



**FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

# **DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA IN-SITU DO BETÃO**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil  
na Especialidade de Construções

Autor

**Carlos Samuel Silvestre Caiado**

Orientador

**Prof. Doutor Fernando José Forte Garrido Branco**

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada.

**Coimbra, julho, 2014**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Professor Doutor Fernando Branco, por todo o apoio e disponibilidade que sempre me prestou, tornando possível elaborar este trabalho.

A todos os professores e elementos do departamento de engenharia civil da FCTUC.

A todos os meus colegas e amigos que sempre me apoiaram e incentivaram tornando mais fácil percorrer este caminho.

Aos meus pais e família que apesar de todas as dificuldades, sempre me apoiaram e nunca me deixaram desistir proporcionando-me condições para evoluir.

Á minha namorada por me apoiar incondicionalmente, pela paciência que tem tido comigo sem ela este trabalho não era possível.

E a todos os que mesmo indiretamente me ajudaram a tornar esta jornada da minha vida possível.

## RESUMO

Este trabalho faz parte de uma pesquisa bibliográfica, em que se procurou fazer numa primeira parte, uma compilação de como evolui resistência do betão ao longo do tempo, enunciando os parâmetros que influenciam a resistência e descrevendo o processo normalizado que caracteriza essa resistência. Numa segunda parte procurou-se juntar todos os ensaios normalmente utilizados, para avaliar a resistência do betão *in-situ*, fazendo uma descrição dos mesmos, enunciando as vantagens, limitações, aplicações e identificando os parâmetros que influenciam os resultados. Na terceira parte deste trabalho faz-se uma comparação entre as normas NP EN 13791 e RILEM NDT4, em que estas normas correlacionam alguns métodos da avaliação da resistência do betão à compressão *in-situ*.

## ABSTRACT

This work is part of a literature search, which sought to do in the first part, a compilation of the concrete strength evolves over time, setting out the parameters that influence the strength and describing the standard process that characterizes this resistance. In the second part we tried to gather all the tests commonly used to assess the strength of the concrete *in-situ*, making a description of them, outlining the advantages, limitations, applications and identifying the parameters that influence the results. In the third part of this work makes a comparison between the NP EN 13791 and RILEM NDT4 where these standards correlate some methods of evaluating the compressive strength of concrete *in-situ*.

---

## ÍNDICE DE TEXTO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
a) Enquadramento .....	1
b) Objetivos.....	2
c) Organização da dissertação .....	2
<b>2. RESISTÊNCIA MECÂNICA E SUA EVOLUÇÃO AO LONGO DO TEMPO..</b>	<b>4</b>
a) Como evolui a resistência do betão ao longo do tempo .....	4
b) Parâmetros que influenciam a evolução de resistência .....	6
c) Avaliação de resistência normalizada (em cubos/cilindros).....	13
d) Especificações técnicas sobre avaliação da resistência in-situ .....	24
<b>3. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA IN-SITU .....</b>	<b>25</b>
a) Método da maturidade: .....	25
i. Descrição do método .....	25
ii. Aplicações .....	29
iii. Vantagens e limitações .....	30
b) Avaliação de resistência através de Carotagem:.....	30
i. Descrição do método .....	30
ii. Aplicações .....	34
iii. Identificação dos parâmetros que influenciam os resultados.....	34
iv. Vantagens e limitações .....	35
c) Avaliação de resistência através de ultrassons: .....	35
i. Descrição do método .....	35
ii. Aplicações .....	38
iii. Identificação dos parâmetros que influenciam os resultados.....	38
iv. Vantagens e limitações .....	38
d) Avaliação de resistência através de determinação de dureza superficial: .....	39

---

i.	Descrição do método .....	39
ii.	Aplicações .....	42
iii.	Identificação dos parâmetros que influenciam os resultados.....	42
iv.	Vantagens e limitações .....	44
e)	Avaliação de resistência através de resistência à penetração: .....	45
i.	Descrição do método .....	45
ii.	Aplicações .....	46
iii.	Identificação dos parâmetros que influenciam os resultados.....	47
iv.	Vantagens e limitações .....	47
f)	Avaliação de resistência à tração:.....	48
i.	Descrição do método .....	48
ii.	Aplicações .....	49
iii.	Identificação dos parâmetros que influenciam os resultados.....	50
iv.	Vantagens e limitações .....	50
<b>4.</b>	<b>CORRELAÇÕES ENTRE MÉTODOS DE AVALIAÇÃO.....</b>	<b>52</b>
a)	Comparação entre a norma NP EN 13791 e a norma RILEM NDT4 .....	52
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>63</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>64</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Evolução da resistência à compressão do betão ao longo do tempo (www.fhwa.dot.gov). .....	5
Figura 2: Influência da dosagem de cimento nas tensões de rotura à compressão e flexão (Carminho, 2012). .....	8
Figura 3: Variação relativa da resistência à compressão de um betão com a quantidade de água de amassadura (Carminho, 2012). .....	10
Figura 4: Variação da tensão de rotura do betão com o valor de A/C (Carminho, 2012)... ..	11
Figura 5: Ganho da resistência em betões com diferentes valores de A/C nos primeiros 28 dias de idade (Carminho, 2012). .....	12
Figura 6: Forma, dimensões e tolerâncias dos provetes (NP EN 12390-1). .....	14
Figura 7: Relação entre a resistência de provetes normalizados e a resistência do betão <i>in-situ</i> (Carminho, 2012). .....	15
Figura 8: Valor característico da resistência (Carminho, 2012).....	16
Figura 9: Roturas satisfatórias de provetes cúbicos (NP EN 12390-3).....	19
Figura 10: Roturas satisfatórias de provetes cilíndricos (NP EN 12390-3). .....	
Figura 11: Roturas não satisfatórias de provetes cúbicos (NP EN 12390-3). .....	20
Figura 12: Roturas não satisfatórias de provetes cilíndricos (NP EN 12390-3). .....	20
Figura 13: Relação entre a resistência medida em provetes prismáticos e provetes cilíndricos (Carminho, 2012). .....	23
Figura 14: Efeito da relação altura/diâmetro na resistência do cilindro (Carminho, 2012). ..	23
Figura 15: Aplicação do Método da Maturidade, adaptado (Carino, 2001). .....	29
Figura 17: Datalogger.....	29
Figura 16: Termopares .....	
Figura 18: Plano de prospeção das armaduras .....	
Figura 19: CoverMeter .....	33
Figura 20: Carotes de Betão .....	
Figura 21: Caroteadora.....	34
Figura 23: Mesa de corte de carotes.....	34
Figura 22: Ensaio de Compressão .....	
Figura 24: Transmissão direta .....	37
Figura 25: Transmissão semidirecta.....	37

Figura 26: Transmissão indireta ou superficial .....	37
Figura 27: Ensaio de ultrassons.....	37
Figura 28: Ábaco de correlação do martelo de Schmidt (Moura, 2012).....	40
Figura 29: Ilustração da sequência de execução do ensaio de Esclerometria (Moura, 2012) .....	41
Figura 30: Esclerómetro de Schmidt – secção longitudinal (Moura, 2012).....	41
Figura 31: Esclerómetro de Schmidt.....	41
Figura 32: Zona fraturada (Moura, 2012). .....	
Figura 33: Windsor Probe .....	
Figura 34: Representação esquemática do ensaio de <i>pull-off</i> : (a) Ensaio superficial, (b) Ensaio com corte parcial da superfície (Evangelista, 2002). .....	49
Figura 35: Instrumentação para testes de aderência <i>pull-off</i> .....	49
Figura 36: Curva de base para o ensaio com o esclerómetro (NP EN 13791).....	59
Figura 37: Curva de base para o ensaio da velocidade de propagação dos ultrassons (NP EN 13791). .....	60
Figura 38: Curva de base para o ensaio da força de arranque (NP EN 13791).....	60

---

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Percentagem de resistência em relação ao tipo I (Carminho, 2012). .....	6
Tabela 2: Classes de resistência do cimento (Carminho, 2012). .....	7
Tabela 3: Características das águas para amassadura de betões (Carminho, 2012). .....	10
Tabela 4: Classes de resistência à compressão para betão de massa volúmica normal (Carminho, 2012). .....	13
Tabela 5: Resistência à compressão de cubos e cilindros (Carminho, 2012). .....	22
Tabela 6: Relação da velocidade de impulso com a qualidade do betão. ....	36
Tabela 7: Mínima resistência à compressão <i>in-situ</i> característica para as classes de resistência à compressão da EN 206-1 (NP EN 13791). .....	55
Tabela 8: Margem $k$ associada a pequeno número de resultados de ensaio (NP EN 13791). .....	56
Tabela 9: Princípio para obter a relação entre a resistência à compressão <i>in-situ</i> e os dados do ensaio indireto (NP EN 13791). .....	59
Tabela 10: Coeficiente $k_f$ função do número de pares de resultados (NP EN 13791). .....	61

# 1. INTRODUÇÃO

## a) Enquadramento

O betão é o principal material de engenharia usado em construções como: pontes, edifícios, barragens, muros de suporte, em pavimentos e estradas. É um composto cerâmico formado pela mistura de agregados grossos e finos (britas e areias), rodeados por uma matriz dura obtida a partir da pasta de um cimento (o ligante), constituída normalmente por cimento Portland misturado com água. A capacidade de endurecimento desta matriz, confere á mistura coesão e resistência permitindo-lhe servir como material de construção (Pires, 2011).

A ideia de que as estruturas de betão armado seriam eternas, tem sido refutada ao longo dos tempos, pela constatação de inúmeros casos de envelhecimento e degradação das mesmas.

O conhecimento das causas e anomalias, que comprometem o bom desempenho das estruturas, esboça um quadro de fenómenos diversos por vezes complexos e de atuações simultâneas.

Na origem dos fenómenos de degradação está quase sempre presente o resultado de projetos mal concebidos ou mal executados, onde alguns aspetos importantes são negligenciados, como por exemplo, a qualidade dos materiais empregues, a exposição da obra ao meio ambiente, a utilização dada á obra e a quantificação das ações.

Para que o efeito de um estado de degradação não venha a gerar um prejuízo severo à estrutura, torna-se necessário, numa atitude preventiva, controlar o avanço da degradação e definir tipos e momentos de intervenções. Muitas vezes essas intervenções estão relacionadas com a necessidade de recuperar a estrutura de forma a prolongar a sua vida útil e também, nos dias de hoje, tem-se reabilitado muitas estruturas antigas com a finalidade de possibilitar novos usos e ocupações. Para estes fins, a decisão sobre o tipo de

intervenção a seguir na recuperação estrutural passa por um bom diagnóstico das causas degradantes e por uma posterior análise estrutural.

Para avaliar o estado de degradação da obra, ou simplesmente para verificar se a resistência pretendida pela estrutura corresponde na realidade ao que se pretendia quando fora projetada, têm sido criados ao longo dos anos várias técnicas e ensaios, uns não destrutivos como o exemplo o método da Medição da Maturidade (Maturity Method), o método da Medição da Velocidade de Ultrassons (Ultrasonic pulse Velocity) e o método da Medição da Dureza Superficial (Surface Hardness). Outros parcialmente destrutivos como o exemplo o método da Resistência á Penetração (Windsor Probe), o método de Resistência Através de Carotagem e o método de Ensaio á Tração (Pull-Off Test).

### **b) Objetivos**

O objetivo desta dissertação é avaliar como evolui a resistência mecânica ao longo do tempo e agrupar os diversos ensaios habitualmente usados, para verificar a resistência *in-situ* do betão num único documento, fazendo uma descrição minuciosa, enunciando as diversas aplicações, as suas vantagens, desvantagens e limitações. Analisam-se também duas normas que correlacionam alguns dos ensaios descritos, para que no futuro, seja mais fácil escolher o melhor método a utilizar mediante as condições disponíveis para avaliar a resistência do betão pretendido.

### **c) Organização da dissertação**

Esta dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta um enquadramento, os objetivos principais e a organização deste trabalho.

O segundo capítulo aborda a resistência mecânica do betão e a sua evolução ao longo do tempo, descrevendo como evolui a resistência do betão ao longo do tempo, os parâmetros que a influenciam e como é feita a avaliação de resistência normalizada.

O terceiro capítulo é dedicado aos métodos de avaliação de resistência *in-situ*, descrevendo os métodos detalhadamente, as suas aplicações, parâmetros que influenciam os resultados, as vantagens e limitações de cada método.

O quarto capítulo é destinado às correlações entre os métodos de avaliação, enunciando duas normas existentes para correlacionar os métodos de avaliação e comparando-as entre si.

O quinto e último capítulo é dedicado às conclusões retiradas desta dissertação, referindo algumas propostas para futuros trabalhos dando continuação aos trabalhos efetuados nesta dissertação.

## 2. RESISTÊNCIA MECÂNICA E SUA EVOLUÇÃO AO LONGO DO TEMPO

### a) Como evolui a resistência do betão ao longo do tempo

No início da sua utilização o betão apresentava na sua composição agregados e ligantes de baixas resistências, grandes dimensões, maiores dosagens de cimento e elevadas espessuras de recobrimento. A colocação do betão era mais cuidada, o que conferia uma maior durabilidade às armaduras. A tudo isto acresce o facto de as armaduras utilizadas serem de aço macio e o betão não apresentar, em geral, fendilhação. Todos estes fatores contribuíam para que as armaduras apresentassem uma longa duração, fazendo assim com que o betão fosse visto como um material de duração ilimitada.

Com a evolução da tecnologia, alcançou-se um maior conhecimento das propriedades dos materiais que constituem um elemento de betão armado e uma maior evolução nos métodos de cálculo, proporcionando assim a construção de elementos de betão armado com uma secção resistente inferior, recorrendo a maiores taxas de armadura. No entanto o aumento de armadura dificulta a passagem e acomodação do betão fresco.

A quantificação da evolução das propriedades do betão é um assunto essencial no que se refere às análises mecânicas. É do senso comum a noção de que betonagens a temperaturas da ordem dos 20°C proporcionam tempos de presa inferiores e ganhos de resistência mais rápidos do que acontece em betonagens a temperaturas baixas, da ordem dos 0°C. A partir de raciocínios deste tipo compreende-se facilmente que a variável tempo (idade) não é, por si só, suficiente para caracterizar a evolução das propriedades do betão.

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 (Carminho, 2012).

Pela análise da Figura 1, podemos concluir que a resistência do betão aumenta exponencialmente nos primeiros dias, atingindo cerca de 100% da sua resistência ao 28º dia.

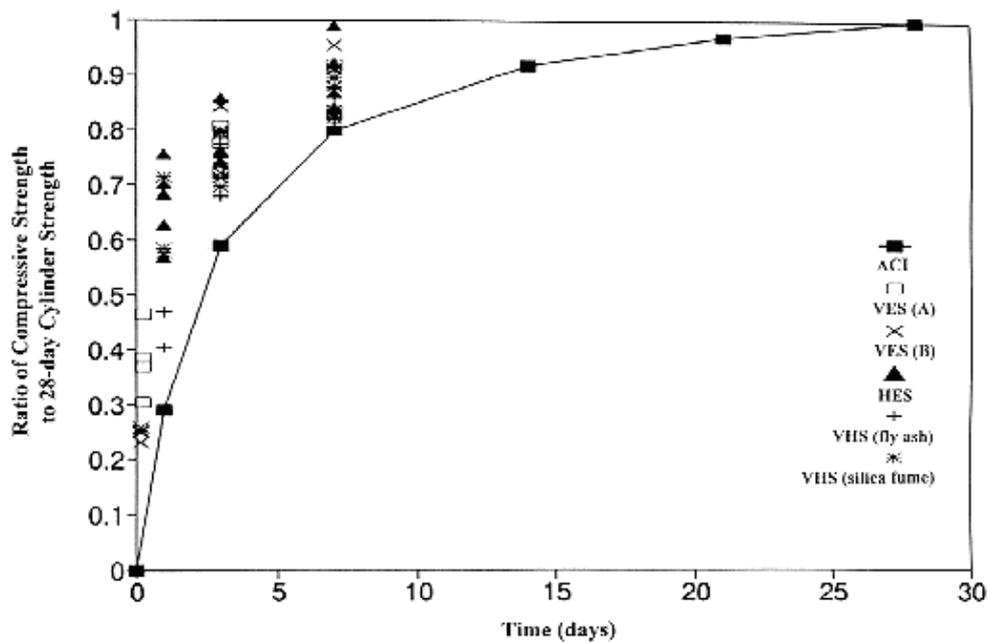


Figura 1: Evolução da resistência à compressão do betão ao longo do tempo (www.fhwa.dot.gov).

Na Tabela 1 pode-se verificar os diferentes tipos de cimentos existentes classificados quanto ao tipo e composição, podendo também observar a percentagem da sua resistência em relação ao tipo I para diferentes idades. Ainda podemos verificar que independentemente do tipo de cimento, a partir dos 90 dias todos apresentam 100% da sua resistência á compressão.

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

Tabela 1: Percentagem de resistência em relação ao tipo I (Carminho, 2012).

### b) Parâmetros que influenciam a evolução de resistência

Os principais fatores que influenciam a resistência do betão são (Pires, 2011):

- Propriedades dos componentes: cimento, agregados, aditivos químicos e adições minerais;
- Proporções dos componentes: relação água/cimento, e relação agregado/cimento;
- Condições de cura e idade.

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 reações a longo prazo, dado a sua reação 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 reações 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 (Carminho, 2012).

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. A Tabela 2 apresenta os diferentes tipos de cimentos existentes classificados quanto à classe de resistência à compressão:

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

Tabela 2: Classes de resistência do cimento (Carminho, 2012).

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.

Na Figura 2, 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.

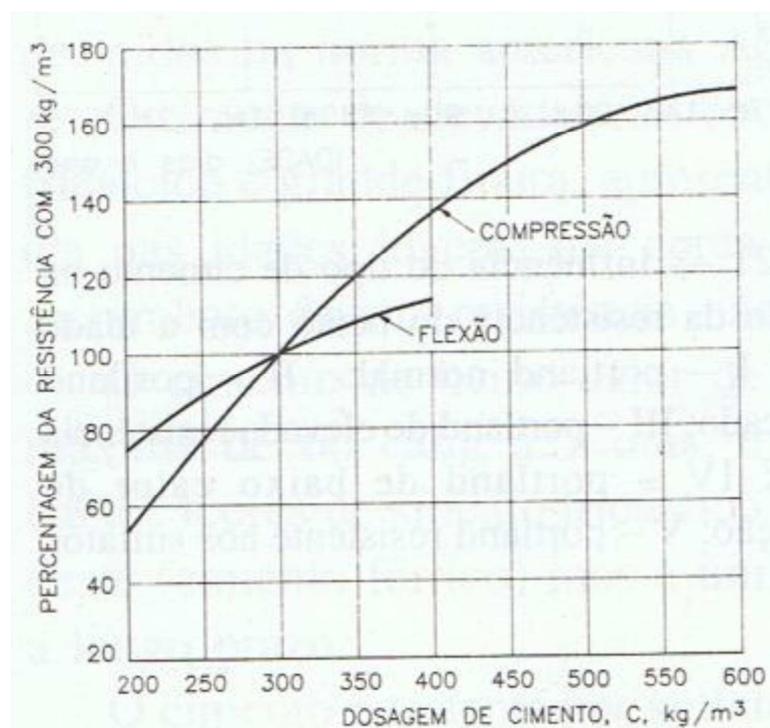


Figura 2: Influência da dosagem de cimento nas tensões de rotura à compressão e flexão (Carminho, 2012).

Como se pode verificar, para dosagens compreendidas entre 200 e 400 Kg/m<sup>3</sup>, as tensões de rotura do betão, por cada 50 Kg/m<sup>3</sup> 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.

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. 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. Quando se pretende obter um betão com tensões de rotura superiores aquelas é necessário utilizar inertes com tensão de rutura superior, pois as tensões desenvolvidas nas zonas de contacto entre as partículas do agregado são consideravelmente maiores do que as tensões médias aplicadas.

A água desempenha dois papéis fundamentais no betão fresco e na fase de endurecimento do betão. No betão fresco, a água confere a trabalhabilidade adequada para permitir uma boa colocação e compactação. Na fase de endurecimento a água participa nas reações de hidratação do cimento que conferem a resistência necessária ao betão. 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 (Carminho, 2012).

Na Tabela 3 estão apresentadas as características a que devem obedecer as águas de amassadura para betões:

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

Tabela 3: Características das águas para amassadura de betões (Carminho, 2012).

É bem conhecida a influência da quantidade de água na tensão de rotura. A grandeza da sua ação 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 Figura 3.

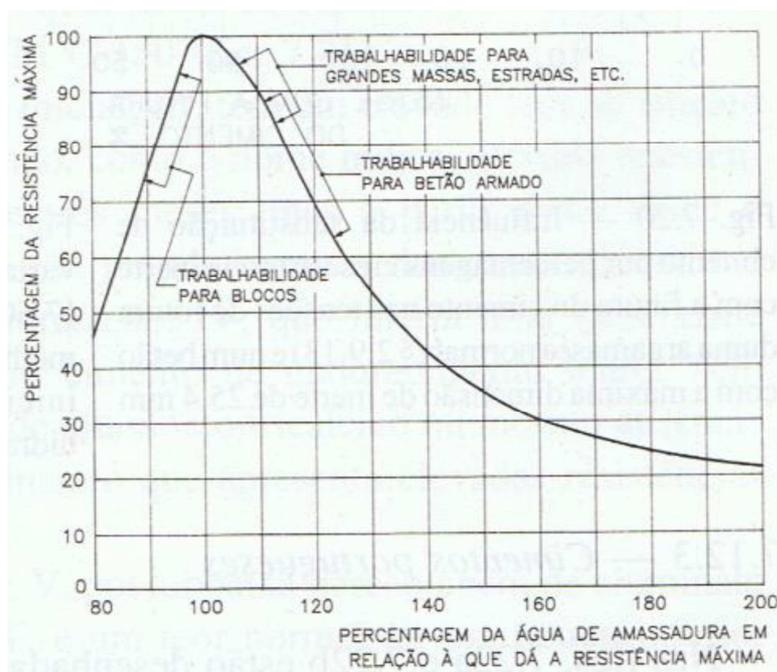


Figura 3: Variação relativa da resistência à compressão de um betão com a quantidade de água de amassadura (Carminho, 2012).

A relação água-cimento ( $A/C$ ) é o parâmetro que mais influencia as propriedades do betão. Esta razão representa a razão entre a dosagem efetiva de água e a dosagem de cimento. A dosagem efetiva de água é a diferença entre a quantidade total de água presente no betão fresco e a quantidade de água absorvida pelos agregados. Quanto maior for o seu valor, mais porosa e permeável é a pasta de cimento, tornando o betão menos resistente e mais sensível à ação dos agentes agressivos que originam a deterioração das estruturas.

Na Figura 4 está ilustrada a influência da razão  $A/C$  na resistência do betão à compressão, com medições efetuadas em cubos com 20cm de aresta ensaiados aos 28 dias e conservados dentro de água:

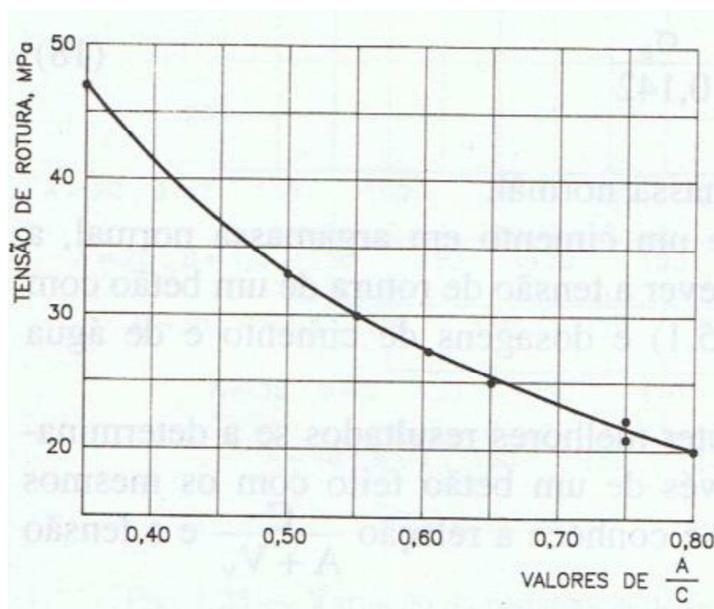


Figura 4: Variação da tensão de rotura do betão com o valor de  $A/C$  (Carminho, 2012).

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.

Na ausência de adjuvantes, o crescimento inicial da resistência do betão é muito influenciado pelo seu valor de  $A/C$ . Assim, como se pode ver na Figura 5, misturas com

uma relação A/C menor, apresentam mais resistência que uma mistura com uma relação A/C superior.

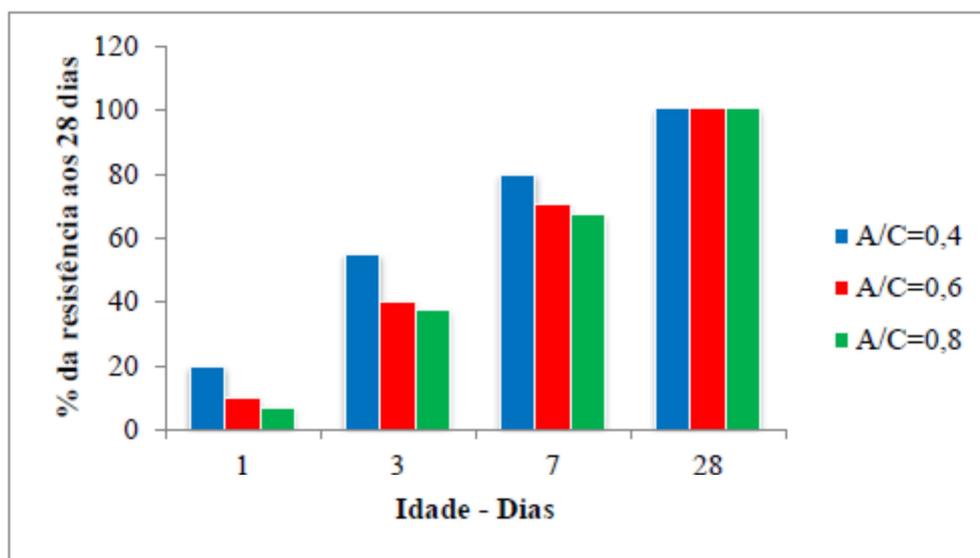


Figura 5: Ganho da resistência em betões com diferentes valores de A/C nos primeiros 28 dias de idade (Carminho, 2012).

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 (Carminho, 2012).

Atualmente é possível fabricar betões com razões água-cimento até valores da ordem de 0,2, atingindo resistências na ordem dos 150MPa.

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. Com as adições consegue-se aumentar a resistência do betão á rotura, podendo também aumentar a trabalhabilidade, a permeabilidade, o calor de hidratação e atenuar ainda a tendência do betão para fendilhar. Para aumentar a resistência junta-se ao betão

adições do tipo II para aumentar as restantes propriedades junta-se adições do tipo I, sendo as adições do tipo I, adições quase inertes, como o filer calcário, não têm propriedades hidráulicas latentes nem propriedades pozolânicas e as 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 (Carminho, 2012).

### c) Avaliação de resistência normalizada (em cubos/cilindros)

Os betões são classificados em diferentes classes de resistência de acordo com a resistência à compressão medida em cubos e em cilindros. De acordo com a Tabela 4 podemos verificar a classe de resistência do betão, em que a classe de resistência do betão, representa o valor característico mínimo de tensão de rotura à compressão, obtido aos 28 dias de idade do betão, a partir, respetivamente 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 NP EN 12390.

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

Tabela 4: Classes de resistência à compressão para betão de massa volúmica normal (Carminho, 2012).

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 NP EN 12390-1 sugere as seguintes dimensões nominais para os cubos e cilindros:

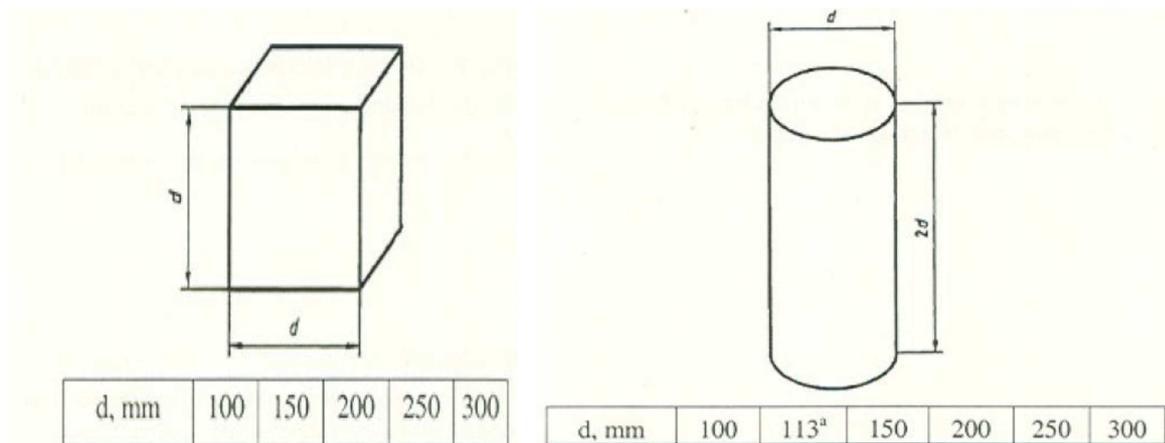


Figura 6: Forma, dimensões e tolerâncias dos provetes (NP EN 12390-1).

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 provete tradicionalmente usado para a determinação da tensão de rotura à compressão (Carminho, 2012).

Estes testes são efetuados 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. 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 refletem 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. Na Figura 7 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 efetuadas *in-situ* em diversos elementos.

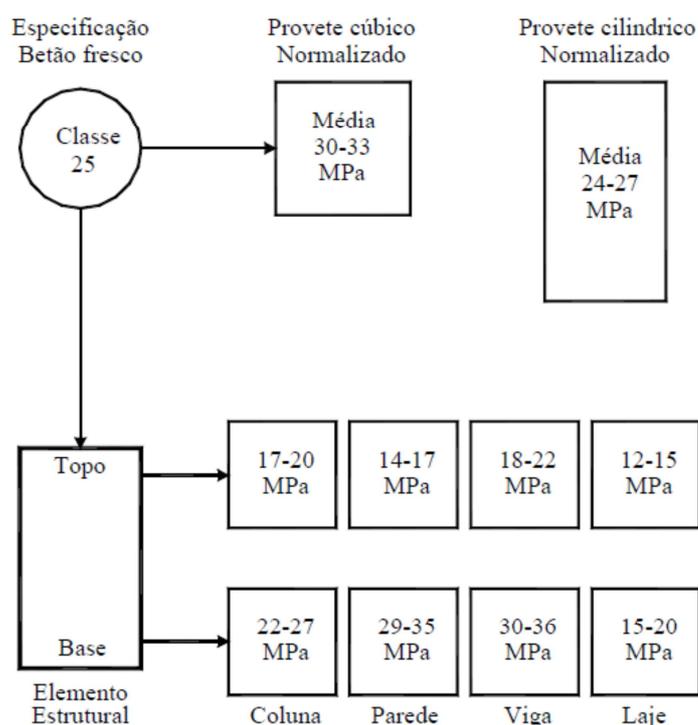


Figura 7: Relação entre a resistência de provetes normalizados e a resistência do betão *in-situ* (Carminho, 2012).

A resistência de um betão é classificada como uma tensão, que por sua vez pode ser de compressão ou de tração. A tensão de rotura à compressão nos provetes é dada pela equação:

$$f_c = \frac{F}{A_c}, \text{ em que:}$$

- $f_c$  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.

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 adotou-se o conceito de resistência característica ( $f_{ck}$ ), que tem em conta o resultado médio das tensões de rotura ( $f_{cm}$ ), obtido 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  $f_c$ , com 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 8 (Carminho, 2012):

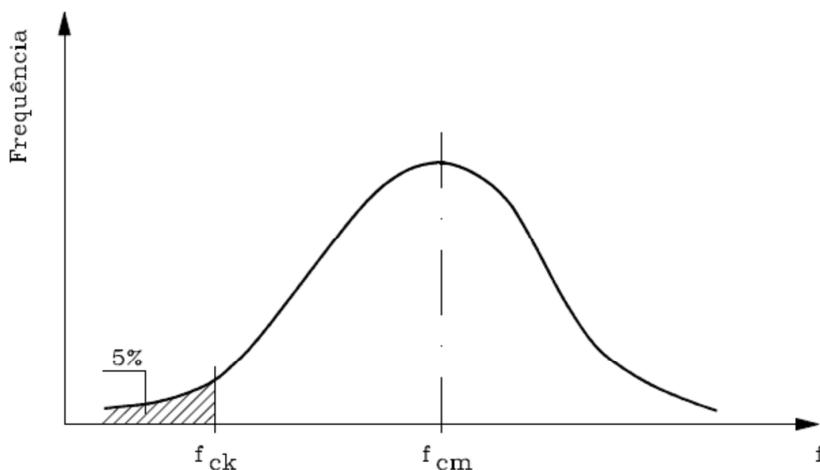


Figura 8: Valor característico da resistência (Carminho, 2012).

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:

$$f_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{ci}}{n}$$

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:

$$f_{ck} = f_{cm} - \lambda \cdot S_n$$

O valor de  $\lambda$  depende do número de amostras, sendo que para um número elevado de amostras adota-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:

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

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 direção 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 unidirecional 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 atua 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 atuam 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. 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  $0,5d$ . (sendo  $d$  a dimensão lateral da amostra). 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 (Figura 9 b; Figura 10 a). Mas se a dimensão do provete for superior a  $1,7d$  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  $1,5d$  têm uma resistência consideravelmente superior aos que apresentam uma altura maior (Carminho, 2012).

Aparentemente quando uma tensão de corte atua 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 tração 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 (Figura 12 A).

A rotura por arranque ou descoesão aparece tanto na tração 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 tração, o que leva ao aparecimento de fissuras de dilatação com uma direção paralela à do esforço. Este modo de rotura ocorre mais nos cubos do que nos cilindros devido à diferença de altura entre ambos.

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 (NP EN 12390-3). Apresentam-se de seguida imagens de roturas satisfatórias e não satisfatórias para cubos e cilindros:

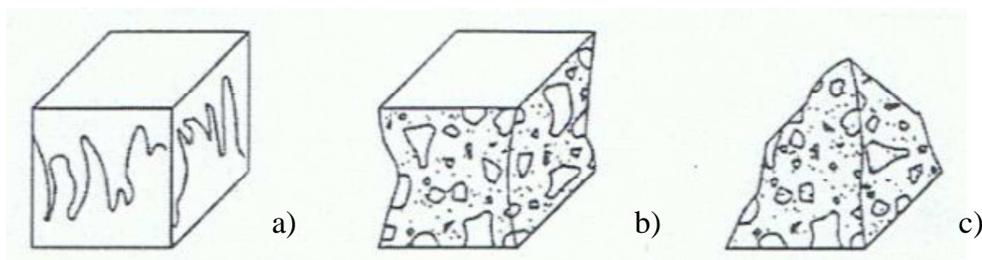


Figura 9: Roturas satisfatórias de provetes cúbicos (NP EN 12390-3).

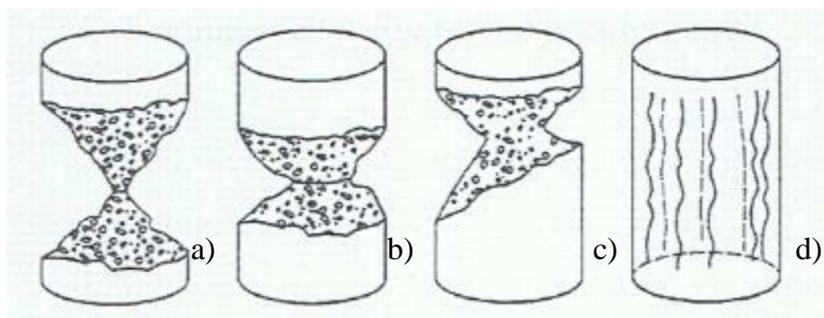


Figura 10: Roturas satisfatórias de provetes cilíndricos (NP EN 12390-3).

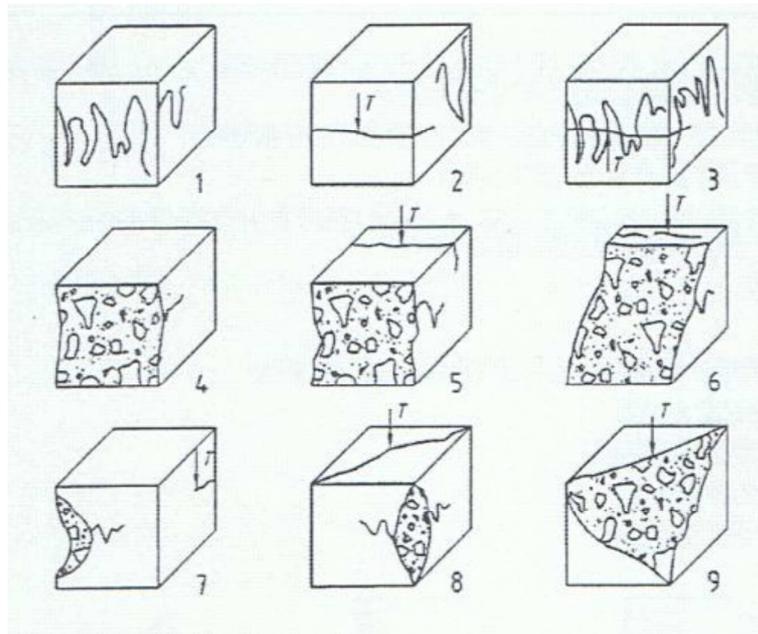


Figura 11: Roturas não satisfatórias de provetes cúbicos (NP EN 12390-3).

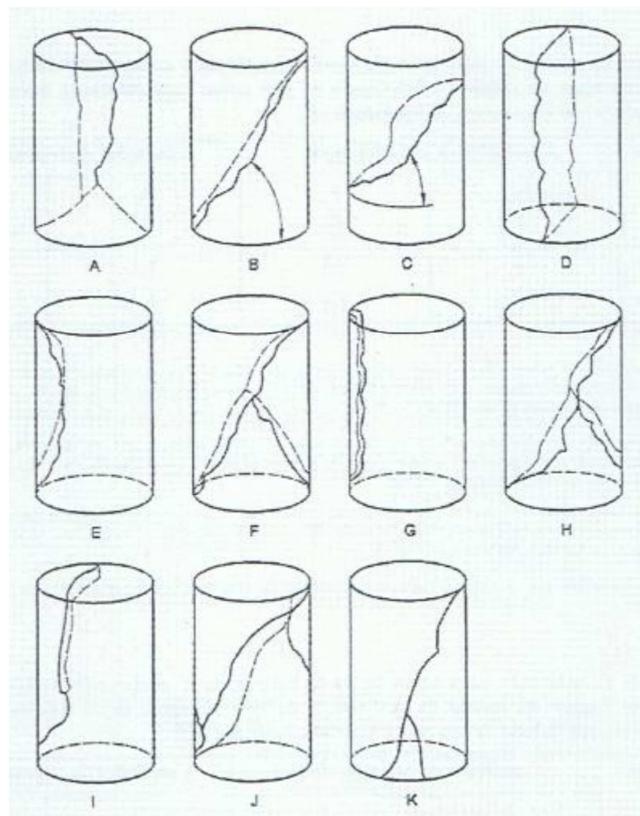


Figura 12: Roturas não satisfatórias de provetes cilíndricos (NP EN 12390-3).

Como se pode observar, a rotura é considerada não satisfatória quando as faces estão fissuradas de maneiras completamente diferentes. As roturas não satisfatórias podem ser causadas por (NP EN 12390-3):

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

A resistência cilíndrica é da ordem dos 80% da resistência cúbica, com provetes formados a partir de betões da mesma família:

$$f_{c,cyl} = 0,8 f_{c,cube}$$

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. No entanto diversos testes efetuados 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 5 (Carminho, 2012).

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

Tabela 5: Resistência à compressão de cubos e cilindros (Carminho, 2012).

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. Isto porque os cilindros fornecem um leque de resultados mais uniformes para amostras semelhantes. A sua resistência é menos afetada 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 (Carminho, 2012).

Na Figura 13 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.

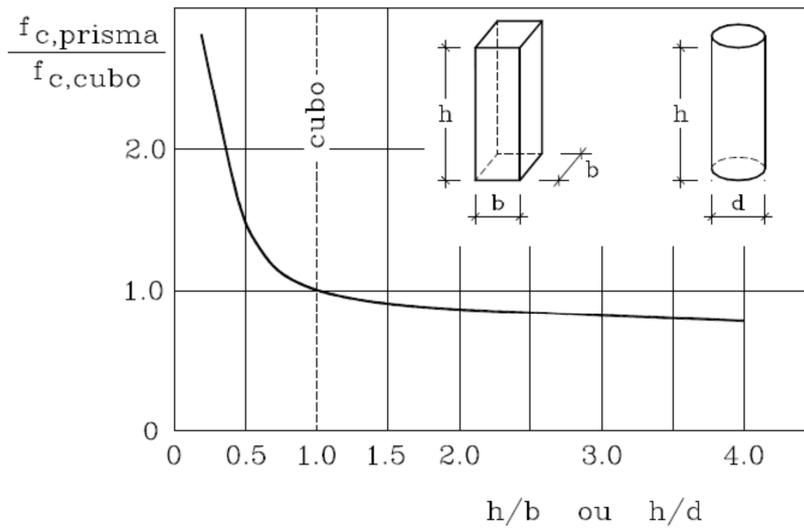


Figura 13: Relação entre a resistência medida em provetes prismáticos e provetes cilíndricos (Carminho, 2012).

Por outro lado, a relação altura/diâmetro do cilindro tem uma contribuição para a sua resistência. Na Figura 14 pode-se ver o efeito desta relação na resistência do cilindro:

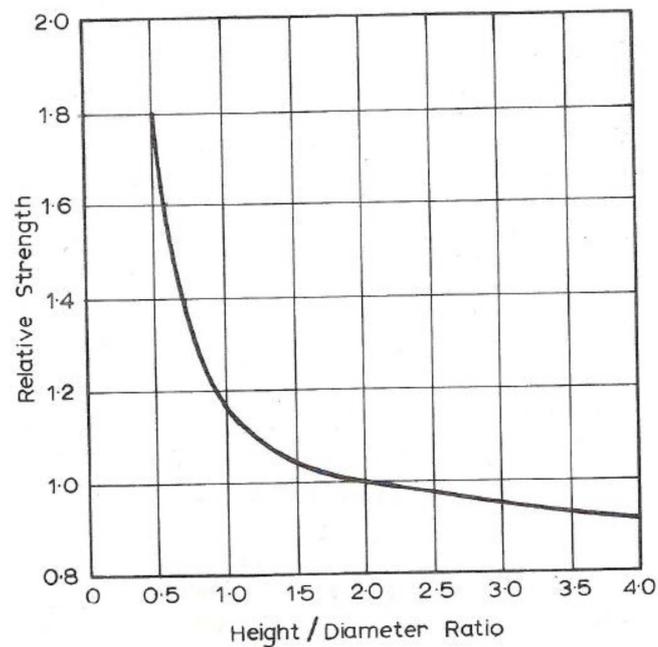


Figura 14: Efeito da relação altura/diâmetro na resistência do cilindro (Carminho, 2012).

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. Por outro lado, quando o rácio  $h/d$  varia entre 1,5 e 4, a resistência é afetada 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 afeta gravemente os valores de resistência medidos (Carminho, 2012).

#### **d) Especificações técnicas sobre avaliação da resistência in-situ**

Para fazer face á problemática que são as correlações entre os métodos de avaliação da resistência à compressão do betão *in-situ*, foram elaboradas duas normas, a norma portuguesa NP EN 13791 e a norma RILEM NDT4 da international union of laboratories and experts in construction materials, systems and structures. Ambas as normas indicam alguns procedimentos e técnicas para correlacionar métodos de avaliação, sendo as duas descritas e comparadas mais á frente neste trabalho no capítulo 4.

### 3. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA IN-SITU

#### a) Método da maturidade:

##### i. Descrição do método

O betão armado quando sujeito a diferentes temperaturas no mesmo intervalo de tempo, apresenta diferentes valores de resistência. As altas temperaturas e as reações de hidratação do cimento podem produzir maior porosidade e menor resistência a compressão.

Normalizado pela ASTM C 1074, o método da maturidade estima a resistência do betão, tendo em conta as condições de temperatura a que a estrutura de betão armado está sujeita. Exige que se conheça previamente o desenvolvimento da resistência ao longo do tempo numa condição isotérmica de cura. (Nicholas J. Carino,2010)

O método da maturidade é denominado usualmente como o produto do tempo pela temperatura. Através da fórmula seguinte, conhecida como função de *Nurse–Saul*, é possível calcular o fator de maturidade:

$$M(t) = \sum_0^t (T_a - T_0)\Delta t$$

Equação 1: Fator de maturidade (Peres, L.D.,et al,2005)

Sendo:

- $M(t)$  - Índice de maturidade, (° C.hora);
- $T_a$  - Temperatura média do betão, num dado intervalo de tempo, (° C);

- $T_0$  - Temperatura de referência, ( $^{\circ}$  C), temperatura abaixo da qual as reações de hidratação do cimento não ocorrem; Valor de referência situa-se nos  $0^{\circ}$ C segundo a norma ASTM C 1074;
- $\Delta t$  - Intervalo de tempo, (hora).

A temperatura de referência é definida como a temperatura abaixo da qual as reações de hidratação do cimento não ocorrem. McIntosh (1949) propôs inicialmente o valor de  $-1,1^{\circ}$ C para essa temperatura. Carino e Lew (2001) propuseram o valor de  $-10^{\circ}$ C.

Rastrup (1954) introduziu o termo idade equivalente –  $t_e$ , admitindo que o betão atinge o mesmo grau de maturidade que atingiria caso fosse mantido a uma temperatura de referência até a idade  $t_e$ . Neste caso, calcula-se o tempo necessário para atingir-se o mesmo grau de maturidade que seria atingido caso a temperatura durante a cura do betão fosse a temperatura de referência.

Segundo Carino e Lew (2001), usualmente utiliza-se o valor de  $20^{\circ}$ C para essa temperatura nos países europeus, no entanto, nos Estados Unidos, a prática aplica-se ao valor de  $23^{\circ}$ C.

Assim, a função de *Nurse-Saul*, em idade equivalente, assume a seguinte forma da:

$$t_e = \sum_0^t \frac{T - T_0}{T_r - T_0} \cdot \Delta t$$

Equação 2

Sendo:

- $t_e$  = Idade equivalente na temperatura de referência  $T_r$  (h);
- $T_r$  = Temperatura de referência ( $^{\circ}$ C);
- $\Delta t$  = Intervalo de tempo (h);

- $T$  = Temperatura média no intervalo de tempo  $\Delta t$  (°C);
- $T_0$  = Temperatura de base (°C).

Freiesleben-Hansen e Pedersen, baseados no modelo de Arrhenius para cinética das reações, definiram uma função de maturidade, em termos de idade equivalente, a partir da relação entre as velocidades de hidratação do cimento na temperatura desejada e na temperatura de referência –  $T_r$ , com a inclusão de um parâmetro relacionado à sensibilidade térmica da mistura, denominado, energia de ativação ( $Ea$ ), segundo a equação 3, sendo necessário o conhecimento prévio da energia de ativação das reações de hidratação do cimento.

$$t_e = \sum e^{-\left[\frac{Ea}{R}\left(\frac{1}{T_a}\right) - \left(\frac{1}{T_r}\right)\right]} \Delta t$$

Equação 3

Sendo:

- $t_e$  = Idade equivalente à temperatura de referência  $T_r$  (h);
- $Ea$  = Energia aparente de ativação (J/mol);
- $T_a$  = Média da temperatura em um intervalo de tempo  $\Delta t$  (K);
- $T_r$  = Temperatura de referência (K);
- $\Delta t$  = Intervalo de tempo (h);
- $R$  = Constante universal dos gases (8,314 J/K mol).

A função de FHP, embora seja de maior complexidade, é a que representa melhor o real efeito da temperatura na velocidade das reações de hidratação do cimento. Entretanto, para

sua utilização, é necessário o conhecimento de um fator relacionado á sensibilidade térmica da reação, denominado energia de ativação. (Peres, L.D.,2005)

A norma ASTM C 1074 (2004) preconiza o seguinte procedimento para a determinação da resistência *in-situ* do betão, mantendo os seguintes passos:

- Logo após a betonagem, colocar os cabos termopar no interior do provete de betão, e sempre que possível junto do centro do provete;
- Colocados os cabos termopar é necessário conectá-los ao aparelho de registo (*datalogger*). No cálculo do índice de maturidade, e para a mesma amassadura, utilizar sempre os mesmos valores dos parâmetros de *datum temperature* e da energia de ativação;
- Com base no índice de maturidade, estimar o valor da resistência do betão durante o seu período de cura;
- Através da relação maturidade – resistência determinada no passo anterior, estimar o desenvolvimento da resistência à compressão do betão ao longo da sua idade de cura;
- Sempre que possível, após o processo de cálculo do índice de maturidade, comparar os valores de resistência a partir de outro método, de forma a validar os resultados obtidos. (Marques, 2012)

Na figura seguinte sintetizam-se as várias etapas previstas pelo método da maturidade de acordo com a (ASTM C 1074, 2004):

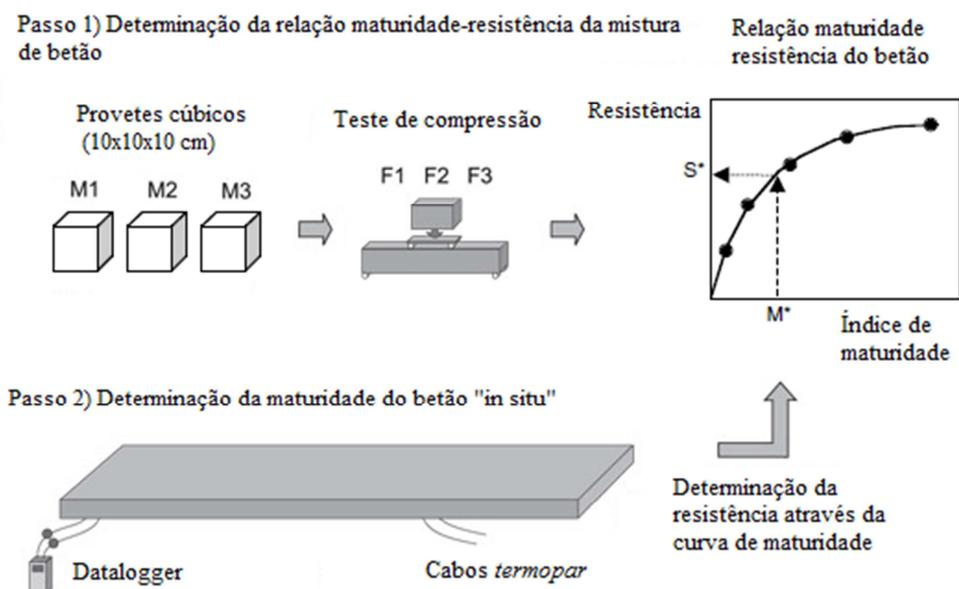


Figura 15: Aplicação do Método da Maturidade, adaptado (Carino, 2001).



Figura 17: Datalogger



Figura 16: Termopares

**ii. Aplicações**

O Método da Maturidade é uma ferramenta que permite obter a resistência do betão dependendo da temperatura a que este está exposto.

Sabemos assim as condições de cura do betão sabendo a altura certa para por exemplo descobrir as estruturas, ou quando o betão atinge a capacidade resistente para as cargas desejadas.

### iii. Vantagens e limitações

A principal limitação é que os locais de medição da temperatura são pontuais, isto é, para avaliar uma grande superfície é necessário obter resultados de um grande número de pontos que têm de ser todos analisados em simultâneo (Padrão, 2004).

O método da maturidade é muito útil para se prever a resistência do betão ao longo do tempo quando sujeito a uma temperatura conhecida e controlada. Sabe-se que com o aumento da temperatura consegue-se, num intervalo de tempo menor, semelhantes capacidades resistentes dos elementos de betão armado.

A maior desvantagem é que este método embora seja não destrutivo só é válido para processos de pré-moldagem, dando mais importância às variações térmicas e às suas influências no desenvolvimento da resistência do betão armado. Método utilizado apenas para medições pontuais, devido ao tempo de execução e custo.

Outra desvantagem deste método é a necessidade de ter sempre presente o conhecimento que estruturas de betão armado, compostas por cimentos diferentes, apresentam comportamentos diferentes quando sujeitos as mesmas condições de temperatura e tempo (Moura,2012).

## b) Avaliação de resistência através de Carotagem:

### i. Descrição do método

A avaliação da resistência do betão através de Carotagem, consiste em retirar uma amostra de betão da estrutura, e analisar a sua resistência em laboratório, este é um método destrutivo logo não pode ser usado exaustivamente.

Este método é normalizado pela Norma NP EN 12504-1 e processa-se do seguinte modo:

Com o auxílio de um detetor de armaduras, por exemplo do tipo *CoverMeter* (Figura 19: CoverMeterFigura 19), deve-se identificar onde estas estão, de modo a evitar danificá-las com a extração dos carotes;

Sabendo onde estão as armaduras deve-se elaborar um plano de prospeção (Figura 18). De modo a extrair carotes em zonas em que seja possível ter uma precisão aceitável da resistência do betão da estrutura, sem a comprometer e não esquecendo que esses locais de extração devem ser reparados posteriormente;

Decidir o diâmetro e o comprimento da carote que se pretende, tendo em conta a posição das armaduras;

Posicionar a caroteadora, (Figura 21), no local de extração das carotes tendo atenção que esta, deve ficar na perpendicular, de modo a que as carotes sejam extraídas perpendicularmente á superfície para não serem danificadas;

Identificar as carotes extraídas, (Figura 20):

- Identificação da obra;
- Nome do operador;
- Data;
- Localização e identificação dos pontos de extração das carotes, recorrendo a um desenho esquemático;
- Observações sobre o aspecto da superfície do betão.

Cortar as carotes e retificá-las em laboratório de modo a que as superfícies dos topos fiquem planas e perpendiculares ao seu eixo, (Figura 23), de forma que os provetes fiquem com a altura igual ao diâmetro;

Colocar as carotes em estufa de modo a eliminar a humidade presente nas mesmas, ou, se a estrutura estiver regularmente na presença de água deve-se fazer um ensaio saturado em que as carotes devem ser colocadas em água a 20°C pelo menos 40 horas antes do ensaio, para que o ensaio seja o mais realista possível (Almeida, 2005);

Ensaiar as carotes com ensaios de rotura à compressão simples, (Figura 22), sendo estes ensaios realizados em laboratório, de acordo com a Norma E 226 do LNEC;

A conversão dos valores das tensões de rotura é feita segundo a publicação da *Concrete Society*, tendo em vista a obtenção da resistência real em obra do betão, e da resistência de referência do betão. Esta publicação considera vários fatores que têm em conta:

- A direção da Carotagem;
- A relação altura/diâmetro do provete;
- A presença de armaduras;
- A relação entre a resistência ínsito e em cubos;

Para normalizar os valores da tensão de rotura das carotes com diferentes dimensões, para o provete cilíndrico-padrão, com  $\varnothing=h$ , é necessário efetuar a seguinte correção (Moura, 2012):

$$F_{cil} = \frac{2,5}{1,5 + \frac{\varnothing}{h}} \times F_{car}, \text{ Para carotes extraídas horizontalmente.}$$

A resistência média do betão referida a cubos pode ser estimada por:

$$f_{cm} = f_{cm,ci} \times \left(1 \pm \frac{12\%}{\sqrt{n}}\right), \text{ Em que:}$$

- $f_{cm}$  - tensão média;

- $f_{cm,ci}$  - tensão média dos provetes cilíndricos;
- $n$  - número de provetes;

Tendo em conta que o valor da tensão de rotura dum provete cilíndrico com  $\varnothing=h$  é idêntico ao da tensão de rotura obtido sobre um provete cúbico, a resistência média de referência em moldes estandardizados do betão pode ser estimada por:

$$f_{cm(standart)} = f_{cm} \times 1.25$$

Admitindo-se que a distribuição dos valores segue a lei normal, o valor característico pode ser obtido através de:

$$f_{ck} = f_{cm} \times (1 - 1,64 \times \delta)$$

$\delta$  denomina-se coeficiente de variação e resulta da razão entre os valores do desvio-padrão e da média dos resultados obtidos nos ensaios.



Figura 19: CoverMeter



Figura 18: Plano de prospeção das armaduras



Figura 21: Caroteadora



Figura 20: Carotes de Betão



Figura 23: Mesa de corte de carotes



Figura 22: Ensaio de Compressão

## ii. Aplicações

Este método permite avaliar a resistência *in-situ* de estruturas de betão existentes. Sendo combinado com outros métodos permite confirmar resultados, visto que é o único método que mede diretamente o valor da resistência.

Este método pode ser usado também como verificação de estruturas novas para confirmar se a resistência do betão aplicado é realmente a pretendida.

## iii. Identificação dos parâmetros que influenciam os resultados

Os parâmetros que influenciam os resultados são: o teor de humidade, (por esse motivo os provetes devem ser secos em estufa, ou saturados antes de ensaiados), as fissuras, (deve-se ter sempre o cuidado de não extrair uma carote numa zona fissurada) e a presença de armadura no provete, (por este motivo é que as armaduras são de evitar).

**iv. Vantagens e limitações.**

Este método tem a vantagem de nos fornecer diretamente a grandeza pretendida que é a resistência do betão, mas tem como inconveniente ser um método parcialmente destrutivo em que as estruturas tem de ser reparadas depois da extração dos carotes com argamassa não retráctil, este método é algo moroso e dispendioso devendo ser sempre combinado com outros menos destrutivos, dispendiosos e morosos.

**c) Avaliação de resistência através de ultrassons:****i. Descrição do método**

O método consiste em medir a velocidade de propagação de ondas sónicas, entre dois pontos, com frequências acima do limite da audição humana, ondas acima de 20kHz através de elementos sólidos.

Atualmente normalizado pela ASTM C597-02 e ACI 228.1R-03.

Um pulsar de vibrações longitudinais é produzido por um transdutor electro acústico colocado em contacto com a superfície do betão. Após atravessar um comprimento conhecido ( $L$ ), as vibrações são convertidas num sinal eléctrico pelo transdutor recetor. O circuito eletrónico de medição do tempo regista então o tempo de trânsito ( $T$ ) da onda. A velocidade de propagação ( $V$ ) é dada pela equação:

$$V = \frac{L}{T}$$

A velocidade de propagação de ondas num meio sólido está relacionada com o Módulo de Elasticidade, o Coeficiente de Poisson e a densidade.

A relação exata entre a velocidade e módulo de elasticidade para ondas diretas de compressão ( $V_p$ ) é dada pela equação seguinte:

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}}$$

A relação aproximada entre a velocidade e módulo de elasticidade para ondas de superfície ( $V_r$ ) com modo de propagação do tipo ondas de Rayleigh, é dada pela equação seguinte:

$$V_r = \frac{0.87 + 1.12\nu}{(1 + \nu)} \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1 - \nu)}{2(1 + \nu)}}$$

Através da realização de diversos testes na mesma estrutura consegue-se detetar locais onde a qualidade do betão é superior. Para uma correta interpretação de dados é necessário conhecer-se alguma história da estrutura de betão armado.

Whitehurst, em 1951, publicou o resumo de uma experiência realizada em 1947, pela Associação de aplicações em Cimento Portland, onde descrevia uma tentativa de classificação que relaciona-se a velocidade do impulso sónico com a qualidade do betão (Tabela 6), (V. M. Malhotra, 2004).

Velocidade (m/s)	Qualidade do Betão
Acima de 4500	Excelente
3500 - 4500	Bom
3000 - 3500	Regular
2000 - 3000	Medíocre
Abaixo 2000	Mau

Tabela 6: Relação da velocidade de impulso com a qualidade do betão.

Whitehurst alertou para as limitações na utilização desta tabela:

- Deve ser utilizada apenas por técnicos com alguma experiência;

- É importante comparar a velocidade em diversas partes da estrutura que se considere de qualidade aceitável.

Para realizar os ensaios são necessários dois transdutores, (um emissor (1) e outro recetor (2)) e uma unidade central (Figura 27), onde se encontra o gerador de impulsos elétricos e o circuito de leitura. Os transdutores devem ser colocados como mostram as figuras (Figura 24, Figura 25 e Figura 26), dependendo do tipo de parâmetro que se pretende avaliar.

Os ensaios devem ser efetuados em superfícies lisas, sendo conveniente usar uma massa de contacto entre os transdutores e a superfície, de modo a melhorar a transmissão acústica.

Existem três métodos para a realização destes ensaios: direto, semidirecto e indirecto.

Para a avaliação das características de resistência mecânica e homogeneidade utilizamos os métodos diretos (Figura 24) e semidirectos (Figura 25). O método indirecto (Figura 26) para a determinação da profundidade de fissuras. Na impossibilidade de colocação dos transdutores aplica-se o método semidirecto.

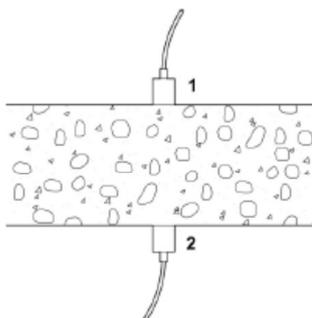


Figura 24: Transmissão direta

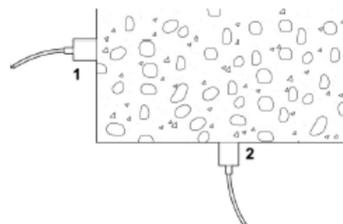


Figura 25: Transmissão semidirecta



Figura 26: Transmissão indirecta ou superficial



Figura 27: Ensaio de ultrassons

## ii. Aplicações

Este método é usado para determinar as características mecânicas, a homogeneidade e a presença de fissuras e defeitos nas estruturas de betão armado.

## iii. Identificação dos parâmetros que influenciam os resultados

Para além da resistência do betão, vários outros fatores podem influenciar a velocidade do impulso sónico, como por exemplo (V. M. Malhotra, 2004):

- O teor de humidade, aumentando proporcionalmente a velocidade;
- Presença de armaduras, o impulso pode transmitir-se mas a velocidade aumenta;
- Fissuras ou vazios, aumentam o tempo de percurso do impulso e reduz a amplitude da onda.

## iv. Vantagens e limitações

Este ensaio é bastante fácil de executar desde que se tenha acesso a diferentes faces da estrutura, e se possa efetuar devidamente a ligação do aparelho.

É possível colocar-se o emissor e o recetor na mesma face mas os resultados não são muito fiáveis, nem fáceis de interpretar.

Devido á sua simplicidade é um ensaio que com algumas correlações fornece bons resultados, ficando pouco dispendioso a sua utilização.

#### **d) Avaliação de resistência através de determinação de dureza superficial:**

##### **i. Descrição do método**

O método da esclerometria também chamado de *rebound hammer method* ou de *Esclerómetro de Schmidt*, sendo este último nome dado pelo Engenheiro suíço Ernest Schmidt, que em 1948 desenvolveu o primeiro modelo de martelos de Schmidt, no entanto com a evolução da tecnologia vários modelos foram produzidos.

Encontra-se normalizado pela ACI 228.1R-03 e ASTM C805-02.

O método e os procedimentos para a determinação do índice esclerométrico em estruturas de betão são descritos na NP EN 12504-2 (2003) (Sampaio, 2010).

O ensaio consiste em comprimir a barra de percussão contra a superfície do betão, uma massa (martelo) com uma mola que adquire uma quantidade de energia devido à extensão da mola até uma determinada posição (Figura 29).

Dependendo do estado da superfície, pode ser necessário preparar a superfície com uma pedra abrasiva tornando-a mais lisa (Evangelista, 2002).

Quando a mola se solta, a massa faz ricochete ao embater contra a barra de percussão, ainda em contato com o betão (Figura 29). A distância percorrida pela massa no retorno, em percentagem da deformação inicial da mola, é denominada índice esclerométrico (IE) (Neville, 1997).

$$IE = \left( \frac{\delta_r - \delta_0}{\delta_i - \delta_0} \right) = \frac{\Delta r}{\Delta i}, \text{ Sendo:}$$

$\delta_0$  - Distância da massa do esclerómetro, não ativada, à superfície a ensaiar, ou seja, alongamento inicial de referência do êmbolo do Esclerómetro.

$\delta_i$  - Distância da massa do esclerómetro, pronto a disparar, à superfície a ensaiar;

$\delta_r$  - Distância da massa do esclerómetro, devido à mola se encontrar tencionada devido ao ressalto provocado pelo betão;

$\Delta i = (\delta_i - \delta_0)$  - Deslocamento antes do impacto;

$\Delta r = (\delta_r - \delta_0)$  - Deslocamento após o ressalto;

A relação  $\left(\frac{\Delta r}{\Delta i}\right)$ , geralmente é expressa com percentagem (%), sendo adotada como a variável independente para fazer a correlação com a resistência do betão.

Após se efetuar a leitura no aparelho, recorremos a um ábaco (Figura 28), normalmente colada na parte lateral do aparelho e fornecida pelo fabricante, para se estimar a resistência à compressão do material ensaiado.

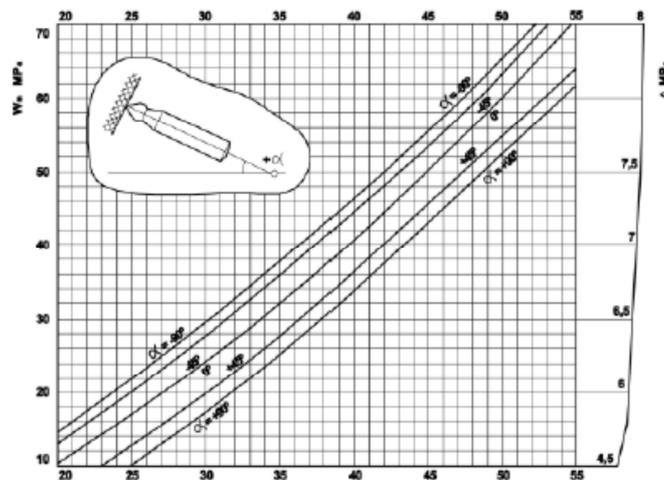


Figura 28: Ábaco de correlação do martelo de Schmidt (Moura, 2012)

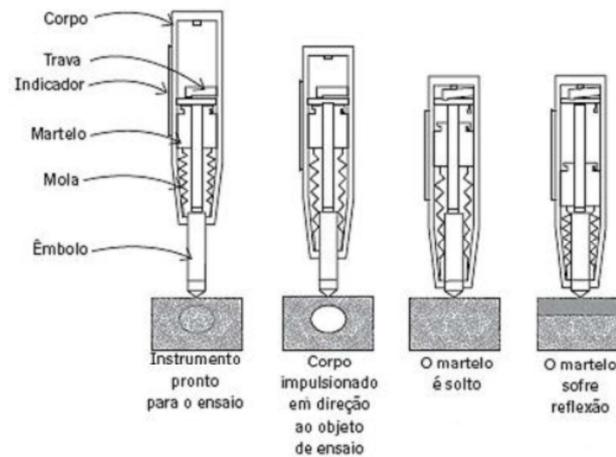


Figura 29: Ilustração da sequência de execução do ensaio de Esclerometria (Moura, 2012)

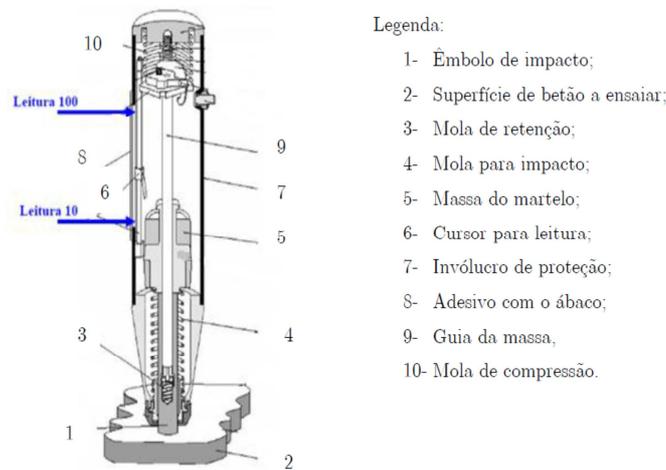


Figura 30: Esclerómetro de Schmidt – secção longitudinal (Moura, 2012)



Figura 31: Esclerómetro de Schmidt

Outros modelos existentes no mercado diferem na rigidez da mola e na massa do martelo, permitindo assim testar várias energias de impacto em diversos materiais.

## **ii. Aplicações**

O principal objetivo deste ensaio é a medição da resistência à compressão do betão, avaliando as suas propriedades mecânicas, através da medição da dureza superficial. É também frequentemente utilizado para avaliar a homogeneidade do betão.

## **iii. Identificação dos parâmetros que influenciam os resultados**

Este ensaio apenas mede o ressalto numa certa massa superficial do betão, os resultados refletem somente a qualidade da superfície e não da profundidade da secção que está a ser testada. Os resultados são assim afetados pela irregularidade da superfície de teste o tipo de agregado e ainda pela idade do betão testado, a sua humidade, o tipo de cimento, a carbonatação bem como um eventual movimento da peça durante o ensaio.

Este ensaio apenas indica as propriedades da camada superficial do betão com cerca de 20 ou 30mm de profundidade (Câmara, 2006).

A rugosidade da superfície tem um efeito preponderante na precisão dos resultados. Se o teste for realizado numa superfície rugosa, a ponta do percutor poderá causar esmagamento excessivo da mesma, o que resultará na redução do índice esclerométrico medido. Para obter resultados mais precisos, deverá retificar-se a superfície a testar, tornando-a mais lisa.

A dureza superficial do betão aumenta rapidamente nos primeiros 7 dias, a partir dos quais se verifica um crescimento menor. Contudo, como é conhecido, para o betão curado adequadamente, há um aumento significativo da resistência depois dos 7 dias, devido às reações de hidratação do cimento. Deve ter-se especial precaução no caso de se testarem betões com menos de três dias de idade ou com resistência à compressão menor do que 7 MPa, visto que o valor do índice esclerométrico vem demasiado baixo e o erro introduzido

é elevado. Nesta situação, o martelo esclerométrico poderá deixar marcas visíveis na superfície do betão aquando do impacto.

Segundo Bungey (1989), este método não deve ser aplicado em betões com resistência à compressão inferiores a 10MPa.

O teor de humidade do betão tem um profundo efeito nos resultados do teste esclerométrico. Provetes testados em condições saturadas mas com superfície seca, geralmente mostram índices esclerométricos mais baixos do que os dos provetes secos ao ar (Crawford, 1997).

O tipo de cimento tem também um efeito significativo no índice esclerométrico, já que, para betões de agregados correntes, a resistência do cimento é um fator determinante na resistência do betão com ele produzido.

O índice esclerométrico é significativamente afetado pela carbonatação superficial do betão. Os valores para um betão carbonatado podem ser 50% superiores aos obtidos num betão não carbonatado. Os efeitos da carbonatação são, em geral, mais severos para os betões mais antigos, onde a espessura carbonatada pode ter vários milímetros de espessura, em casos extremos pode atingir valores superiores a 20mm (Sampaio, 2010).

É genericamente aceite que o índice esclerométrico é afetado pelo tipo de agregado. Para resistências de compressão iguais, o betão produzido com agregado granítico apresenta índices esclerométricos sensivelmente mais altos do que betões com agregado calcário.

Quando se testam zonas onde o agregado grosso se encontra junto à superfície ensaiada, obtêm-se leituras anormalmente elevadas, já que o agregado é muito mais rígido do que a pasta de cimento.

Estes resultados devem ser ignorados no cálculo da média das leituras realizadas.

No caso dos elementos a ensaiar não pertencerem a uma estrutura fixa, como por exemplo pequenos provetes, estes devem ser rigidamente fixos. Qualquer movimento causado pelo impacto do esclerómetro resulta na diminuição do índice esclerométrico.

A correlação entre a resistência à compressão e o índice esclerométrico é por vezes contestada. Os coeficientes de variação podem estar entre 15 e 30% num vasto número de amostras. Estes desvios consideráveis podem ser reduzidos, desenvolvendo uma relação apropriada para o esclerómetro que tenha em conta as variáveis descritas anteriormente para o betão testado, em vez de recorrer às correlações fornecidas pelo fabricante do esclerómetro (Crawford, 1997).

#### **iv. Vantagens e limitações**

A facilidade de manuseio, o baixo custo do equipamento, a rapidez com que os dados são obtidos e danos praticamente nulos à superfície ensaiada, podem ser citadas como algumas das vantagens desse ensaio. Pequenas marcas na superfície ensaiada podem ocorrer em betões de baixas idades ou baixas resistências.

Este método ajuda na avaliação da uniformidade superficial do betão, no monitoramento da resistência do elemento ao longo do tempo, além de estimar a resistência. Tem a limitação ocasionada pela carbonatação do betão que, com o passar do tempo atinge uma certa camada superficial da peça, influenciando nos índices esclerométricos (Câmara, 2006).

O esclerómetro deve ser usado preferencialmente ortogonalmente na área de ensaio. Quando o ensaio não for executado na posição horizontal, o índice esclerométrico deve ser corrigido, pois, os resultados são afetados pela influência da gravidade sobre a força da mola do esclerómetro. O impacto do esclerómetro não deve provocar vibração na peça. Peças pequenas devem ser apoiadas ou fixadas (Evangelista, 2002).

## e) Avaliação de resistência através de resistência à penetração:

### i. Descrição do método

O método da medição da resistência à penetração, conhecido também como *Windsor Probe*, foi desenvolvido nos Estados Unidos em 1964.

O método consiste no disparo de pinos com uma pistola (Figura 33), que penetram no betão. O equipamento deve estar na perpendicular com a superfície ensaiada e deve-se evitar as armaduras para obter resultados credíveis.

Consoante o betão a ensaiar, as sondas serão diferentes. As de prata utilizam-se para betões normais, e tem 6,35mm de diâmetro e 79,5mm de comprimento, para betões leves, a sonda passa a ser dourada o diâmetro é de 7,94mm e com 79,5mm de comprimento (Moura, 2012).

Yun te al (1988) sugerem três tipos de carga para ensaio de penetração:

- Carga baixa para concreto com resistência de 21 MPa,
- Carga padrão para concreto com resistência de 35 MPa,
- Carga padrão e baixa para concreto com resistência de 28 MPa.

Segundo o comité ACI 228 (1989), a essência do método envolve a energia cinética inicial do pino e a absorção de energia pelo betão. O pino penetra no betão até que sua energia cinética inicial seja totalmente absorvida pelo betão. Parte da energia é absorvida pelo atrito entre o pino e o betão, e outra parte na fratura do betão (Evangelista, 2002).

A profundidade da penetração dos pinos é usada para estimar a resistência do betão, usando-se curvas de calibração normalizadas que acompanham o equipamento. O equipamento disponível internacionalmente denomina-se *Windsor Probe*.

De acordo com a BS 1881 : Part 201 (1986), este método pode ser utilizado em betão com agregado de dimensão máxima de até 50 mm, com a superfície lisa ou áspera. Com ele pode avaliar-se o betão entre 25 mm a 75 mm abaixo da superfície (Padrão, 2004).

O método é influenciado principalmente pelo tipo de agregado, não sendo sensível a fatores como o teor de humidade, o tipo de cimento e a cura (Evangelista, 2002).



Figura 33: Windsor Probe

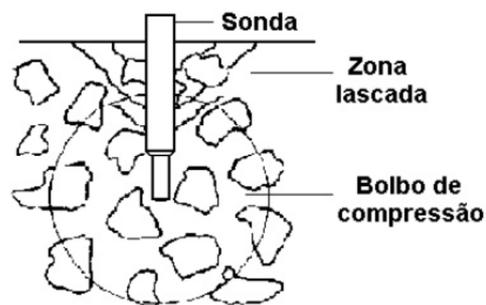


Figura 32: Zona fraturada (Moura, 2012).

	Normas	
	BS1881:Part207:1992	ASTM C803/1990
Área de ensaio	-	Diâmetro de 38 mm para cada pino
Distância mínima entre pinos	200 mm	175 mm
Distância mínima entre pinos e as arestas da peça	150 mm	100 mm
Resultado	Média de 3 penetrações	Média de 3 penetrações
Precisão	5 mm para 3 medições	8,4mm para 3 medições para concreto com agregado de $D_{máx}=25$ mm e 11,7mm para 3 medições para concreto com agregado de $D_{máx}=50$ mm

Quadro 1: Comparação entre procedimentos de normas para ensaio de resistência à penetração de pinos (Evangelista, 2002).

## ii. Aplicações

Este método é usado para estimar a resistência à compressão e a uniformidade do betão.

Como o ensaio pode ser feito com disparos através da madeira, pode-se estimar a resistência *in-situ* do betão antes de remover as cofragens.

### iii. Identificação dos parâmetros que influenciam os resultados

Devido à penetração do pino no betão, os resultados deste ensaio não são influenciados pela textura nem pela humidade da superfície, porém se o betão for afagado com a colher de pedreiro propicia uma camada superficial mais dura, e isto pode resultar em valores menores de penetração, e também maior dispersão dos resultados (Evangelista, 2002).

O posicionamento da pistola (que deve estar na perpendicular em relação a superfície), e a localização das armaduras podem influenciar os resultados, (Padrão, 2004).

O tipo de inerte influencia diretamente o comprimento de penetração, quanto mais rígido for o inerte maior é o comprimento exposto da sonda, (Padrão, 2004).

### iv. Vantagens e limitações

Al-Manaseer e Aquino (1999), concluíram que este método de ensaio não pode ser realizado para concreto com resistência à compressão acima de 130 MPa, pois os pinos não penetram no betão.

O equipamento usado neste método é simples, durável, e também pouco sensível à experiência do operador. O método é útil no monitoramento da resistência do betão, causando danos reduzidos na peça estrutural, (Evangelista, 2002).

Para a realização do ensaio é necessário o acesso apenas a uma face da estrutura. É necessário evitar as barras de aço, e tomar os cuidados inerentes à utilização de uma arma de fogo. Após as medições, devem ser retirados os pinos, deixando um dano na superfície em torno de 75mm de diâmetro (Evangelista, 2002).

## **f) Avaliação de resistência à tração:**

### **i. Descrição do método**

Para avaliar a resistência à tração do betão *in-situ*, surgiu nos anos 70, na Inglaterra, o ensaio *pull-off*, desenvolvido devido a alguns problemas relacionados com betões produzidos com cimentos de alto teor de alumina (Pereira, E. e Medeiros, M. H. F., 2012).

O valor aproximado da resistência á compressão do betão, neste ensaio, é dado em função da força de tração necessária para provocar a rutura do betão, sendo esta resistência determinada com a utilização de curvas de correlação (Padrão, 2004).

Como se pode verificar na Figura 34, um disco circular metálico é inicialmente colado no betão, com o auxílio duma cola epóxi, em que as superfícies do betão e do disco devem estar bem limpas e sem impurezas.

Deve-se deixar secar bem a cola para que a rutura se dê no betão e não na cola.

Seguidamente aplica-se uma força de tração ao disco usando-se um sistema mecânico portátil Figura 35, até o betão a ele colado romper.

A força de tração que causa rutura, em conjunto com as curvas de calibração baseadas num grande número de ensaios, torna possível uma estimativa da resistência à compressão.

O ensaio pode ser realizado de duas formas: com corte superficial seguindo a dimensão do disco metálico, e sem a execução deste. A execução do corte pode ser feita para evitar a influência das condições da superfície do betão, como no caso das superfícies carbonatadas.

No caso de o ensaio ser realizado sem o corte superficial, a zona fraturada ocorre aproximadamente a 5 mm abaixo da superfície. Caso o ensaio seja executado com corte, a

zona fraturada deverá ocorrer a uma profundidade de no mínimo 20 mm, para que não ocorram variações significativas da resistência ao arrancamento (Evangelista, 2002).

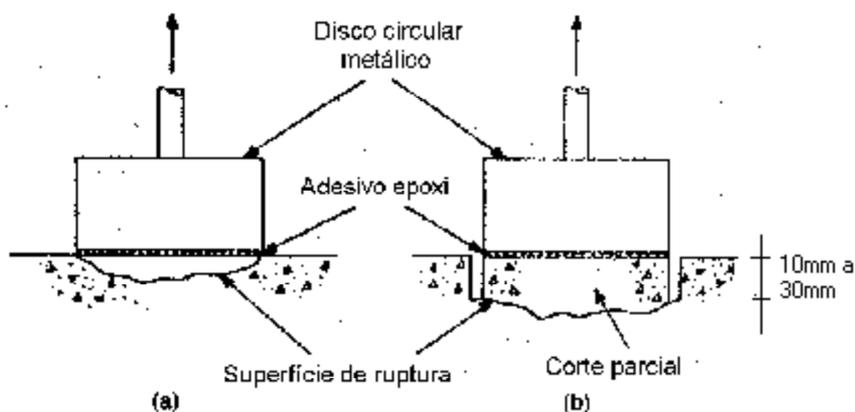


Figura 34: Representação esquemática do ensaio de *pull-off*: (a) Ensaio superficial, (b) Ensaio com corte parcial da superfície (Evangelista, 2002).



Figura 35: Instrumentação para testes de aderência *pull-off*

## ii. Aplicações

O ensaio tem sido usado com sucesso para avaliar a resistência *in-situ* do betão. Este método também pode ser usado para verificar a tensão de aderência de materiais de reparação em peças de betão (Pereira, E. e Medeiros, M. H. F., 2012).

### iii. Identificação dos parâmetros que influenciam os resultados

Além das propriedades do betão os fatores que podem influenciar os resultados são:

- Material do disco,
- Diâmetro e espessura do disco,
- Efeitos do corte feito no betão,
- Sistema de reação do equipamento,
- Velocidade de aplicação de carga,
- O tempo de cura da cola se não for respeitado corre se o risco da rutura acontecer na cola.

A Norma BS 1881: Part. 207 recomenda que a relação entre o diâmetro e a espessura do disco não deve ser menor que 40%, para garantir que a distribuição de tensões seja mais uniforme ( Padrão, 2004).

### iv. Vantagens e limitações

Esta metodologia tem revelado resultados bastante consistentes e de grande confiança, além do que, os resultados não satisfatórios são visíveis após o ensaio, através da observação da superfície de rutura.

Dada a sua grande simplicidade, o ensaio pode ser executado na própria estrutura, inclusive sem planeamento anterior ao ensaio.

A técnica é eficiente para ser utilizada em vigas e lajes, pois o ensaio mostra-se também adequado para execução em elementos estruturais de pequena seção, sendo suficiente uma

única face de exposição do elemento para realização do ensaio (Pereira, E. e Medeiros, M. H. F., 2012).

Existe a necessidade de arrancar uma pequena parte do betão à superfície da estrutura, necessitando posteriormente de pequenas reparações.

Durante os ensaios de arranque existe a possibilidade do aparecimento de fissuras, devendo ter-se em atenção a máxima dimensão da peça a ensaiar, bem como a distância dos dispositivos aos bordos da peça.

O risco aumenta com o aumento da dimensão do agregado, a classe de betão e a distância aos bordos da peça (Moura, 2012).

## 4. CORRELAÇÕES ENTRE MÉTODOS DE AVALIAÇÃO:

### a) Comparação entre a norma NP EN 13791 e a norma RILEM NDT4

A utilização de combinações entre métodos de ensaios, para determinar a resistência *in-situ*, usando vários métodos para ensaiar a mesma estrutura representa uma mais valia, pois aumenta a precisão dos resultados que se obtém em relação a usar os métodos isoladamente. Devido á preocupação em correlacionar os métodos foram criadas as normas NP EN 13791 e RILEM NDT4, que apresentam diferentes correlações entre métodos de avaliação, neste capítulo apresenta-se as duas normas comparando-as entre si.

A Norma RILEM NDT4, enumera algumas das combinações em que se utilizam dois ou mais métodos, nas quais se detetou um ganho de eficácia nos resultados obtidos (Padrão, 2004):

- Ultrassons com esclerómetro;
- Ultrassons com pull-off;
- Ultrassons com maturidade;
- Esclerómetro com pull-off;
- Esclerómetro com maturidade;
- Ultrassons com esclerómetro e com pull-off;

A mesma norma refere algumas considerações a ter em conta nos ensaios, de modo a que o recurso à combinação de métodos seja vantajoso:

- Cada método deve fornecer informação sobre diferentes propriedades que influenciam a resistência do betão;

- Cada método deve estar apto à realização de ensaios em elementos com tamanho e formas diferentes;
- Os ensaios devem ser rápidos;
- Os métodos devem ter o mesmo nível de precisão, na determinação de resistência;
- Os ensaios não devem afetar o comportamento estrutural do elemento a ser ensaiado.

Entre as combinações de métodos atrás citados, a que é utilizada frequentemente, inclusive é citada em algumas Normas Europeias, é o método que combina os ultrassons com o esclerómetro.

Ao utilizarem os dois métodos, consegue-se um aumento de precisão, pois alguns dos fatores que influenciam os resultados individualmente podem ser minimizados com a sua combinação.

Segundo o RILEM NDT4, para determinar as curvas com a mesma resistência devem ser avaliados os seguintes parâmetros:

- Quantidade de água na mistura;
- Grau de compactação;
- Idade do betão (3 a 90 dias);
- Condições de cura;
- Proporção de inertes miúdos;
- Teor de cimento.

Utilizando uma regressão linear múltipla na análise de resultados, consegue-se diminuir o erro da estimativa.

Os dados podem ser representados graficamente, com a velocidade de propagação de ultrassons na abcissa e o índice esclerométrico na ordenada, ou vice-versa (Padrão, 2004).

Ambos os métodos são não destrutivos e de execução rápida.

A norma NP EN 13791 apresenta duas abordagens distintas para avaliar a resistência *in-situ* do betão (abordagem A e abordagem B).

A abordagem A aplica-se quando estão disponíveis para ensaio pelo menos 15 carotes, a abordagem B aplica-se quando estão disponíveis entre 3 a 14 carotes.

Segundo a abordagem A, a resistência á compressão *in-situ* característica apresenta o menor dos dois valores:

$$f_{ck,is} = f_{m(n),is} - k_2 \times s$$

Ou de:

$$f_{ck,is} = f_{is,menor} + 4$$

Em que:

- $S$  é o desvio padrão dos resultados dos ensaios ou  $2,0 \text{ N/mm}^2$ , tomando-se o maior valor;
- $f_{ck,is}$  é a resistência à compressão *in-situ* característica;
- $f_{m(n),is}$  é a media dos resultados de  $n$  ensaios da resistência à compressão *in-situ*;

- $f_{is,menor}$  é o menor resultado do ensaio da resistência à compressão *in-situ*;
- $k_2$  é dado em disposições nacionais, ou é igual a 1,48.

A classe de resistência é obtida a partir da Tabela 7.

Classes de resistência à compressão da EN 206-1*	Relação entre a resistência in situ característica e a resistência característica de provetes normalizados	Mínima resistência in situ característica N/mm <sup>2</sup>	
		$f_{ck, is, cyl}$	$f_{ck, is, cube}$
C8/10	0,85	7	9
C12/15	0,85	10	13
C16/20	0,85	14	17
C20/25	0,85	17	21
C25/30	0,85	21	26
C30/37	0,85	26	31
C35/45	0,85	30	38
C40/50	0,85	34	43
C45/55	0,85	38	47
C50/60	0,85	43	51
C55/67	0,85	47	57
C60/75	0,85	51	64
C70/85	0,85	60	72
C80/95	0,85	68	81
C90/105	0,85	77	89
C100/115	0,85	85	98

NOTA 1: A resistência à compressão in situ pode ser inferior à que é medida sobre provetes normalizados extraídos do mesmo betão.

NOTA 2: A relação 0,85 está incluída no coeficiente  $\gamma_c$  da EN 1992-1-1:2004\*.

Tabela 7: Mínima resistência à compressão *in-situ* característica para as classes de resistência à compressão da EN 206-1 (NP EN 13791).

Segundo a abordagem B, a resistência á compressão *in-situ* característica apresenta o menor dos dois valores:

$$f_{ck, is} = f_{m(n), is} - k$$

Ou de:

$$f_{ck, is} = f_{is, menor} + 4$$

Em que a margem  $k$  depende do número  $n$  de resultados de ensaio sendo o seu valor dado pela Tabela 8.

$n$	$k$
10 a 14	5
7 a 9	6
3 a 6	7

Tabela 8: Margem  $k$  associada a pequeno número de resultados de ensaio (NP EN 13791).

Esta norma apresenta ainda duas alternativas de correlação entre a resistência obtida através de carotagem (segundo as abordagens A e B), e de métodos indiretos.

➤ Alternativa 1- Correlação direta com carotes:

Requer pelo menos 18 resultados de ensaio de carotes para estabelecer a relação entre a resistência à compressão *in-situ* e o resultado do ensaio pelo método indireto.

É aplicada aos ensaios indiretos, nomeadamente *esclerómetro*, *pull-off* e *ultrassons*, para avaliar a resistência à compressão *in-situ* quando está estabelecida, para o betão *in-situ*, uma relação específica com ensaio de carotes.

Para estabelecer a relação específica entre a resistência à compressão *in-situ* e o resultado dos ensaios por métodos indiretos, deve ser realizado um programa de ensaios completo, em que este programa deverá contemplar no mínimo 18 pares de resultados, ou seja, 18 resultados de ensaios de carotes e 18 resultados de ensaios indiretos.

A relação entre resultados passa por determinar uma reta ou uma curva que traduz os resultados dos pares de ensaios, através de uma regressão em que o resultado do ensaio indireto é uma variável e a estimativa da resistência à compressão *in-situ* é uma função desta variável. O desvio padrão da estimativa deve ser calculado e os limites de confiança da linha ou da reta devem ser determinados, assim como os limites de tolerância dos

resultados individuais. A relação é determinada como sendo o percentil inferior de 10% da resistência, ou seja, 90% dos valores da resistência são esperados ser maiores que o valor estimado.

O resultado do ensaio da resistência à compressão *in-situ*,  $f_{is,1}$ , é estimado a partir da relação estabelecida. A relação só deve ser utilizada para estimar a resistência *in-situ* para o betão considerado, a relação não deve ser utilizada fora do intervalo coberto pelos dados de ensaio.

Para avaliar a resistência a compressão *in-situ* característica é necessário garantir duas condições:

- A avaliação para cada zona de ensaio deve ser baseada em pelo menos 15 áreas de ensaio;
- O desvio padrão deve ser calculado com o máximo valor entre os resultados do ensaio ou ser igual a 3,0 N/mm<sup>2</sup>.

Depois de cumprir estas duas condições, a resistência à compressão *in-situ*, toma o menor valor de:

$$f_{ck,is} = f_{m(n),is} - 1,48 \times s$$

Ou de:

$$f_{ck,is} = f_{is,menor} + 4$$

Sendo  $s$  o desvio padrão dos resultados dos ensaios.

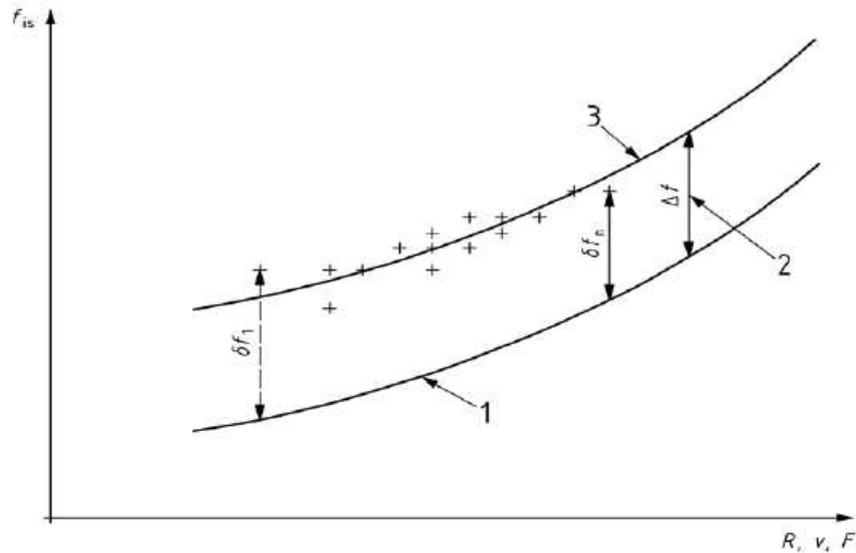
- Alternativa 2 – Calibração com carotes para um intervalo limitado de resistências utilizando uma relação estabelecida:

Os ensaios esclerométricos, os de ultrassons e os ensaios *pull-off* podem ser utilizados para a avaliação da resistência à compressão *in-situ* utilizando uma curva de base e deslocando-a para um nível apropriado, determinado pelos ensaios de carotes.

Para aplicar a alternativa 2, seleciona-se uma zona de ensaios, utilizam-se pelo menos 9 pares de resultados de ensaios (resultados de carotes e resultados de ensaios indiretos numa mesma zona de ensaios) para se obter o valor de  $\Delta f$ , que será o deslocamento a impor à curva de base a fim de estabelecer a relação entre as medições indiretas e a resistência à compressão *in-situ* característica. Esta alternativa impõe o procedimento seguinte:

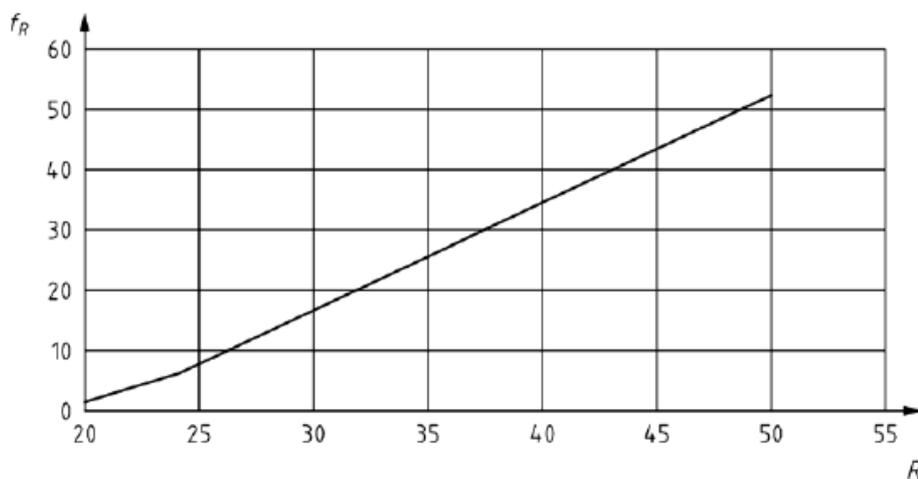
- Selecionar a zona de ensaio contendo pelo menos 9 áreas de ensaio;
- Em cada área de ensaio obter um índice esclerométrico, a força de arranque pelo método *pull-off* ou a velocidade de propagação dos ultrassons, conforme o caso;
- Em cada área de ensaio, colher e ensaiar uma carote;
- Seguindo os princípios ilustrados na Tabela 9, inscrever os pontos da resistência à compressão *in-situ* das carotes (*eixo y*), versus resultados dos ensaios indiretos (*eixo x*), sobre cópias das figuras (Figura 36, Figura 37 e Figura 38), conforme o caso;
- Para cada área de ensaio determinar a diferença em resistências *in-situ* entre o valor medido sobre a carote e o valor dado pela curva de base,  $\delta f = f_{is} - f_{R,V}$  ou  $F$ , em que a curva base é colocada num nível baixo para que o deslocamento  $\Delta$  seja sempre positivo;
- Calcular a média  $\delta f_{m(n)}$ , para o  $n$  resultados e o desvio padrão da amostra,  $s$ ;
- Calcular o deslocamento da curva de base,  $\Delta f$ , a partir de  $\Delta f = \delta f_{m(n)} - k_1 \times s$ , em que  $k_1$  é dado na Tabela 10;

- Deslocar a curva de base do valor  $\Delta f$  a fim de obter a relação entre o método de ensaio indireto e a resistência à compressão *in-situ* para o betão considerado.



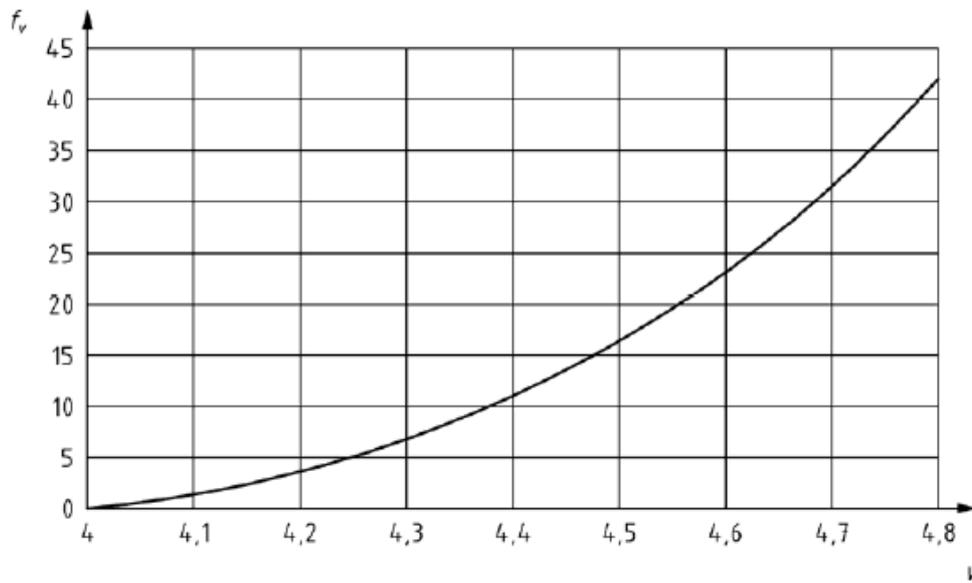
1	Curva de base
$\delta f_{1 \dots n}$	Diferença entre a resistência de cada carote e a resistência dada pela relação de base
2	$\Delta f$ Deslocamento da curva de base
3	Relação entre o método indirecto e a resistência à compressão <i>in situ</i> para o betão considerado sob investigação
R	Índice esclerométrico de acordo com a EN 12504-2*
F	Força de arranque de acordo com a EN 12504-3*
v	Velocidade de propagação dos ultra-sons de acordo com a EN 12504-4*

Tabela 9: Princípio para obter a relação entre a resistência à compressão *in-situ* e os dados do ensaio indirecto (NP EN 13791).



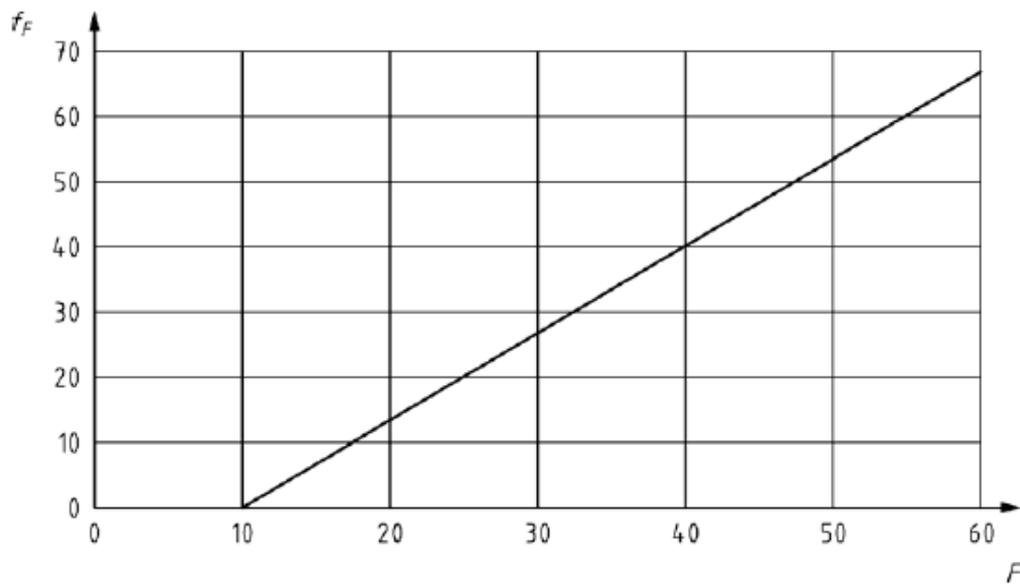
R Índice esclerométrico de acordo com a EN 12504-2\*

Figura 36: Curva de base para o ensaio com o esclerómetro (NP EN 13791).



v velocidade de propagação dos ultra-sons em km/s de acordo com a EN 12504-4\*

Figura 37: Curva de base para o ensaio da velocidade de propagação dos ultrassons (NP EN 13791).



F Força de arranque de acordo com a EN 12504-3\*

Figura 38: Curva de base para o ensaio da força de arranque (NP EN 13791).

As curvas de base ilustradas nos gráficos anteriores, ou as suas cópias aumentadas podem ser utilizadas para cálculos gráficos, sem infringir direitos de autor, havendo necessidade de cálculo numérico as funções matemáticas das curvas de base são as seguintes:

➤ Figura 36

$$f_r = 1,25 \times R - 23; \text{ em que, } 20 \leq R \leq 24$$

$$f_r = 1,73 \times R - 34,5; \text{ em que, } 24 \leq R \leq 50$$

➤ Figura 37

$$f_v = 62,5 \times v^2 - 497,5 \times v + 990; \text{ em que, } 4 \leq v \leq 4,8$$

➤ Figura 38

$$f_F = 1,33 \times (F - 10); \text{ em que, } 10 \leq F \leq 60$$

Podem também ser usadas outras curvas de base desde que sejam bem estabelecidas.

Número de pares de resultados <i>n</i>	Coefficiente <i>k<sub>l</sub></i>
9	1,67
10	1,62
11	1,58
12	1,55
13	1,52
14	1,50
≥ 15	1,48

Tabela 10: Coeficiente *k<sub>l</sub>* função do número de pares de resultados (NP EN 13791).

As relações estabelecidas anteriormente podem ser utilizadas se os resultados estiverem dentro dos intervalos de:

- $\pm 2$  índices esclerométricos fora da gama usada para obter o valor do deslocamento;
- $\pm 0,05$  Km/s fora do intervalo dos resultados do ensaio da velocidade de propagação dos ultrassons utilizado para definir o deslocamento;
- $\pm 2,5$  KN fora do intervalo da força de arranque utilizada para obter o valor do deslocamento.

O resultado do ensaio da resistência à compressão *in-situ*,  $f_{is}$ , é estimado a partir das relações estabelecidas utilizando o procedimento anterior. A relação só deve ser utilizada apenas para estimar a resistência à compressão *in-situ* para um dado betão e para as condições que foram estabelecidas. A relação só deve ser utilizada dentro do intervalo para o qual é válida.

Como comparação das duas normas, pode-se concluir que a norma portuguesa NP EN 13791 indica duas abordagens diferentes (A e B) para caracterizar a resistência *in-situ* através de carotagem. A mesma norma tem duas alternativas (1 e 2) para correlacionar essa resistência obtida através de carotagem com os resultados obtidos a partir de métodos indiretos, sendo os métodos indiretos indicados pela norma o *esclerómetro*, o *pull-off* e o da *velocidade de propagação de ultrassons*.

A norma RILEM NDT4 apresenta correlações entre métodos indiretos, sendo estes o *esclerómetro*, o *pull-off*, o da *velocidade de propagação de ultrassons* e o da *maturidade*. Segundo a mesma norma para analisar a resistência do betão á compressão *in-situ* é necessário determinar as curvas de correlação, para determinar essas curvas é necessário avaliar os parâmetros do betão (quantidade de água na mistura, grau de compactação, idade do betão, condições de cura, proporção de inertes miúdos e teor de cimento).

## 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS:

No fim deste trabalho conclui-se que o betão é um material muito heterogéneo, em que diversos parâmetros influenciam a sua resistência. Para fazer uma boa análise da resistência de uma estrutura de betão, é necessário confirmar que o betão usado é mesmo o pretendido, com o auxílio de ensaios em cubos ou cilindros e depois da estrutura concluída usar ensaios que permitem ensaiar a resistência do betão *in-situ*, correlacionando-os com os valores obtidos dos provetes.

Com a comparação das normas NP EN 13791 e a RILEM NDT4 podemos concluir que as duas apesar de indicarem correlações para alguns métodos indiretos iguais são as duas bastante distintas. Para usar a NP EN 13791 é necessário utilizar carotagem para correlacionar com os métodos indiretos, enquanto na RILEM NDT4 é necessário conhecer as propriedades do betão, ou seja, dependendo do tipo de estrutura que necessitamos de avaliar e dos parâmetros que temos podemos usar uma norma, a outra, ou as duas em conjunto. Como as duas normas usam correlação dos métodos indiretos com parâmetros diferentes usando as duas obtém-se um nível de certeza da resistência do betão à compressão *in-situ* ainda maior.

Conclui-se ainda que existem alguns ensaios de fornecem a resistência à compressão *in-situ* que não estão presentes em nenhuma das normas analisadas, como pro exemplo o *Windsor Probe*.

Como trabalhos futuros propõe-se o desenvolvimento de uma norma única que engloba-se todos os ensaios existentes para avaliar a resistência à compressão *in-situ*, correlacionando-os entre eles, de modo que no futuro quando for necessário analisar uma estrutura, os técnicos possam pegar na norma e dependente do parâmetros disponíveis optar pelos melhores métodos

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, E., (2005), *Ensaio de Betão nas Estruturas Carotes*, Escola Superior de Tecnologia, Universidade do Algarve; Algarve.

ASTM C 1074., (2004), *Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method*, Annual Books of ASTM Standards, Vol. 04.02, Philadelphia: American Society for Testing Materials.

ASTM C 597, (2009), *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*, ASTM.

Câmara, E., (2006), *Avaliação da resistência à compressão de concretos utilizados na grande Florianópolis através de ensaios não destrutivos*, PPGEC, UFSC, Florianópolis.

Carino, N. J., e Lew, H. S., (2001), *The Maturity Method: Theory and applications*, ASTM Journal of Cement, Concrete and Aggregates.

Carminho, F. J. T. H., (2012), *Resistência do betão à compressão em cubos VS cilindros*, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, FTC, Lisboa.

Crawford, G. I. (1997). *Guided to Nondestructive Testing of Concrete*, US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington.

Evangelista, A. C. J., (2002), *Avaliação da Resistência do Concreto Usando Diferentes Ensaio não Destrutivos*, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Malhotra V. M., Carino N. J., (2004), *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*. 2ª edição, Washington, D.C., CRC Press.

Marques, L. F. S., (2012), *Aplicação do método da maturidade a betões auto-compactáveis de elevado desempenho*, Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, FCTUC, Coimbra.

Moura, D. S., (2012), *Detioração e reabilitação de estruturas de Betão Armado*, Tese de Mestrado de Engenharia Civil, ISEP, Porto.

NP EN 12390-1, Ensaio do betão endurecido. Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes, 2003.

NP EN 12390-2, Ensaio do betão endurecido. Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica, 2003.

NP EN 12390-3, Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio, 2003.

NP EN 13791, Avaliação da resistência à compressão do betão nas estruturas em produtos prefabricados, 2008.

Padrão, J. A. L. M., (2004), *Técnicas de Inspeção e Diagnostico em Estruturas*, Tese de Mestrado em Engenharia Civil, FEUP, Porto.

Pereira, E., Medeiros, M. H. F., (2012), *Ensaio de “Pull Off” para avaliar a resistência à compressão do concreto: uma alternativa aos ensaios normalizados no Brasil*, REVISTA IBRACON DE ESTRUTURAS E MATERIAIS, Brasil.

Pereira, João Paulo Veludo; (1999), *Avaliação da Resistência à Compressão do Betão através de Ensaio Não-Destrutivos*, Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, FCTUC, Coimbra.

Peres, L.D., Barbosa, M.P., Pinto, R. C. A., (2005), *Aplicação do Método da Maturidade na avaliação da resistência à compressão de peças pré-moldadas*. 1º Encontro Nacional de Pesquisa - Proverte - Produção em Concreto Pré-Moldado.

Pires, S. M. S., (2011), *Estudo Comparativo da Resistência à Compressão do Betão em Provetes Normalizados e em Estrutura Betonada*, Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia dos Materiais, FTC, Lisboa.

Sampaio, C. M. C. P., (2010), *Caraterização do betão através de técnicas não-destrutivas*, Tese de Mestrado em Engenharia Civil, FEUP, Porto.