeito de topo é largamente eliminado e passa a existir uma zona de compressão uniaxial no interior do provete. Se houver um ligeiro desvio neste rácio não afecta gravemente os valores de resistência medidos.

2.5 Módulo de elasticidade do betão

2.5.1 Definição e determinação do módulo de elasticidade do betão

As propriedades mecânicas do betão são a base para que seja dimensionada uma estrutura de betão armado sendo que a maioria dos projectos estruturais são feitos com base na resistência à compressão. A necessidade de se construir estruturas cada vez mais altas, esbeltas, com maior durabilidade e rigidez, fez com que houvesse um desenvolvimento das técnicas de construção e dos materiais a serem utilizados [4]. No entanto, para o cálculo estrutural se aproximar de uma maneira mais realista do comportamento do material é de grande importância o conhecimento das propriedades de deformação do material a ser utilizado, como a deformação, a fluência, a retracção entre outros parâmetros [16].

Quando na zona de uma estrutura se atinge uma tensão muito elevada, próxima da tensão de rotura determinada pelos métodos normalizados, tal tensão pode ser aliviada por transferência de carga para outro local sujeito a uma tensão mais baixa. Esta transferência de carga é possível porque o material pode sofrer grandes deformações sem rotura. Em relação à deformação, pode-se dizer que os materiais submetidos a esforços, podem apresentar um tipo de comportamento plástico, elástico ou até uma mistura dos dois (elasto-plástico). A deformação elástica é aquela em que o material deformado retorna ao seu formato original, após a remoção da carga que o deformou, enquanto que na deformação plástica, não há retorno. No entanto, a maioria dos materiais passa por um comportamento elástico, antes de atingir uma deformação plástica (irreversível). O módulo de elasticidade do betão é um dos parâmetros utilizados nos cálculos estruturais, que relaciona a tensão aplicada à deformação instantânea obtida e que permite ter uma melhor noção do comportamento da estrutura em relação à deformação ou a outras características desejadas do betão.

Vão ser apresentadas as relações entre tensões e extensões do betão obtidas em velocidade constante de aumento da tensão, e introduzir então o conceito de módulo de elasticidade. Quando se sujeita um cubo ou um cilindro a uma tensão (de tracção ou de compressão) unidireccional, σ , actuando uniformemente na sua secção, este sofre uma

deformação Δl (alongamento ou encurtamento) que, por unidade de comprimento, l , se designa por extensão, ε ,

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (2.7)$$

Designa-se por módulo de elasticidade, E , o quociente entre a tensão e a extensão, sendo deste modo definido como sendo o declive inicial da recta formada por esta relação, sendo que a relação linear entre essas grandezas é conhecida como lei de Hooke.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.8)$$

Substituindo-se $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ e $\sigma = N/A$ em 2.7 obtém-se:

$$\Delta l = \frac{Nl}{EA} \quad (2.9)$$

Esta equação mostra que o alongamento de uma barra linearmente elástica é directamente proporcional à carga e ao comprimento e inversamente proporcional ao módulo de elasticidade E e à área da secção A . O produto EA é designado de rigidez axial.

De acordo com [22] as deformações elásticas do betão dependem em grande parte da composição deste. No betão, o módulo de elasticidade é comandado basicamente pelo da pasta de cimento e pelo do agregado, pelas ligações entre estes dois componentes e ainda pelo seu arranjo, isto é, pelos poros e vazios, o que afecta a rigidez e a deformabilidade do conjunto. Tal como a resistência, o módulo de elasticidade depende da idade do betão, pois a pasta de cimento endurece ao longo do tempo.

Num ensaio tradicional em que se controla a subida de tensão, o provete de ensaio rompe bruscamente logo que se atinge a carga máxima, a uma extensão de cerca de 2×10^{-3} , na compressão, ou de $0,2 \times 10^{-3}$ na tracção, dando a impressão de que o betão se comporta como um material frágil, com pequeníssima deformação não elástica antes da rotura. Por outro lado, quando o ensaio de rotura se faz com velocidade constante de

subida da extensão, a curva tensão – extensão mostra um ramo descendente o que significa que quando se atinge a carga máxima, a fissuração não é ainda tão intensa que provoque a rotura completa do betão. A fissuração mantém uma estrutura estável no ponto em que se atinge a carga máxima, onde existe ainda capacidade para aumentar a deformação.

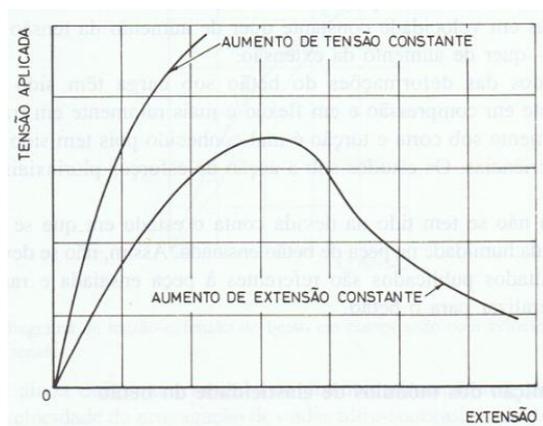


Figura 2.14 – Esquema dos diagramas tensão-extensão com velocidade constante de subida de tensão e extensão [9]

Quando se constrói, experimentalmente o diagrama da tensão, σ , em função da extensão, ϵ , verifica-se que tal diagrama não é rectilíneo, mas possui uma certa curvatura, como se pode observar em seguida.

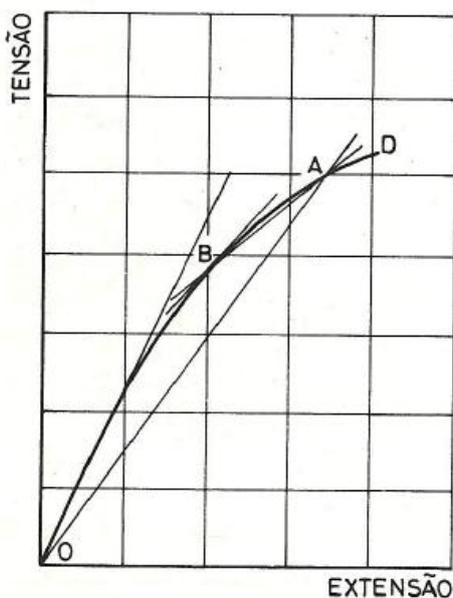


Figura 2.15 – Diagrama típico tensão-extensão do betão [2]

Este diagrama é típico de um material frágil, na medida que a rotura não se faz anunciar por intermédio de grandes deformações, contrariamente aos materiais dúcteis, cuja rotura se faz anunciar por intermédio de grandes deformações.

Não é pois possível definir um só módulo de elasticidade, e por isso é costume definir quatro módulos de elasticidade no ramo ascendente do diagrama tensão – extensão : tangente na origem , secante num ponto A, tangente num ponto B, e secante entre A e B. Praticamente o que interessa é o secante no ponto A: quociente da tensão aplicada pela extensão medida. Quanto maior esse módulo, maior a tensão necessária para o mesmo grau de deformação, e portanto mais rígido é o material.

A figura 2.16 mostra as relações existentes no diagrama tensão - extensão para diferentes classes de betão compreendidas entre C20/25 e C80/95, e como se pode verificar a cerca de 40% da tensão de rotura, a tensão e a extensão são proporcionais, sendo o módulo de elasticidade constante.

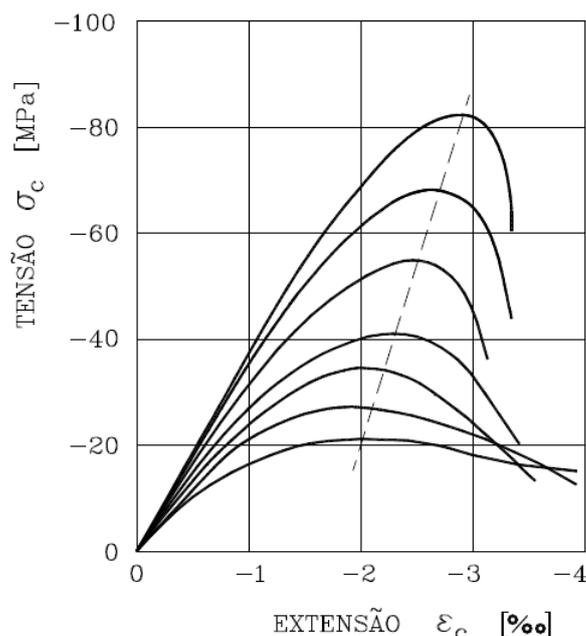


Figura 2.16 – Diagramas tensão-extensão do betão para diferentes classes de resistência [6]

O conceito de elasticidade é geralmente aplicado a materiais que possuam um comportamento linear, porém isto somente acontece quando da aplicação de tensões pequenas, sendo que, a partir de 40% da tensão de rotura o comportamento deixa de ser linear.

2.5.2 Relação entre tensão de rotura e módulos de elasticidade

As normas actuais, em grande parte, relacionam o módulo de elasticidade de um betão com sua resistência à compressão através de fórmulas matemáticas. A grande maioria dos projectos estruturais utiliza um valor para o módulo de elasticidade obtido através de fórmulas matemáticas, tomando como variável a resistência à compressão.

Para dar uma ideia da complexidade da relação que se possa estabelecer entre o módulo de elasticidade e a tensão de rotura, pode-se observar na tabela 2.6, a relação existente entre ambos:

Tabela 2.6 – Relação entre tensões de compressão e módulos de elasticidade do betão [17]

Tensão de compressão (f_c) [MPa]	Módulo de elasticidade (E) [GPa]
20	25
25	26
30	28
40	31
50	34
60	36

Verifica-se que o módulo de elasticidade aumenta com a resistência do betão, todavia a relação entre estas duas propriedades apresenta uma dispersão elevada. Embora existam expressões que relacionam a tensão de rotura com o módulo de elasticidade, é necessário determinar experimentalmente o seu valor quando estão em causa cálculos rigorosos sobre o comportamento de estruturas [24].

Existem muitas expressões que relacionam a tensão com a extensão, assim como muitas que relacionam o módulo de elasticidade com a tensão de rotura. Vai-se de seguida apresentar várias expressões que relacionam o módulo de elasticidade de um betão com a sua resistência à compressão quer para cubos e cilindros, onde o módulo de elasticidade vem sempre em GPa e a tensão de rotura do cubo ou do cilindro em MPa.

De acordo com [17], o módulo de elasticidade pode ser obtido para diferentes valores da resistência à compressão de um provete cúbico ($f_{c,cube}$) de acordo com a seguinte expressão:

$$E = 9,1 \times f_{c,cube}^{0,33} \quad (2.10)$$

Quando a densidade do betão (ρ) que constitui o provete é de 2300 Kg/m³ ou superior. A expressão correspondente obtida em [17] é baseada na tensão de compressão de uma amostra cilíndrica de betão registada aos 28 dias de idade, e toma a seguinte forma:

$$E = 9,5 \times (f_{c,cyl,28} + 8)^{0,33} \quad (2.11)$$

Ainda de acordo com [17], a relação existente entre o módulo de elasticidade e a tensão de rotura de um provete cilíndrico é:

$$E = 1,6 \times \rho^2 \times (f_{cyl} + 8)^{0,33} \times 10^{-6} \quad (2.12)$$

Por outro lado, a expressão que relaciona o módulo de elasticidade com a tensão de rotura de um provete cilíndrico é a seguinte:

$$E = 4,73 \times \sqrt{f_{c,cyl}} \quad (2.13)$$

Todas estas relações são válidas e também são afectadas consoante a condição da amostra no momento do teste. Um provete húmido terá um módulo de elasticidade superior a um provete seco [17].

Existe um ensaio descrito na especificação [12] que estabelece um método de ensaio próprio para determinar esta propriedade, sendo que esse ensaio não foi feito uma vez que o objectivo desta dissertação é avaliar as tensões de rotura em provetes cúbicos e cilíndricos com recurso a ensaios de compressão.



Capítulo 3

Instalações laboratoriais e instrumentação

3.1 Considerações gerais

O trabalho experimental realizado no âmbito desta dissertação foi conduzido no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa.

Os ensaios realizados foram ensaios de compressão em cubos e cilindros de diferentes tipos de betão, com o objectivo de avaliar a sua resistência à compressão e relacioná-la entre ambos.

3.2 Colheita/ Identificação dos provetes

As amostras de betão, foram preparadas em conformidade com [24], sendo que as dimensões dos provetes em estudo foram:

- Cubos: 150 mm de aresta
- Cilindros: 150 mm x 300 mm

Para conseguir obter estas amostras, foi necessário recorrer a obras, bem como a centrais de betão com os respectivos moldes de ferro (fig.3.1a), falar com o responsável da obra/central de betão, explicar a finalidade da visita e pedir que fornecesse betão suficiente para encher os respectivos moldes de modo a obter os provetes desejados. As amostras foram preenchidas com o mesmo tipo de betão em cada betonagem e foram todas vibradas durante o seu enchimento como se pode ver na fig.3.1b.



Figura 3.1 – a) Moldes dos cubos e cilindros
b) Enchimento e vibração

Os provetes foram retirados de dentro dos moldes cerca de 24 horas após o seu enchimento, e posteriormente foram conduzidos ao laboratório onde foram realizados os ensaios. Foram feitas um total de 10 betonagens, cujo objectivo inicial seria encher doze cubos e doze cilindros em cada uma, mas devido à ausência de moldes cilíndricos apenas foi possível encher 8 cilindros em cada betonagem durante as primeiras 5 betonagens, e nove cilindros em cada uma das últimas cinco betonagens. Em relação aos cubos foram feitos 12 cubos em cada uma das 10 betonagens. Assim sendo, no final foram ensaiados 120 cubos e 85 cilindros. Houve alguns ensaios que não correram como o esperado, devido a erros de manuseamento do software, bem como erros de calibração da máquina de ensaio, sendo que os resultados obtidos nestes provetes não entraram para análise no capítulo seguinte. Na tabela 3.1 pode-se ver os vários tipos de betão utilizados em cada enchimento, bem como o local onde este foi efectuado:

Tabela 3.1 – Tipos de betão ensaiados

Betonagem nº	Betão	Local
1	C25/30	Obra empresa engiarte (Lisboa)
2	C30/37	Central Concretope (Corroios)
3	C25/30	Central Concretope (Corroios)
4	C20/25	Central Concretope (Corroios)
5	C30/37	Central Concretope (Corroios)
6	C40/50	Central Concremat (Pinhal Novo)
7	C30/37	Central Concremat (Pinhal Novo)
8	C25/30	Central Concremat (Pinhal Novo)
9	C30/37	Central Concremat (Pinhal Novo)
10	C40/50	Central Concremat (Pinhal Novo)

Como se pode perceber, ficou-se com um leque muito grande de amostras para ensaiar, tornando-se portanto essencial um bom sistema de identificação dos provetes, sendo este procedimento muito importante para o controlo correcto dos mesmos nos ensaios. Deste modo foi definido um sistema de identificação para as amostras, de acordo com um código de 3 parâmetros, traduzido nas amostras como uma sequência de letras e números que os distingue e identifica. Cada sequência de identificação dos provetes começa com as letras “C” ou “CC” seguidos de um número “C1” ou “CC1”. Estas letras servem para identificar o tipo de amostra, correspondendo a letra “C” a uma amostra

cúbica de betão, e as letras “CC” a uma amostra cilíndrica de betão. O número que segue junto à letra indica o número da betonagem, por exemplo “CC2” significa então que se trata de um cilindro correspondente à segunda betonagem.

Após a primeira sequência, aparece um segundo número inscrito em cada provete, que corresponde precisamente ao dia em que esse provete é ensaiado. Como os ensaios são feitos aos sete, catorze e vinte e oito dias de idade, então o segundo número corresponde a um 7, 14 ou 28. Assim sendo, se aparecer “C2-7” já sabemos que se trata de um provete cúbico, da segunda betonagem que vai ser ensaiado aos 7 dias de idade.

Como foi referido, foram realizadas 10 betonagens, e em cada uma delas foram feitos 12 cubos e 9 cilindros. Pretendeu-se obter 12 cubos precisamente para ensaiar 4 deles aos sete dias, outros quatro aos 14 dias e por fim os últimos quatro aos 28 dias. Do mesmo modo, foram feitos 9 cilindros em cada enchimento precisamente para ensaiar 3 cilindros aos 7 dias, outros 3 aos catorze dias e por fim os últimos três aos 28 dias. Assim sendo, a última sequência de números que aparece diz respeito ao número do provete ensaiado, ou seja “CC2-7-3” significa que estamos perante um cilindro da 2ª betonagem, que vai ser ensaiado aos sete dias de idade e que corresponde ao terceiro cilindro que vai ser ensaiado nessa data.

3.3 Descrição do equipamento

No início de cada ensaio, foram pesadas as respectivas amostras na balança digital que se encontra no laboratório (fig.3.2a) e após pesagem estas foram conduzidas à prensa onde se realiza o ensaio de compressão propriamente dito (fig.3.3). Foram também colocados 4 deflectómetros à volta do provete (fig.3.2b), todos afastados à mesma distância da amostra, e por sua vez estes foram ligados a uma outra máquina, a Spider 8 que está também ligada ao computador, com a função de registar os valores fornecidos pelos deflectómetros. O sistema de ensaio consiste nestas máquinas ligadas a um computador com o software indicado para registar os valores fornecidos por ambas durante os ensaios. O Software utilizado foi o *HBM Catman 6.0[Interactive]*.



Figura 3.2 – a) Pesagem das amostras b) Amostra na prensa com os deflectómetros



Figura 3.3 – Máquina de ensaio (Prensa)

De acordo com [27], existem variadas características cujas máquinas de ensaio devem ser dotadas, essenciais para obter resultados fiáveis no fim do ensaio. A nível de aspectos construtivos das máquinas de ensaio, a norma recomenda que os pratos superior e inferior da máquina bem como os pratos auxiliares devem ser fabricados num material que não deforme irreversivelmente sempre que a máquina seja utilizada. A tolerância de planura dos pratos da máquina deve ser de 0,03mm para a área de contacto com o provete, e a área dos pratos da máquina em contacto com o provete deve ser igual ou superior à área dos provetes em ensaio. Se existir necessidade de reduzir a distância entre os pratos da máquina para assegurar que a prensa não exceda o seu curso, poderão ser utilizados blocos espaçadores, sendo que estes blocos podem ter uma secção quadrangular ou circular, e devem ser colocados sobre uma base adequada e não devem estar em contacto com os provetes. Em relação ao dispositivo indicador da força, a

máquina de ensaio deve dispor de dispositivos indicadores de força analógicos ou digitais, que permitam ler o valor da força com a exactidão requerida. Deve dispor também de um sistema que permita que a força máxima seja lida após o ensaio terminar, até que seja posto a zero novamente. As máquinas de ensaio à compressão devem também ser munidas de um sistema de controlo de aplicação da força, sendo que este sistema deve permitir a calibração da máquina e a aplicação da força de forma suave e sem choque bem como a taxas constantes previamente definidas. No início do ensaio, o prato superior deve autonivelar-se com a superfície de contacto do provete, mantendo-se nessa posição até à conclusão do ensaio. Para garantir o correcto posicionamento do provete em relação ao eixo de aplicação da carga, o prato inferior da máquina deve dispor de linhas para centragem, posicionadores ou quaisquer outros dispositivos que permitam a centragem dos provetes.

3.4 Descrição do método de cura e ensaio de compressão

Antes de se realizar qualquer ensaio de compressão, é necessário em primeiro lugar proceder à obtenção das amostras desejadas. As amostras foram obtidas como foi descrito em 3.2. O molde e a sua base devem estar fixos durante o processo de enchimento evitando-se assim a perda de betão. O uso de uma base rígida é essencial quando a compactação é efectuada por meio de vibração. Antes de proceder ao enchimento dos moldes, estes devem ser cobertos com óleo descofrante nas superfícies de contacto entre as paredes e a base do molde do futuro provete, para evitar a aderência entre a peça de betão e o respectivo molde [17].

No caso do cubo, para se proceder ao enchimento do molde, é aconselhável (embora pouco utilizado) o uso de um funil de enchimento que se coloca por cima do molde, resultando deste modo uma maior homogeneidade do betão. O molde é então cheio de betão até este transbordar e de seguida deve ser vibrado com recurso a um vibrador de agulha que deve ser efectuada durante o tempo mínimo necessário para atingir a compactação completa do betão. Deve-se evitar vibrações excessivas de modo a não causar perda de ar introduzido no betão. Após o processo de compactação, procede-se então ao nivelamento da superfície, removendo-se o excesso de betão excedente acima do bordo superior do molde com o auxílio de uma espátula de aço, recorrendo a

movimentos tipo serra e circulares [17]. Após estar concluída esta fase, o cubo deve ser armazenado e deixado em repouso durante 24 horas a uma temperatura entre $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ (ou $25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ em climas quentes) [23].

No fim deste período, o cubo é finalmente retirado do seu molde e o seu processo de cura deve ser feito dentro de água a uma temperatura entre 19 e 21°C , ou em câmara entre 18°C a 22°C e a humidade relativa $\geq 95\%$. Manter e medir esta humidade relativa não é simples, sendo necessário fazer verificações regulares para que na câmara as superfícies dos provetes estejam continuamente molhadas [25]. Este método de cura é usado em laboratório e também *in situ* quando se pretende determinar a qualidade potencial do betão. Claro que o comportamento do betão na estrutura pode ser inferior devido a uma compactação inadequada, segregação ou condições de cura adversas. Os efeitos do último factor são relevantes caso se pretenda saber quando a cofragem pode ser removida ou quando se poderá proceder a betonagens seguintes.

Por este motivo, as condições de cura dos cubos são feitas em condições o mais próximo possível da que este vai estar sujeito na estrutura. É preferível o uso de provetes de ensaio de maiores dimensões, pois os efeitos da temperatura e da humidade não são os mesmos num cubo, como são numa massa relativamente grande de betão [17]. Deve-se ter em especial cuidado no transporte dos provetes de ensaio evitar perdas de humidade e desvios da temperatura requerida nas várias etapas de transporte, através, por exemplo, do condicionamento do provete de ensaio endurecido em areia molhada, serradura, tecidos molhados ou em sacos de plástico selados contendo água [25].

Os ensaios de resistência à compressão efectuados aos diferentes provetes, seguiram as identificações da norma *NP EN 206-1*. De acordo com esta norma, os provetes destinados a serem ensaiados, devem ser armazenados e manuseados a uma temperatura entre 15°C e 22°C para que as suas propriedades não se alterem significativamente, por isso 24h após o seu enchimento os provetes foram desmoldados e conduzidos ao laboratório do departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa onde aí ficaram em repouso até aos dias dos seus ensaios. A idade a que os cubos devem ser testados é geralmente aos 28 dias, no entanto podem também ser feitos testes aos 3, 7 e 14 dias, com o objectivo de ter um leque mais vasto de resultados. No caso dos cubos em estudo nesta dissertação foram feitos ensaios aos sete, catorze e vinte e oito dias.

Nos ensaios referentes aos cubos, houve necessidade de reduzir a distância entre os pratos da máquina, pelo que foram colocados cinco blocos espaçadores e ainda uma chapa metálica para assegurar que o curso da prensa não fosse excedido como se pode observar na fig.3.4a).

No ensaio de compressão, o cubo é colocado na máquina de ensaio com as faces mais niveladas em contacto com os pratos da máquina. A carga sobre o cubo deve ser aplicada a uma taxa constante de 0,02 mm/s. Devido à não linearidade da relação tensão-extensão do betão, quando sujeito a tensões elevadas, a taxa de aumento da extensão deve ser aumentada progressivamente à medida que nos aproximamos da rotura, isto é, a velocidade do movimento da cabeça da máquina tem de ser aumentada, sendo que isto só pode ser feito com uma máquina operada hidraulicamente. A tensão de rotura deve ser indicada a intervalos de 0,5 MPa [17].

Em relação aos cilindros, o mais utilizado nos ensaios de compressão tem dimensões de 150 mm x 300 mm, e é geralmente betonado num molde feito de aço. Por vezes são também utilizados moldes não reutilizáveis, mas resultam numa aparente diminuição da resistência, devido à possível expansão do molde durante o processo de endurecimento [17]. O processo de enchimento do cilindro, o processo de cura e as idades a que deve ser testado deve ser feito em conformidade com o que foi escrito no início deste capítulo.

Quando são submetidos ao ensaio de compressão, o topo do cilindro é colocado em contacto com os pratos da máquina de ensaio, e sempre que os topos do cilindro são nivelados aquando o seu enchimento por meio de uma espátula de aço, verifica-se que estes se encontram sempre um pouco rugosos e não perfeitamente lisos. Perante tais circunstâncias as concentrações de tensões são reduzidas e verifica-se também uma grande redução na resistência do betão nas zonas onde não há contacto, sendo que para evitar esta perda é necessário conseguir obter faces totalmente niveladas e lisas. Para ultrapassar esta dificuldade, nas amostras cilíndricas em estudo nesta dissertação foram colocadas bases de neopreno no topo superior e inferior do cilindro como se pode ver na fig.3.4b, para assegurar que as faces ficassem totalmente lisas. Uma vez que os cilindros apresentam uma altura muito superior ao cubo, em vez de cinco blocos espaçadores apenas foram necessários três, e para além da chapa metálica, duas bases de nivelamento como se pode verificar na fig.3.4b.



Figura 3.4 – a) cubo com os blocos espaçadores

b) cilindro com os blocos espaçadores

No início do ensaio, após pesagem dos provetes e colocação dos quatro deflectómetros na prensa, o prato superior deve autonivelar-se com a superfície de contacto do provete, sendo que se aproximou o topo da amostra ao prato superior da máquina de ensaio, que assim que entram em contacto começa logo a carregar o provete com uma força muito pequena que estabiliza perto dos 20 KN. Após esta força estabilizar, tara-se a força no botão “zero” na máquina de ensaio e esta regressa aos 0KN. Nesta altura, como já houve contacto entre a peça de betão e a prensa, significa que já houve registo dos deflectómetros, logo é necessário também tarar esses valores, sendo este procedimento feito já no software *Catman*. As variáveis que o software vai registar os valores durante o ensaio são o tempo (Time Base), a força aplicada pela prensa (F), o deslocamento da prensa bem como os valores registados em cada um dos quatro deflectómetros (D1,D2,D3,D4). Quando o valor da força, registado pela célula de carga, se encontrar nos 0 KN e os valores registados pelos deflectómetros estiverem devidamente tarados, dá-se então início ao ensaio propriamente dito, que tem início ao carregar no botão “START” da máquina de ensaio. Quando o provete atinge a rotura, significa que o ensaio chegou ao fim, logo para o concluir carrega-se no botão “STOP” da prensa, retira-se o provete do seu interior e aspira-se todos os resíduos resultantes da sua rotura. A nível de resultados, a única coisa a fazer foi exportar os ficheiros registados no software para uma folha de Excel, e posteriormente neste programa efectuar todos os

cálculos que foram descritos no capítulo 2, cujos resultados podem ser vistos no Anexo I.

Capítulo 4

Apresentação e discussão dos resultados

Após a elaboração dos ensaios, e analisando os dados fornecidos pelo software utilizado, foi possível calcular a tensão de rotura associada a cada provete e deste modo comparar os seus valores entre ambos os provetes. A tensão de rotura está associada ao máximo valor de carga suportado pelo provete antes de atingir a rotura à qual está também associada uma extensão de rotura. Assim sendo, neste capítulo vai-se começar por apresentar os valores das tensões de rotura à compressão obtidas nos cubos e cilindros aos sete, catorze e vinte e oito dias de idade e vão ser feitas relações entre ambos. Vai-se também apresentar alguns tipos de rotura obtidos durante os ensaios laboratoriais efectuados.

4.1 Tensões de rotura à compressão

A tensão de rotura de cada de provete é obtida, como já foi referido no capítulo 2.2.1, através do quociente entre o valor máximo de força suportado pela amostra ao longo do ensaio de compressão e a área de contacto entre o provete e os pratos da máquina de ensaio. Estas tensões foram obtidas para todas as amostras em todos os ensaios (7, 14 e 28 dias). Os resultados obtidos individualmente para cada provete podem ser consultados nas tabelas apresentadas no Anexo I. Os resultados que se apresentam de seguida correspondem à média dos resultados da tensão de rotura f_c obtidos aos 7 dias para os cubos e cilindros em todas as betonagens, ou seja, vão ser apresentados os valores de $f_{cm,7}$ [MPa].

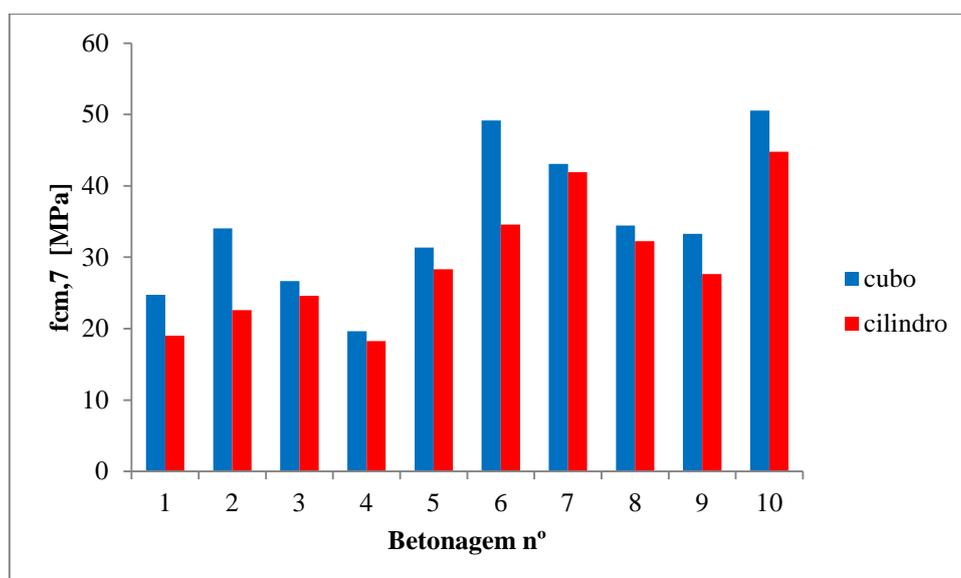


Figura 4.1 – Resultados da tensão de rotura média obtidos aos 7 dias para cubos e cilindros

Como se pode observar, em todas as betonagens foram obtidas resistências médias à compressão superiores nos cubos do que nos cilindros. Existem betonagens tais como a dois e a seis em que esta diferença é mais acentuada. Ao fazer uma primeira análise, aparentemente os betões mais resistentes são os betões correspondentes à betonagem seis, sete e dez, mas como também já foi dito, só é possível tirar conclusões sobre a classe de resistência do betão quando conseguirmos obter o valor da sua resistência à compressão característica, que só é possível conhecendo os valores da resistência aos vinte e oito dias de idade. Vai-se apresentar de seguida uma tabela onde podemos observar as relações existentes entre a resistência dos cubos/cilindros assim como a diferença das resistências apresentadas entre ambos aos 7 dias.

Tabela 4.1 – Relações das resistências médias obtidas aos 7 dias em cubos e cilindros

Betagem n°	Resistências médias obtidas fcm,7 [MPa]		Relação da Resistência Cilindro/Cubo
	Cubo	Cilindro	
1	24,74	19,00	0,77
2	34,06	22,61	0,66
3	26,68	24,61	0,92
4	19,64	18,25	0,93
5	31,38	28,32	0,90
6	49,17	34,58	0,70
7	43,09	41,93	0,97
8	34,44	32,27	0,94
9	33,30	27,64	0,83
10	50,55	44,77	0,89

Como já referido e pode ser observado na tabela 4.1, é notória a diferença observada na resistência de cubos e cilindros para a betonagem 2 e 6, mas, olhando para a tabela apresentada em anexo, pode-se verificar que está associado um valor de desvio padrão muito alto na medida que supera 10% do valor da média dos resultados obtidos nos ensaios referentes aos cubos da segunda betonagem ($S=3,30$) assim como aos resultados obtidos nos cilindros da sexta betonagem ($S=4,08$), o que significa que houve uma dispersão muito elevada nos resultados obtidos, tornando-se deste modo pouco conclusivos para validar uma relação de resistência à compressão de cubos e cilindros aos sete dias. Como também pode ser observado na tabela atrás apresentada, todas as outras betonagens apresentam diferenças mais próximas entre si. Assim sendo, fazendo uma análise aos valores obtidos na relação da resistência cilindro/cubo, resulta ainda que, aos sete dias a tensão de rotura à compressão nos cilindros é em média 85,1% da tensão de rotura à compressão dos cubos, ou seja:

$$f_{cm,cyl,7} = 0,851 f_{cm,cube,7}$$

Após esta análise efectuada aos resultados obtidos aos 7 dias, apresenta-se de seguida os resultados obtidos aos 14 dias:

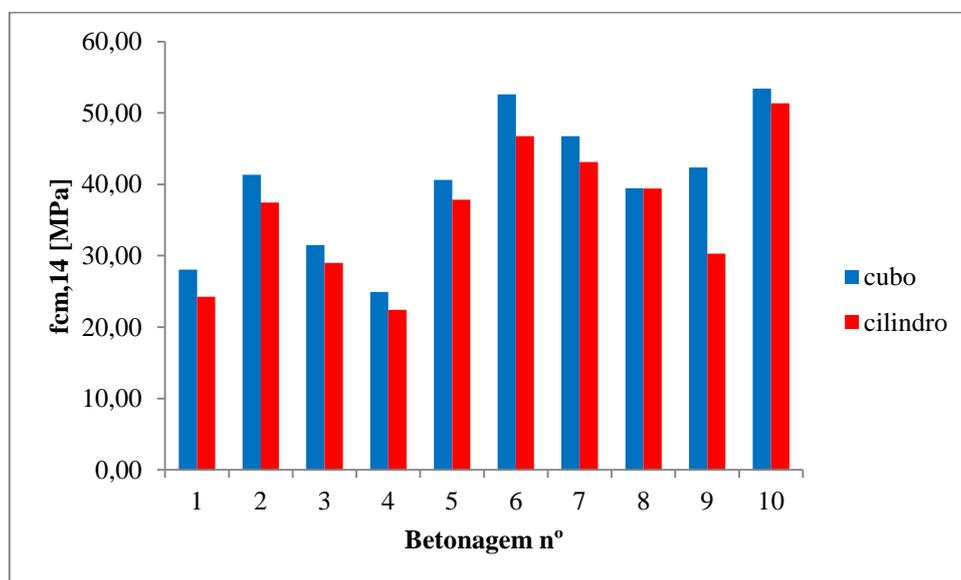


Figura 4.2 – Resultados da tensão de rotura média obtidos aos 14 dias para cubos e cilindros

Como se pode verificar novamente, voltou-se a obter maiores valores de tensão de rotura média à compressão para os betões utilizados nas betonagens seis, sete e dez, o que já seria de esperar uma vez que aos 7 dias verificou-se a ocorrência do mesmo. Ao

observar a figura acima apresentada, apenas a betonagem 8 apresenta resistências à compressão muito semelhantes quer nos cubos quer nos cilindros. Por outro lado, a betonagem 9 apresenta uma diferença muito acentuada da tensão de rotura média dos cilindros, comparativamente à dos cubos, o que não se verificou nos resultados obtidos relativamente aos sete dias. Esta diferença também pode ser explicada ao observar a tabela em anexo, pois verifica-se a existência de um desvio padrão muito elevado para os resultados obtidos nos cilindros desta betonagem ($S=4,96$) correspondendo este valor a precisamente 16% da média, significando portanto que houve uma dispersão muito elevada nos resultados obtidos para esta betonagem, tornando-se deste modo pouco conclusivos estes resultados para validar uma diferença da tensão de rotura à compressão em cubos e cilindros aos catorze dias de idade.

Apresenta-se de seguida uma tabela onde se pode verificar com mais precisão os resultados obtidos aos 14 dias assim como a relação e a diferença nos resultados obtidos para cubos e cilindros.

Tabela 4.2 – Relações das resistências médias obtidas aos 14 dias em cubos e cilindros

Betonagem nº	Resistências médias obtidas $f_{cm,14}$ [MPa]		Relação da Resistência Cilindro/Cubo
	Cubo	Cilindro	
1	28,04	24,23	0,86
2	41,33	37,44	0,91
3	31,51	28,98	0,92
4	24,93	22,42	0,90
5	40,63	37,86	0,93
6	52,58	46,77	0,89
7	46,76	43,14	0,92
8	39,44	39,41	1,00
9	42,37	30,30	0,72
10	53,41	51,37	0,96

Através da análise aos valores obtidos na relação da resistência cilindro/cubo da tabela nove, resulta que, aos catorze dias, a tensão de rotura nos cilindros é em média 89,7% da tensão de rotura dos cubos, ou seja:

$$f_{cm,cyl,14} = 0,90 f_{cm,cube,14}$$

Finalmente apresentam-se os resultados das tensões de rotura à compressão obtidas aos 28 dias, sendo que como foi referido anteriormente são as mais importantes, pois a

partir desta idade, como já foi referido não se verifica um aumento significativos das tensões de rotura.

Apresenta-se em primeiro lugar os resultados obtidos aos 28 dias para a tensão de rotura média, para todas as betonagens:

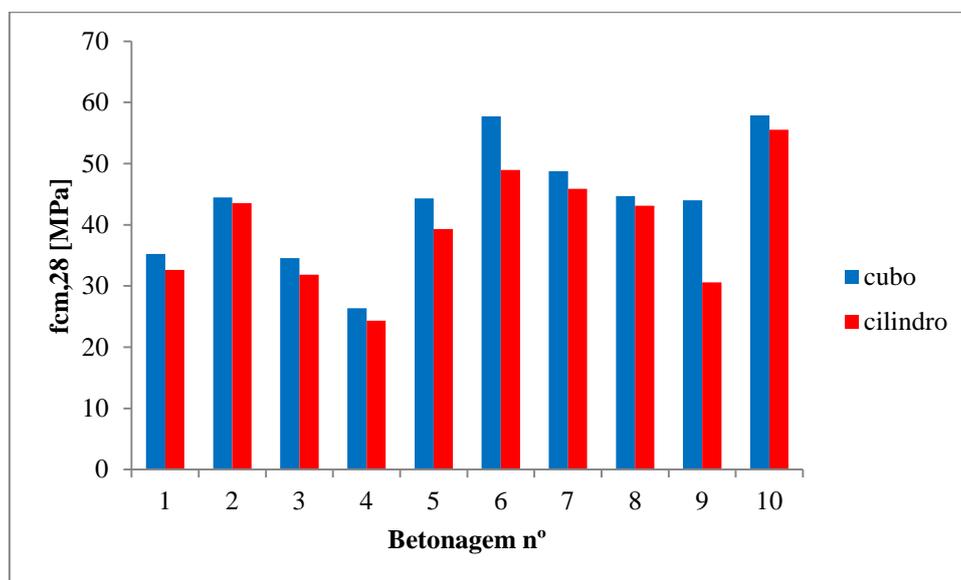


Figura 4.3 – Resultados da tensão de rotura média obtidos aos 28 dias para cubos e cilindros

Através da análise da figura 4.3, podemos perceber que os betões que apresentam maiores valores de tensão de rotura média à compressão, são os que deram origem às betonagens 6, 7 e 10, o que também aconteceu nos ensaios correspondentes aos 7 dias. Por outro lado, verifica-se que os valores da tensão de rotura média à compressão dos cubos aos vinte e oito dias são superiores aos dos cilindros em todas as betonagens. Na betonagem nove a diferença dos valores apresentados entre cubos e cilindros é bem mais acentuada, mas, uma vez mais ao analisarmos a tabela I.3 apresentada no Anexo I, verifica-se que os resultados obtidos referentes aos cilindros dessa betonagem apresentam um valor de desvio padrão muito alto ($S= 7,55$), na medida que corresponde a precisamente 24,68% da média, o que, mais uma vez mostra que houve uma dispersão muito grande dos resultados, tornando-se deste pouco conclusiva esta betonagem para efeitos de validar uma média da relação dos resultados entre cubos e cilindros.

Apresenta-se de seguida uma tabela onde se pode verificar com mais precisão os resultados obtidos aos 14 dias assim como a relação e a diferença nos resultados obtidos para cubos e cilindros:

Tabela 4.3 – Relações das resistências médias obtidas aos 28 dias em cubos e cilindros

Betonagem n°	Resistências médias obtidas f _{cm,28} [MPa]		Relação da Resistência Cilindro/Cubo
	Cubo	Cilindro	
1	35,23	32,62	0,93
2	44,45	43,51	0,98
3	34,54	31,85	0,92
4	26,35	24,31	0,92
5	44,32	39,29	0,89
6	57,73	48,94	0,85
7	48,73	45,90	0,94
8	44,66	43,10	0,97
9	44,00	30,59	0,70
10	57,89	55,52	0,96

Através da análise aos valores obtidos na relação da resistência cilindro/cubo da tabela acima apresentada, resulta que, aos vinte e oito dias, a tensão de rotura nos cilindros é em média 90,5% da tensão de rotura dos cubos, ou seja:

$$f_{cm,cyl,28} = 0,91 f_{cm,cube,28}$$

Vai-se agora mostrar os valores obtidos para a resistência à compressão característica obtida nos cubos e nos cilindros, com base na fórmula (2.3) e através da análise desses valores avaliar se a classe de resistência característica obtida tanto nos cubos como nos cilindros é ou não superior à mínima estabelecida na tabela 2.4.

Tabela 4.4 – Classes de resistências características obtidas

Betonagem n°	Classe de resistência especificada		Classe de resistência obtida	
	f _{ck,cyl} [MPa]	f _{ck, cube} [MPa]	f _{ck,cyl} [MPa]	f _{ck,cube} [MPa]
1	25	30	30,60	34,48
2	30	37	39,37	42,22
3	25	30	29,18	30,89
4	20	25	23,40	19,95
5	30	37	39,10	43,06
6	40	50	46,94	56,14
7	30	37	45,63	47,92
8	25	30	39,05	41,21
9	30	37	15,49	41,69
10	40	50	53,12	53,90

Como se pode verificar, em quase todas as betonagens a tensão de rotura característica obtida nos cubos e cilindros é igual ou superior à classe de resistência esperada significando que todos os betões associados à maioria das betonagens estão dentro dos critérios de controlo e qualidade estabelecidos em [6]. Apenas nas betonagens 4 e 6 isso não se verifica, mas também pode ser explicado ao analisar os valores de desvio padrão associado aos cubos obtido nas betonagens 4 ($S=3,2$), que corresponde a 12,14% do valor de $f_{c,m}$ obtido assim como o valor de desvio padrão associado ao cilindro da betonagem 9 ($S=7,55$), que fez com que estes valores fossem inferior aos esperados. Estes resultados podem ter tido influência pelo facto de as condições de cura dos provetes após o seu enchimento até ao dia dos ensaios não ter sido feito da maneira indicada pela norma [23]. Isto porque a norma recomenda, como já foi referido no capítulo 3.4 que o tempo de cura das amostras seja feito dentro de água a uma temperatura entre 19 e 21°C, ou em câmara entre 18°C a 22°C, o que não aconteceu com estes provetes pois foi impossível devido à ausência deste equipamento nas instalações laboratoriais onde foram efectuados os ensaios. Assim sendo, com base nos resultados fornecidos pelos ensaios, este betão não seria recomendado para ser utilizado em obra.

Para se compreender a evolução da tensão de rotura dos diferentes tipos de betões nos cubos e cilindros, durante os primeiros 28 de idade, apresenta-se em primeiro lugar uma figura referente aos cubos onde se pode ver esta evolução:

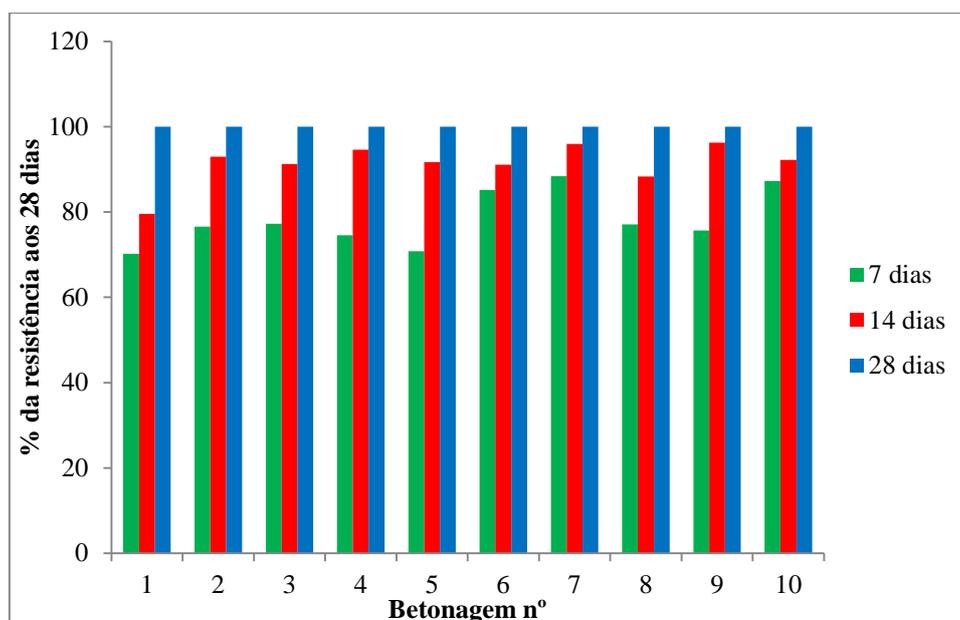


Figura 4.4 – Evolução da tensão de rotura nos cubos

Como se pode observar, os betões correspondentes às betonagens 6, 7 e 10 que como se viu são os betões que apresentam valores de tensão de rotura média mais elevados e por sua vez maior classe de resistência, foram precisamente os betões que aos sete dias já apresentavam mais de 80% da resistência obtida aos 28 dias. Nas restantes betonagens todos apresentaram valores no intervalo compreendido entre os 70 e os 80%. Por outro lado, verifica-se também que o maior aumento da tensão de rotura ocorre nos primeiros 7 dias de idade, que atinge, em média, 78,3% da sua resistência aos 28 dias. Aos catorze dias de idade, a generalidade dos provetes apresentava uma tensão de rotura média à compressão superior a 90% do que a que se viria a verificar aos 28 dias. As excepções correspondem aos ensaios das betonagens um e oito onde os valores obtidos correspondiam respectivamente a 79,6% e a 88,3% da referida tensão. Este facto pode ser melhor observado na tabela 4.5 onde se podem ver com precisão os valores obtidos das percentagens em relação aos 28 dias.

Tabela 4.5- Evolução da tensão de rotura nos cubos

Betonagem nº	7 dias	14 dias	28 dias
1	70,2%	79,6%	100
2	76,6%	92,9%	100
3	77,3%	91,2%	100
4	74,6%	94,6%	100
5	70,8%	91,7%	100
6	85,2%	91,1%	100
7	88,4%	95,9%	100
8	77,1%	88,3%	100
9	75,7%	96,3%	100
10	87,3%	92,3%	100

Verificou-se que, em média, aos 14 dias de idade os cubos apresentam uma tensão de rotura correspondente a 91,4% da sua tensão de rotura aos 28 dias. Assim sendo verifica-se nos cubos que:

$$f_{\text{cm,cube},7} = 0,783 f_{\text{cm,cube},28}$$

$$f_{\text{cm,cube},14} = 0,914 f_{\text{cm,cube},28}$$

De seguida apresenta-se outra figura mas desta vez referente aos cilindros, por forma a compreender a evolução da tensão de rotura nos mesmos, durante os primeiros 28 dias de idade:

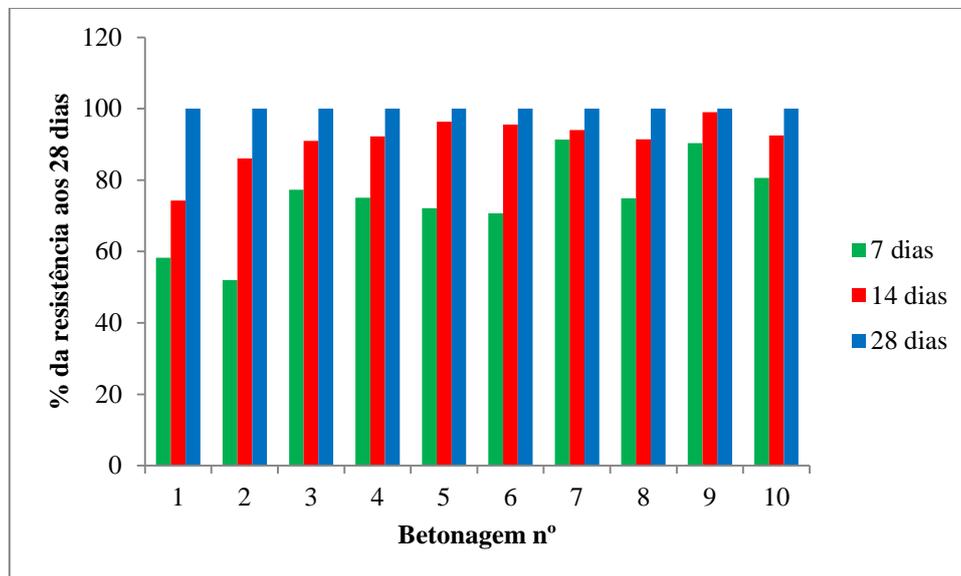


Figura 4.5 – Evolução da tensão de rotura nos cilindros

Através da análise da figura 4.5, verifica-se de imediato que a evolução da tensão de rotura nos primeiros 7 dias de idade nos cilindros da betonagem 7 e 9 é a que sofre um maior aumento, apresentando já, precisamente 91,34% e 90,36% da resistência que apresentaram aos 28 dias. Este facto pode ser observado com mais precisão na seguinte tabela:

Tabela 4.6- Evolução da tensão de rotura nos cilindros

Betagem nº	7 dias	14 dias	28 dias
1	58,3%	74,3%	100
2	51,9%	86,1%	100
3	77,3%	90,9%	100
4	75,0%	92,2%	100
5	72,1%	96,4%	100
6	70,7%	95,6%	100
7	91,3%	93,9%	100
8	74,9%	91,4%	100
9	90,4%	99,0%	100
10	80,6%	92,5%	100

Verifica-se portanto, que nos primeiros 7 dias de idade, os cilindros ganham uma resistência no geral inferior à dos cubos em comparação com a sua resistência aos 28 dias, sendo que aos 7 dias a sua resistência é, em média, de 74,2% da sua resistência aos 28. Por outro lado, aos 14 dias a evolução da tensão de rotura dos cilindros já é mais semelhante à dos cubos, sendo que, nesta idade estes apresentam em média uma resistência de 91,2% da sua resistência aos 28 dias. Assim sendo, verificou-se que:

$$f_{\text{cm,cyl},7} = 0,742 f_{\text{cm,cyl},28}$$

$$f_{\text{cm,cyl},14} = 0,912 f_{\text{cm,cyl},28}$$

4.2 Tipos de rotura obtidos

Como foi referido em 2.3 nos ensaios laboratoriais onde se pretende levar a amostra de betão à rotura, aparecem roturas satisfatórias assim como roturas não satisfatórias. Vai começar por se apresentar algumas roturas satisfatórias obtidas em cubos:



Figura 4.6 – Roturas satisfatórias obtidas em provetes cúbicos

Estas roturas podem ser consideradas satisfatórias, pois, como foi referido no capítulo 2.3 todas as faces estão fissuradas aproximadamente da mesma forma. Vai-se agora apresentar algumas roturas satisfatórias obtidas em provetes cilíndricos:



Figura 4.7 – Roturas satisfatórias obtidas em provetes cilíndricos

Por outro lado também como foi referido no capítulo 2.3, a rotura de um provete cúbico ou de um provete cilíndrico dá-se pela propagação das fissuras no betão devido às tensões de tracção instaladas. Também foram obtidas roturas não satisfatórias, que aparecem devido ao posicionamento incorrecto do provete ou mesmo por defeito da máquina de ensaio. Apresenta-se em primeiro lugar roturas não satisfatórias obtidas em provetes cúbicos:



Figura 4.8 – Roturas não satisfatórias obtidas em provetes cúbicos

Como se pode observar, este tipo de rotura é considerado não satisfatória pois as faces do mesmo provete não estão fissuradas de igual modo. Apresenta-se de seguida roturas não satisfatórias obtidas nos cilindros:



Figura 4.9 – Roturas não satisfatórias obtidas em provetes cilíndricos

De referir que os provetes onde foram obtidas roturas não satisfatórias não entraram para os cálculos anteriormente apresentados, como se pode verificar nas tabelas apresentadas no Anexo I.

Capítulo 5

Conclusões e sugestões para desenvolvimentos futuros

5.1 Conclusões

Como foi referido, esta dissertação surgiu na perspectiva de contribuir mais um pouco para os estudos da relação existente entre cubos e cilindros, formados a partir de betões da mesma família, das tensões de rotura à compressão apresentadas em ambos em diferentes idades. Pretendeu-se também verificar se as classificações dos betões obtidas nos ensaios estavam de acordo com as esperadas.

Em relação aos resultados obtidos nos ensaios de compressão, efectuados aos 7, 14 e 28 dias verificou-se, relativamente às tensões de rotura, que tal como o esperado, estas apresentam valores mais baixos nos cilindros relativamente aos cubos em todas as idades, sendo este aspecto congruente com o indicado na tabela 2.4 do capítulo 2.2. Relativamente à passagem dos 7 aos 28 dias, verifica-se que a tensão de rotura nos cilindros se vai aproximando da dos cubos. Conclui-se que a tensão de rotura obtida aos 7 dias corresponde no caso dos cubos a 78,3% da obtida aos 28 dias. No que diz respeito aos cilindros, o valor correspondente é de 74,2%. Por outro lado, ao analisar os resultados obtidos aos 14 dias, conclui-se que quer os cubos quer os cilindros apresentam uma resistência na ordem dos 91% da resistência que apresentam aos 28 dias. Este facto sugere que os cubos ganham mais resistência e mais rapidamente que os cilindros.

Por outro lado, verificou-se também que aos 7 dias os cilindros apresentam uma resistência correspondente a 85,1% da resistência apresentada pelos cubos. Aos 14 dias de idade esta diferença corresponde a 90% e por último aos 28 dias a resistência cilíndrica corresponde a 91% da resistência cúbica.

Pretendeu-se também com esta dissertação classificar os betões que foram sujeitos aos ensaios, e ver se estavam dentro das classificações esperadas. Verificou-se que em 80%

das betonagens, a classificação obtida para os betões corresponde à esperada, sendo que este ponto realça dois aspectos fundamentais de referir:

- A fiabilidade encontrada situa-se na ordem dos 80%
- A necessidade de se proceder a ensaios com o intuito de assegurar a segurança da futura estrutura

Como foi referido no capítulo 4, houve ensaios em que se registaram valores elevados do desvio padrão, quando comparados com a média. Este aspecto sugere que estes elevados valores podem estar relacionados com diversos aspectos cuja metodologia poderia ter sido melhorada nomeadamente:

- Condições de cura dos provetes desde o seu enchimento até à desmoldagem
- Condições de cura dos provetes desde a desmoldagem até ao dia do ensaio
- Aferição prévia do equipamento de ensaio

5.2 Sugestões para desenvolvimentos futuros

Como foi referido na introdução, este trabalho teve como objectivo relacionar as tensões de rotura à compressão em cubos e cilindros aos 7, 14 e 28 dias de idade. Seria de interesse também estudar assim como relacionar a tensão de rotura à tracção entre cubos e cilindros para as mesmas idades. Outra proposta como trabalho futuro seria também obter os módulos de elasticidade pelo ensaio descrito na especificação [12] também para cubos e cilindros provenientes da mesma família de betão e relacioná-los entre si.

Referências Bibliográficas

1. BUNJEY, J.- *The testing of concrete in structures*, Surrey University Press, 2nd Edition, Glasgow, 1989 (citado em [29])
2. FIP - fib Bulletin 51- Textbook on behavior, design and performance, vol.1
3. FIP - fib Bulletin 52- Textbook on behavior, design and performance, vol.2
4. FIP - fib Bulletin 53- Textbook on behavior, design and performance, vol.3
5. CEB-FIP *Model Code for Concrete Structures*, pp. 348 (Comité Euro-International du Béton), Abril 1978 (citado em [17])
6. COSTA, A; APPLETON, J. – *Estruturas de Betão I*, Lisboa, IST, 2002
7. COUTINHO, A.; GONÇALVES, A. – *Fabrico e Propriedades do Betão Volume I*. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1994.
8. COUTINHO, A.; GONÇALVES, A. – *Fabrico e Propriedades do Betão Volume II*. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1994.
9. COUTINHO, A.; GONÇALVES, A. – *Fabrico e Propriedades do Betão Volume II*. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1994.
10. Especificação LNEC E 226 – Betão: Ensaio de compressão, 1968
11. Especificação LNEC E 378 – Betões: Guia para a utilização de ligantes hidráulicos (citado em [6])
12. Especificação LNEC E 397- Betões: Determinação dos módulos de elasticidade em compressão, 1993

-
13. LOPES, S ; BUNJEY, J. – Ensaio para a determinação da resistência do betão “in-situ”, Associação Técnica da indústria de cimento, nº14, Maio 1994, pp 19-16 (citado em [29])
 14. MURPHY, E.W- *The interpretation of Tests on the strength of concrete in structures, In situ/Non destructive testing of concrete*, ACI, Detroit, 1984, pp 377 – 392 (citado em [29])
 15. NEPOMUCENO, M. – *Estudo da Composição de betões*, Covilhã, UBI, 1993
 16. NETO, A; HELENE, P. – *Módulo de Elasticidade : Dosagem e avaliação de modelos de previsão do Módulo de Elasticidade de Concretos*, IBC – 44º Congresso brasileiro.
 17. NEVILLE, AM – *Properties of concrete*. EUA, Longman Scientific & Technical, 1993.
 18. NEWMAN, J.; CHOO, B – *Advanced Concrete Technology - Constituent Materials*. EUA, Elsevier Butterworth Heinemann, 2003
 19. NEWMAN, J.; CHOO, B – *Advanced Concrete Technology – Concrete Properties*. EUA, Elsevier Butterworth Heinemann, 2003
 20. NEWMAN, J.; CHOO, B – *Advanced Concrete Technology – Processes*. EUA Elsevier Butterworth Heinemann, 2003
 21. NEWMAN, J.; CHOO, B – *Advanced Concrete Technology – Testing and Quality*. EUA, Elsevier Butterworth Heinemann, 2003
 22. NP EN 1992-1-1, Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios, 2008
 23. NP EN 206-1, Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade, 2005

24. NP EN 12390-1, Ensaaios do betão endurecido. Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes, 2003
25. NP EN 12390-2, Ensaaios do betão endurecido. Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica, 2003
26. NP EN 12390-3, Ensaaios do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio, 2003
27. NP EN 12390-4, Ensaaios do betão endurecido. Parte 4: Resistência à compressão. Características das máquinas de ensaio, 2003
28. NP EN 206-93- Betão : Comportamento, Produção, colocação em obra e critérios de conformidade – IPQ, Lisboa, 1993 (Citado em [29])
29. PEREIRA, J.- Avaliação da resistência à compressão do betão através de ensaios não destrutivos, UC, 1999



Anexo I

Resultados dos ensaios de compressão dos provetes cúbicos e cilíndricos de betão



Resultados dos ensaios efectuados aos 7 dias

Tabela I.1 - Resultados obtidos nos ensaios efectuados aos 7 dias

Betonagem	Amostra	fc [MPa]	fc,m [MPa]	S
1	c1-7-1	25,12	24,74	1,29
	c1-7-2	26,40		
	c1-7-3	23,65		
	c1-7-4	23,78		
	cc1-7-1	17,42	19,00	2,24
	cc1-7-3	20,59		
2	c2-7-1	37,18	34,06	3,30
	c2-7-2	34,39		
	c2-7-3	30,60		
	cc2-7-1	23,55	22,61	1,40
	cc2-7-2	21,01		
	cc2-7-3	23,28		
3	c3-7-1	27,34	26,68	1,14
	c3-7-2	27,81		
	c3-7-3	26,34		
	c3-7-4	25,25		
	cc3-7-1	24,40	24,61	0,30
	cc3-7-2	24,82		
4	c4-7-1	21,03	19,64	1,01
	c4-7-2	19,53		
	c4-7-3	18,61		
	c4-7-4	19,40		
	cc4-7-1	17,45	18,25	1,12
	cc4-7-2	19,04		
5	c5-7-1	33,24	31,38	1,80
	c5-7-2	31,02		
	c5-7-3	29,04		
	c5-7-4	32,21		
	cc5-7-1	29,27	28,32	1,35
	cc5-7-2	27,36		
6	c6-7-1	50,80	49,17	1,42
	c6-7-2	48,49		
	c6-7-4	48,23		
	cc6-7-1	37,47	34,58	4,08
	cc6-7-3	31,70		
	7	c7-7-1	42,30	43,09
c7-7-2		43,87		
c7-7-1		43,47	41,93	1,35
cc7-7-2		41,35		
cc7-7-3		40,95		

	c8-7-1	33,89		
	c8-7-2	35,21		
	c8-7-3	33,30	34,44	1,00
8	c8-7-4	35,34		
	cc8-7-1	31,94		
	cc8-7-2	31,83	32,27	0,67
	cc8-7-3	33,03		
	c9-7-1	35,22		
	c9-7-2	32,23	33,30	1,67
	c9-7-3	32,46		
9	cc9-7-1	28,13		
	cc9-7-2	27,42	27,64	0,42
	cc9-7-3	27,39		
	c10-7-1	53,53		
	c10-7-2	49,91	50,55	2,18
	c10-7-3	48,34		
10	c10-7-4	50,40		
	cc10-7-1	45,69		
	cc10-7-2	44,20	44,77	0,81
	cc10-7-3	44,40		

Resultados dos ensaios efectuados aos 14 dias

Tabela I.2 - Resultados obtidos nos ensaios efectuados aos 14 dias

Betonagem	Amostra	fc [MPa]	fc,m [MPa]	S
1	c1-14-1	28,65	28,04	1,06
	c1-14-2	26,73		
	c1-14-3	28,74		
	c1-14-4	29,07		
	cc1-14-1	24,15	24,23	0,12
	cc1-14-2	24,32		
2	c2-14-1	40,50	41,33	1,29
	c2-14-2	40,32		
	c2-14-3	41,37		
	c2-14-4	43,13		
	cc2-14-1	36,36	37,44	1,94
	cc2-14-2	39,68		
cc2-14-3	36,28			
3	c3-14-1	34,52	31,51	2,09
	c3-14-2	31,15		
	c3-14-3	30,63		
	c3-14-4	29,72		
	cc3-14-1	29,00	28,98	0,72
	cc3-14-2	28,25		
cc3-14-3	29,69			
4	c4-14-1	24,56	24,93	1,19
	c4-14-2	24,10		
	c4-14-3	26,69		
	c4-14-4	24,37		
	cc4-14-1	23,19	22,42	0,68
	cc4-14-2	22,16		
cc4-14-3	21,91			
5	c5-14-1	40,78	40,63	1,16
	c5-14-2	39,40		
	c5-14-3	41,71		
	cc5-14-1	37,76	37,86	1,46
	cc5-14-2	39,37		
	cc5-14-3	36,47		
6	c6-14-1	54,77	52,58	3,09
	c6-14-2	50,40		
	cc6-14-1	47,53	46,77	0,87
	cc6-14-2	45,82		
	cc6-14-3	46,96		
7	c7-14-1	45,87	46,76	1,21
	c7-14-2	46,26		

	c7-14-3	48,14		
	cc7-14-2	42,00		
	cc7-14-3	44,29	43,14	1,62
	c8-14-1	38,39		
	c8-14-2	40,26		
	c8-14-3	40,03	39,44	0,87
8	c8-14-4	39,08		
	cc8-14-1	40,68		
	cc8-14-2	39,09	39,41	1,15
	cc8-14-3	38,44		
	c9-14-1	40,51		
	c9-14-2	44,03	42,37	1,77
	c9-14-3	42,58		
9	cc9-14-1	27,32		
	cc9-14-2	27,54	30,30	4,96
	cc9-14-3	36,03		
	c10-14-1	51,29		
	c10-14-2	52,98	53,41	2,37
	c10-14-3	55,97		
10	cc10-14-1	49,59		
	cc10-14-2	53,15	51,37	2,52

Resultados dos ensaios efectuados aos 28 dias

Tabela I.3 - Resultados obtidos nos ensaios efectuados aos 28 dias

Betonagem	Amostra	fc [MPa]	fc,m [MPa]	S	fc,k [MPa]
1	c1-28-1	35,46	35,23	0,38	34,48
	c1-28-2	34,81			
	c1-28-3	35,63			
	c1-28-4	35,03	32,62	1,01	30,60
	cc1-28-1	31,53			
	cc1-28-2	33,52			
	cc1-28-3	32,82			
2	c2-28-1	44,16	44,45	1,12	42,22
	c2-28-2	43,51			
	c2-28-3	45,69			
	cc2-28-1	42,05	43,51	2,07	39,37
	cc2-28-2	44,98			
	cc2-28-3	44,98			
3	c3-28-1	36,30	34,54	1,83	30,89
	c3-28-2	35,90			
	c3-28-3	33,27			
	c3-28-4	32,69			
	cc3-28-1	32,38	31,85	1,33	29,18
	cc3-28-2	32,84			
	cc3-28-3	30,34			
4	c4-28-1	27,14	26,35	3,20	19,95
	c4-28-2	27,93			
	c4-28-3	28,68			
	c4-28-4	21,64			
	cc4-28-1	24,78	24,31	0,46	23,40
	cc4-28-2	24,29			
	cc4-28-3	23,87			
5	c5-28-1	43,76	44,62	0,78	43,06
	c5-28-2	44,83			
	c5-28-3	45,27			
	cc5-28-1	39,22	39,29	0,09	39,10
	cc5-28-2	39,35			
6	c6-28-1	58,24	57,73	0,79	56,14
	c6-28-2	58,14			
	c6-28-3	56,82			
	cc6-28-1	48,23	48,94	-	46,94
	cc6-28-2	49,65			
7	c7-28-1	49,01	48,73	-	47,92
	c7-28-2	48,44			
	cc7-28-1	46,00	45,90	-	45,63
	cc7-28-2	45,80			

	c8-28-1	46,53			
	c8-28-2	45,72			
	c8-28-3	43,02	44,66	1,73	41,21
8	c8-28-4	43,38			
	cc8-28-1	44,53			
	cc8-28-2	41,67	43,10	2,02	39,05
	c9-28-1	43,43			
	c9-28-2	45,33	44,00	1,15	41,69
	c9-28-3	43,24			
9	cc9-28-1	26,70			
	cc9-28-2	25,78	30,59	7,55	15,49
	cc9-28-3	39,30			
	c10-28-1	56,31			
	c10-28-2	57,23	57,89	2,00	53,90
	c10-28-3	60,14			
10	cc10-28-1	54,13			
	cc10-28-2	56,19	55,52	1,20	53,12
	cc10-28-3	56,23			
