



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Área Departamental de Engenharia Civil**



## **Ensaios em pontes**

**ANAINE SHIRLEY LOPES MEDINA**

**Licenciada em Engenharia Civil**

**Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de  
Especialização em Estruturas**

**Orientador:**

**Doutor, Luciano Jacinto, Prof. Adjunto (ISEL)**

**Júri:**

**Presidente: Mestre, Cristina Ferreira Xavier de Brito Machado, Prof. Coordenadora  
(ISEL)**

**Vogais: Doutor, Filipe Manuel Almeida Vasques, Prof. Adjunto (ISEL)**

**Doutor, Luciano Jacinto, Prof. Adjunto (ISEL)**

**Outubro 2013**



*Aos meus pais,  
que sempre me apoiaram*



## **Agradecimentos**

Quero agradecer ao meu orientador, o Prof. Luciano Jacinto, pelo incansável apoio, disponibilidade e orientação ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais, Pedro Medina e Emma Lopes, pelo apoio incondicional ao longo dos anos contribuindo para o finalizar desta importante etapa do meu percurso académico pelo ISEL.

Ao meu namorado, Jorge Guimarães Santos, pela paciência e apoio incondicional ao longo destes anos.

Aos meus amigos e colegas de casa, Merícia Tavares, Zuleica Duarte, Assueila Pinheiro e Cláudio Querido, pelo companheirismo e apoio.

Agradeço ainda aos meus colegas de curso e amigos, que de uma forma directa ou indirecta contribuíram para o finalizar desta etapa.



## **Resumo**

Os ensaios não destrutivos (NDT) constituem um instrumento importante na avaliação da condição de uma ponte. No trabalho desenvolvido dá-se ênfase aos ensaios de caracterização de resistências, ensaios de caracterização geométrica e detecção de defeito e ainda ensaios de carga. A maior parte destes ensaios podem ser realizados sem interromper o tráfego da ponte, além de que a maioria não introduz qualquer dano na estrutura.

Todos os ensaios apresentam limitações e vantagens. Para cada ensaio estudado, apresenta-se uma breve descrição, o princípio físico em que se baseia, as suas limitações, as vantagens e o campo de aplicação.

No final do trabalho apresenta-se um caso de estudo de uma ponte onde foram realizados vários dos ensaios descritos, incluindo a extração de carotes. A partir dos valores obtidos no ensaio de resistência à compressão das carotes estimou-se o valor característico da tensão de rotura do betão à compressão usando metodologias probabilísticas. Fez-se ainda a classificação relativamente à classe de resistência do betão à compressão, recorrendo a norma NP EN 13791-2008.

## **Palavras-chave**

Pontes; Ensaaios não destrutivos (NDT)



## **Abstract**

The nondestructive testing (NDT) is an important tool in assessing the condition of a bridge. In the study conducted, emphasis is given to the resistance tests, geometric characterization and defect detection, and even load tests. Most of these tests can be performed without interrupting the traffic on the bridge, and that the majority does not introduce any damage in the structure.

All tests have limitations and advantages. For each test studied, a brief description is presented, the physical principle on which it is based, its limitations, advantages and scope.

At the end of the work a case study of a bridge is presented, on which it was made several of the tests described, including the extraction of cores. From the values obtained using the compressive strength of the cores the value of  $f_{ck}$  of concrete using probabilistic methods was estimated. It was determined, still, the strength class of the concrete using the NP EN 13791-2008.

## **Key-words**

Bridges; Non-destructive testing (NDT)



## Índice

<b>Capítulo 1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1. Enquadramento do tema.....	1
1.2. Objectivos .....	1
1.3. Organização do trabalho .....	2
<b>Capítulo 2. Ensaio de caracterização de resistências .....</b>	<b>5</b>
2.1. Extracção e ensaio de carotes .....	5
2.1.1. Descrição do ensaio.....	5
2.1.2. Limitações .....	6
2.1.3. Vantagens .....	7
2.1.4. Campo de aplicação .....	7
2.2. Esclerómetro .....	7
2.2.1. Princípio .....	8
2.2.2. Descrição do ensaio.....	8
2.2.3. Vantagens .....	10
2.2.4. Limitações .....	10
2.2.5. Campo de Aplicação .....	11
2.3. Teste <i>pull-off</i> .....	11
2.3.1. Princípios em que se baseia.....	11
2.3.2. Descrição do ensaio.....	11

2.3.3.	Limitações .....	13
2.3.4.	Vantagens .....	13
2.3.5.	Campo de aplicação .....	13

***Capítulo 3. Ensaaios de caracterização geométrica e detecção de defeitos .....*** **15**

3.1.	Detecção de armaduras .....	15
3.1.1.	Princípio em que se baseia .....	15
3.1.2.	Descrição do ensaio.....	15
3.1.3.	Limitações .....	16
3.1.4.	Vantagens .....	16
3.1.5.	Campo de aplicação .....	16
3.2.	Ensaaios acústicos .....	17
3.2.1.	Impact Echo.....	17
3.2.1.1.	Princípios em que se baseia .....	17
3.2.1.2.	Descrição do ensaio .....	17
3.2.1.3.	Limitações .....	18
3.2.1.4.	Vantagens .....	18
3.2.1.5.	Campo de aplicação.....	18
3.2.2.	Ensaio ultra-sónico.....	19
3.2.2.1.	Princípios em que se baseia .....	19

---

3.2.2.2.	Descrição do ensaio .....	20
3.2.2.3.	Limitações .....	22
3.2.2.4.	Vantagens .....	22
3.2.2.5.	Campo de aplicação .....	22
3.3.	GPR (Ground Penetrating Radar) .....	23
3.3.1.	Descrição do ensaio.....	23
3.3.2.	Princípios em que se baseia.....	23
3.3.3.	Limitações .....	24
3.3.4.	Vantagens .....	24
3.3.5.	Campo de aplicação .....	24
3.4.	Termografia .....	25
3.4.1.	Descrição do ensaio.....	25
3.4.2.	Princípios em que se baseia.....	26
3.4.3.	Limitações .....	26
3.4.4.	Vantagens .....	26
3.4.5.	Campo de aplicação .....	26
3.5.	Endoscopia.....	27
3.5.1.	Descrição do ensaio.....	27
3.5.2.	Princípios em que se baseia.....	28
3.5.3.	Limitações .....	28

---

3.5.4.	Vantagens .....	28
3.5.5.	Campo de aplicação .....	28
3.6.	Radiografia.....	29
3.6.1.	Descrição do ensaio.....	29
3.6.2.	Princípios em que se baseia.....	29
3.6.3.	Limitações .....	31
3.6.4.	Vantagens .....	31
3.6.5.	Campo de aplicação .....	31
<b>Capítulo 4. Ensaio de carga.....</b>		<b>33</b>
4.1.	Ensaio de diagnóstico.....	33
4.1.1.	Descrição do ensaio.....	33
4.1.2.	Princípios em que se baseia.....	35
4.1.3.	Limitações .....	35
4.1.4.	Vantagens .....	36
4.1.5.	Campo de aplicação .....	36
4.2.	Provas de carga .....	36
4.2.1.	Descrição do ensaio.....	36
4.2.2.	Princípios em que se baseia.....	37
4.2.3.	Limitações .....	37
4.2.4.	Vantagens .....	38

---

4.2.5. Campo de aplicação .....	38
<b><i>Capítulo 5. Caso de estudo .....</i></b>	<b>39</b>
5.1. Considerações iniciais.....	39
5.2. Descrição da ponte.....	40
5.3. Extracção de carotes .....	43
5.3.1. Modelo Normal .....	44
5.3.2. Modelo Log-Normal .....	45
<b><i>Capítulo 6. Conclusões .....</i></b>	<b>51</b>
<b><i>Bibliografia.....</i></b>	<b>53</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>55</b>

**Lista de figuras**

Figura 1 – Caroteadora[3] .....	5
Figura 2 – Corte esquemático de um martelo de Schmidt[6].....	8
Figura 3 – Esquema em corte do funcionamento de um esclerómetro[1].....	9
Figura 4 – Ensaio <i>Pull Off</i> [9].....	12
Figura 5 – Ensaio <i>Pull Off</i> – Superficial e Carotagem parcial [6] .....	12
Figura 6 – Detector de armaduras [10].....	15
Figura 7 - Esquema de funcionamento do ensaio <i>impactecho</i> [10]. .....	17
Figura 8 - Ensaio com ultas sons: Equipamento e esquema de funcionamento [10] .....	19
Figura 9 – Tipos de arranjos: a) Directa; b) Semirecta; c) Indirecta [6] .....	21
Figura 10 – Esquema de funcionamento do GPR [10].....	24
Figura 11- Exemplo de termografia[13].....	25
Figura 12 – Exemplo de endoscópio com monitor[14].....	27
Figura 13 – Principio de funcionamento da radiografia usando uma fonte de raios-X[1] .....	30
Figura 14 – Posicionamento de veículos (ensaio de carga estático de um viaduto).....	34
Figura 15 - Vista de Sul para Norte da ponte [22] .....	40
Figura 16 – Corte longitudinal pelo eixo da ponte [22] .....	40
Figura 17 – Tramo sul [22] .....	41
Figura 18 –Tramo central [22] .....	42
Figura 19 – Tramo norte[22].....	42

Figura 20 – Modelo Normal e Log-Normal da resistência do betão à compressão, com média e desvio padrão iguais aos da amostra usada ..... 46

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Relação entre a velocidade do ultra-som e a qualidade do betão [10]

Tabela 2 - resultados de carotes extraídas da ponte [22]

Tabela 3 – margem  $k$  [24]

Tabela 4 – Mínima resistência à compressão *in situ* característica para as classes de resistência à compressão de EN 206-1[24]

## Simbologia

$f_{ck}$	Valor característico da tensão de rotura do betão à compressão
$f_{fc}(x)$	Função densidade de probabilidade de X
$f_c$	Resistência do betão à compressão
$f_{ck, is}$	Resistência à compressão <i>in situ</i> característica
$f_{m(n), is}$	Média dos resultados de n ensaios de resistência à compressão <i>in situ</i>
$f_{ck, is, cyl}$	Resistência à compressão <i>in situ</i> característica expressa em resistência equivalente dum cilindro de 150 mm *300 mm
$f_{ck, is, cube}$	Resistência à compressão <i>in situ</i> característica expressa em resistência equivalente dum cubo de 150 mm de lado
$f_{is, menor}$	Menor resultado do ensaio da resistência à compressão <i>in situ</i>
$f_{(x)}$	Função densidade de probabilidade de X
$f_{(y)}$	Função densidade de probabilidade de Y
$k$	Margem associada ao pequeno número de ensaios
$k_2$	Coefficiente dependente das disposições no local de utilização ou, na ausência destes, coeficiente com valor de 1,48
$n$	Número de resultados de ensaio
$\mu$	Valor esperado (ou valor médio) da amostra
$\sigma$	Desvio padrão amostral
$\sigma^2$	Variância amostral
$s$	Desvio padrão

## Abreviaturas

NDT	Non-Destructive Testing
FDP	Função Densidade de Probabilidade
NP	Norma Portuguesa
EN	Norma Europeia



## **Capítulo 1. Introdução**

### **1.1. Enquadramento do tema**

Os ensaios em pontes constituem um complemento importante às inspecções visuais e uma fonte de informação quantitativa valiosa, reduzindo a subjectividade inerente às inspecções. Os ensaios disponíveis podem ser classificados em três grandes grupos: ensaios não destrutivos (*NDT – Non-Destructive Testing*), ensaios parcialmente destrutivos e ensaios destrutivos.

No trabalho que irá ser desenvolvido será dado ênfase aos ensaios não destrutivos, por serem os mais usuais na avaliação de pontes existentes. Além disso, serão tratados apenas os ensaios usados em estruturas de betão, embora alguns deles também se apliquem a pontes metálicas e de alvenaria. Existe ainda um outro conjunto de ensaios que, embora importantes, não serão aqui abordados por saírem do âmbito do trabalho: são os chamados ensaios de durabilidade usados na caracterização dos parâmetros que afectam directamente a durabilidade das estruturas.

Os ensaios NDT são realizados sem danificar o betão, e permitem avaliar após a construção se a estrutura está em condições de desempenhar as funções para as quais foi concebida e permitem também a monitorização contínua da estrutura ao longo do seu tempo de vida útil.

Os NDT adquiriram hoje em dia uma especial importância, tendo em conta que é necessário assegurar a manutenção dum parque de pontes significativo, estabilizado e progressivamente mais velho.

### **1.2. Objectivos**

O trabalho tem como objectivo descrever sucintamente os ensaios não destrutivos, as respectivas aplicações, o principio em que se baseiam, as principais vantagens, limitações e a importância destes ensaios na avaliação estrutural das pontes. A descrição dos ensaios será feita numa óptica de uso isolado e não numa óptica de monitorização.

Pretende-se mostrar como os NDT dão-nos informações sobre a capacidade de resistência, a qualidade do betão, das armaduras e do pré-esforço, e a integridade da estrutura, informações estas que não se conseguem obter somente através da inspecção visual. Estas informações são muito valiosas não só para garantir uma boa manutenção mas também para o caso em que seja necessário reforçar a estrutura.

No caso de estudo far-se-á uma descrição de uma ponte em que foram realizados vários ensaios entre os quais a extracção de carotes. A partir dos valores fornecidos no ensaio de resistência à compressão que foram realizados sobre as carotes pretende-se estimar o valor do  $f_{ck}$  (valor característico da tensão de rotura do betão à compressão) através de um modelo probabilístico (Normal e Log-normal). Pretende-se também fazer a classificação da classe de resistência do betão à compressão usando a norma NP EN 13791-2008. O valor obtido para  $f_{ck}$  é um dos parâmetros que posteriormente deve ser usado para avaliar a segurança dessa mesma ponte.

### 1.3. Organização do trabalho

O trabalho desenvolvido é composto por seis capítulos, sendo o primeiro o capítulo de introdução, em que se apresenta o enquadramento do tema, os respectivos objectivos e a sua organização.

No capítulo 2, intitulado “ensaaios de caracterização de resistências”, apresenta-se um conjunto de ensaios como sendo a extracção de carotes (1), o ensaio esclerométrico (2) e o ensaio *pull-off* (3), usados na caracterização da resistência do betão, quer a um nível superficial (2) e (3) ou em camadas mais profundas do betão (1).

No capítulo 3, intitulado “ensaaios de caracterização geométrica e detecção de defeitos”, apresenta-se um conjunto de ensaios como sendo o ensaio de detecção de armaduras, ensaios acústicos (*impact echo* e ultra-sónico), o GPR (*Ground Penetrating Radar*), termografia, endoscopia e radiografia. Este conjunto de ensaios permite a caracterização geométrica pois conseguem localizar e até indicar dimensões de elementos do betão armado como a sendo as armaduras. Para além disso permitem a detecção de discontinuidades existentes no betão.

No capítulo 4, intitulado “ensaaios de carga”, apresenta-se os chamados ensaios de diagnósticos (*diagnostic load tests*) e as provas de carga (*proof load test*). Em Portugal e em alguns países da Europa é comum a realização de ensaios de diagnóstico após a construção de pontes importantes, antes da sua entrada em serviço. Tais ensaios permitem atestar perante o dono de obra (e o público em geral) a aptidão da ponte para entrada em serviço. As provas de carga são realizadas sempre que se pretenda determinar por via experimental a sobrecarga máxima que uma ponte pode suportar em condições de segurança, isto é, sem que a ponte sofra danos.

No capítulo 5, intitulado “Caso de estudo”, far-se-á uma descrição de uma ponte onde foram realizados vários ensaios entre os quais a extracção de carotes. A partir dos valores fornecidos pelo ensaio de resistência à compressão que foram realizados sobre as carotes pretende-se estimar o valor do  $f_{ck}$  através de um modelo probabilístico (Normal e Log-Normal). Para além disso pretende-se também estabelecer a classe de resistência do betão à compressão recorrendo a norma NP EN 13791-2008.

No capítulo 6, intitulado “Conclusões”, são apresentadas as principais conclusões obtidas com a realização deste trabalho.



## Capítulo 2. Ensaio de caracterização de resistências

A qualidade do betão é fundamental para que uma estrutura desempenhe da melhor forma as funções para as quais foi concebida. Subjacente à qualidade, estão vários factores tal como a resistência do betão.

### 2.1. Extracção e ensaio de carotes

Na maior parte das avaliações estruturais ou diagnósticos em estruturas existentes, é inevitável, e muitas vezes essencial, à extracção de carotes [1].

A necessidade de determinar a qualidade do betão fornecido a uma construção ou betonado *in situ*, verificar a capacidade da estrutura em suportar o carregamentos impostos ou examinar o estado de deterioração da estrutura, obriga frequentemente à extracção de amostras (carotes) da estrutura para a realização de ensaios laboratoriais[2]. As amostras (carotes) ou provetes são extraídas da estrutura em avaliação recorrendo a caroteadoras (Figura 1) e ensaiadas posteriormente em laboratório.



Figura 1 – Caroteadora[3]

#### 2.1.1. Descrição do ensaio

Os locais de extracção de carotes devem ser escolhidos de forma a prejudicar o menos possível a estrutura e, simultaneamente conseguir representatividade. Para a

recolha das amostras é necessário um pacómetro para a detecção das armaduras, uma caroteadora, coroas diamantadas e um aspirador para a extracção de carotes na direcção ascendente ou em qualquer direcção.

Após a escolha dos locais para a extracção das carotes, o operador, fazendo uso da caroteadora e seguindo as recomendações do fabricante e a norma EN 12504-1 [4], recolhe as amostras necessárias. Estas amostras são identificadas e localizadas por forma a saber que parte da estrutura pertence cada amostra. Depois de serem devidamente localizadas, faz-se uma inspecção visual da carote para identificar a existência de anomalias.

Vários são os ensaios realizados sobre as carotes em laboratório, tais como ensaios para determinar a densidade, ensaios de compressão ou ensaios de resistência à tracção.

Relativamente ao ensaio de resistência à compressão, usualmente realizado sobre carotes, estas devem ser extraídas, examinadas e preparadas conforme a EN 12504-1 [4] e ensaiadas conforme a EN 12390-3[5].

### **2.1.2. Limitações**

Apresenta o inconveniente de ser parcialmente destrutiva. Por se tratar de uma técnica parcialmente destrutiva, o número de carotes que se podem extrair é em geral limitado, o que tem repercussão na incerteza estatística associada às medições efectuadas. Após a extracção destas carotes é necessário proceder a reparação do furo deixado na estrutura.

Na extracção das carotes deve-se evitar locais de esforços máximos, em especial locais fortemente comprimidos. Além disso, deve-se evitar cortar armaduras existentes, não só porque isso representa um dano acrescido para a estrutura, como também os ensaios a realizar sobre as carotes são afectados pela presença das armaduras.

Só se pode extrair carotes em locais onde a estabilidade ou a durabilidade da estrutura não serão influenciadas.

### 2.1.3. Vantagens

Uma inspecção visual das carotes permite observar os materiais constituintes do betão, materiais estranhos que possam aparecer no betão, o aspecto do betão e ainda identificar a existência de descontinuidades (fissuras, vazios, etc.).

A extracção de carotes permite a realização de vários ensaios laboratoriais que fornecem resultados bastante fiáveis sobre as condições do betão da obra. Do ponto de vista da avaliação da resistência, o ensaio de carotes é considerado actualmente o ensaio mais fiável.

### 2.1.4. Campo de aplicação

Após a extracção das carotes, estas são ensaiadas em laboratórios permitindo obter algumas características do betão como sendo:

- O peso específico (peso do provete/volume do mesmo);
- A resistência à compressão;
- A resistência à tracção;
- Módulo de elasticidade;
- Parâmetros que afectam a durabilidade, como a permeabilidade e o estado de carbonatação, entre outros.

## 2.2. Esclerómetro

Este aparelho foi inventado pelo Eng.º suíço Ernest Schmidt no final dos anos 40 sendo que as versões actuais têm por base o mesmo princípio. A Figura 2 mostra as características básicas de um esclerómetro[6].

O esclerómetro é usado principalmente na avaliação da resistência superficial do betão, podendo também ser usado com o objectivo de detectar a existência de betão delaminado, a homogeneidade do betão superficial e verificar a necessidade de executar ensaios mais complexos. Trata-se de um equipamento autónomo e de muito fácil uso, permitindo efectuar um número significativo de leituras em pouco tempo.

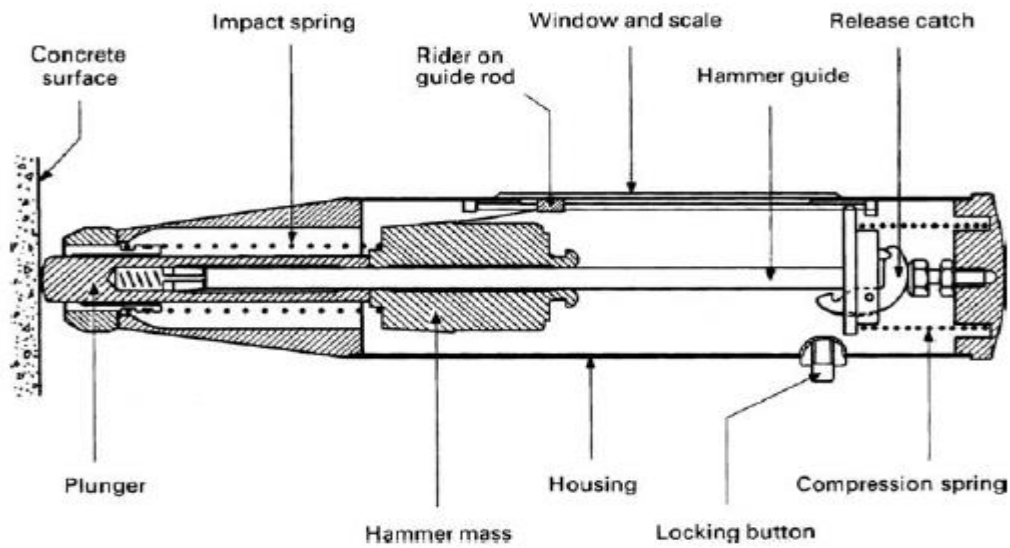


Figura 2 – Corte esquemático de um martelo de Schmidt[6]

### 2.2.1. Princípio

O ensaio esclerométrico serve fundamentalmente para determinar a dureza superficial do betão. Baseia-se no princípio de que há uma forte correlação entre a dureza do betão e a sua resistência.

### 2.2.2. Descrição do ensaio

O ensaio deve ser realizado de acordo com a norma EN 12504-2 seguindo as seguintes recomendações:

- É necessário calibrar o equipamento especificamente para a estrutura em estudo;
- Preparar a superfície do betão com uma pedra abrasiva por forma a torná-la lisa e eliminar qualquer contaminação que possa introduzir erros nas leituras;
- Os elementos de betão a serem testados devem ter uma espessura mínima de 100 mm e devem estar fixos a uma estrutura;
- Para a escolha da área onde vai ser efectuado o ensaio deve-se ter em conta alguns factores tais como o tipo de superfície, o estado higrométrico, o estado de carbonatação, entre outros factores;

- O equipamento deve ser usado de acordo com as instruções do fabricante sendo necessário fazer pelo menos 3 leituras antes de começar o ensaio garantindo que o equipamento funciona na perfeição
- O ensaio deve ser realizado com uma temperatura que varia entre os 10 °C e os 35 °C;
- O esclerómetro deve ser usado de forma que fique sempre perpendicular a superfície de betão.

Segundo [6] as leituras são muito sensíveis a variação local do betão principalmente devido a existência de agregados na superfície do betão, sendo assim necessário fazer várias leituras em cada um dos locais onde se realiza o ensaio. A norma usada em Portugal [7] aconselha um mínimo de 9 leituras registando a mediana dessas 9 leituras, para obter uma boa estimativa numa área de  $300 \times 300 \text{ mm}^2$  em que os pontos de impacto distam no mínimo 25 mm uns dos outros ou da fronteira.

A seguir ilustra-se de uma forma resumida o modo de funcionamento de um esclerómetro (Figura 3).

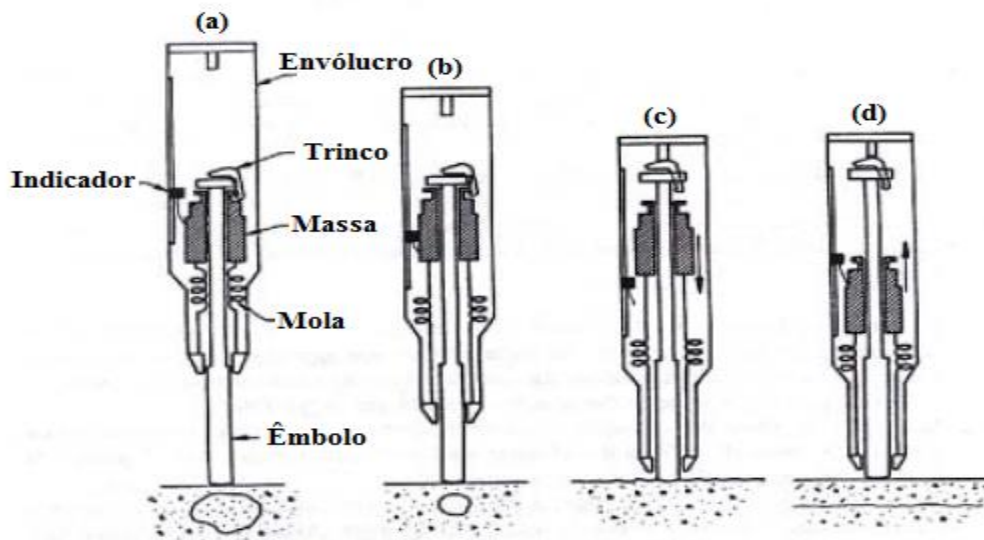


Figura 3 – Esquema em corte do funcionamento de um esclerómetro[1]

Como ilustrado na Figura 3 o esclerómetro é colocado perpendicularmente à superfície de betão (a), começando a empurrar o êmbolo contra esta (b). Este empurrar do êmbolo contra a superfície de betão faz com as molas que estão ligadas a massa do esclerómetro sejam tencionadas até atingirem um valor máximo (c). Ao atingir este valor máximo, o trinco liberta a massa e esta é puxada pela mola em direcção à superfície (c). Ao fazer este percurso a massa embate no êmbolo e o choque é transmitido a superfície a ensaiar, sendo que esta por sua vez reage provocando um ressalto (d). Este ressalto é transmitido a massa, que ao deslocar-se no sentido oposto faz mover o indicador que regista o valor máximo do ressalto (índice esclerométrico).

O índice esclerométrico obtido no ensaio é posteriormente relacionado com as curvas de correlação fornecidas juntamente com o equipamento estimando-se assim a resistência superficial do betão.

### **2.2.3. Vantagens**

As vantagens do uso do esclerómetro são o facto de se tratar de um equipamento simples, autónomo, relativamente barato, fácil de transportar e usar, que permite obter um número considerável de medições num curto espaço de tempo.

### **2.2.4. Limitações**

As principais limitações são[1]:

- Só pode ser realizado numa superfície lisa (plana);
- Quando realizado sobre amostras, deve-se garantir que estas estão bem fixas pois qualquer movimento pode causar uma diminuição do índice esclerométrico;
- Não deve ser aplicado em betão de fraca resistência se este ainda for “novo” ou possuir uma resistência inferior a 7 MPa;
- As curvas de correlação fornecidas pelos fabricantes são feitas usando cubos de betão padrão cuja composição normalmente é diferente da composição do betão da estrutura em avaliação, razão pela qual não se deve depositar muita confiança nestas curvas;

- Em estruturas em que o nível de carbonatação é muito elevado, o valor do índice esclerométrico também é mais elevado, sendo que nos casos mais extremos pode ser até 50% maior, não aconselhando-se portanto o seu uso tratando-se de betão carbonatado;
- Só fornece valores relativos a uma camada superficial do betão;
- Ensaio de baixa precisão.

### **2.2.5. Campo de Aplicação**

O ensaio esclerométrico é um ensaio muito útil e simples permitindo obter informações acerca da homogeneidade/uniformidade do betão, determinar se um dado betão cumpre os requisitos especificados no projecto, determinar a resistência superficial do betão, sendo útil muitas vezes na determinação dos locais de extracção de carotes.

## **2.3. Teste *pull-off***

### **2.3.1. Princípios em que se baseia**

Baseia-se no conceito de que a força necessária para puxar um bloco metálico juntamente com uma camada de betão ou argamassa a qual o bloco de metal está ligado, está relacionado com a resistência do betão [8].

### **2.3.2. Descrição do ensaio**

O teste *pull-off* (ou ensaio de arrancamento) consiste na extracção de um pequeno disco de betão mediante a aplicação de uma força de arranque (Figura 4). A força necessária para o arrancamento constitui uma indicação da resistência à tracção do betão, a qual pode ser convertida em resistência à compressão, dada a forte correlação entre as duas resistências.



Figura 4 – Ensaio *Pull Off*[9]

Esta técnica pode ser aplicada em 2 formas[8]:

- O disco ou bloco metálico é colado na superfície de betão com uma resina epoxi, puxando posteriormente por forma a medir a força necessária para arrancar um bloco de betão para fora da superfície (Figura 5).
- Em alternativa pode ser realizado através de uma carotagem parcial do betão em que se liga posteriormente um bloco metálico com o mesmo diâmetro ao topo do cilindro ficando este conjunto isolado. Isto permite que a rotura ocorra no interior do betão (Figura 5).

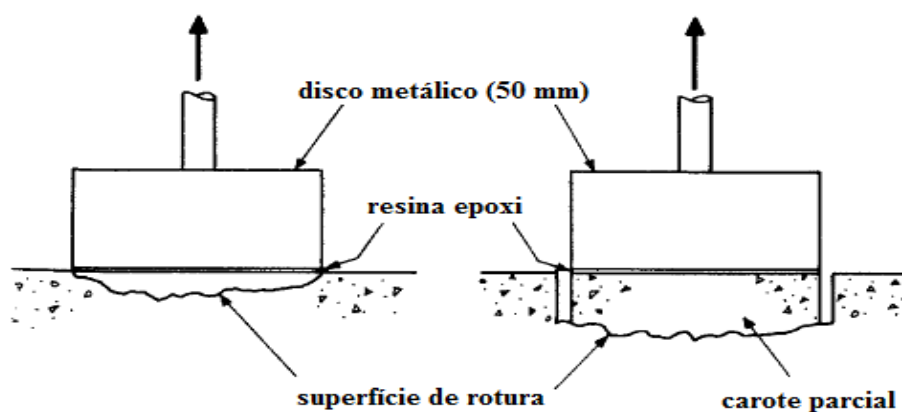


Figura 5 – Ensaio *Pull Off* – Superficial e Carotagem parcial [6]

O ensaio é parcialmente destrutivo e, tal como o esclerómetro, fornece apenas valores superficiais.

### **2.3.3. Limitações**

Uma das limitações do ensaio é o tempo de espera pela secagem da resina que permite a ligação do disco metálico à superfície de betão, sendo que normalmente aplica-se a resina num dia e realiza-se o ensaio noutro. Deve-se ter em atenção a preparação da superfície e as condições ambientais que podem impedir a perfeita aderência entre o disco metálico e a superfície de betão, introduzindo erros nos resultados. Como já foi referido anteriormente, este ensaio fornece apenas valores superficiais.

### **2.3.4. Vantagens**

Trata-se de um equipamento leve, de grande precisão e que permite em caso de ausência de energia eléctrica accionar uma manivela tornando-o assim um equipamento independente. A reparação da superfície depois da execução do ensaio também é um processo simples e rápido. Uma outra vantagem é o facto dos danos causados na superfície de betão não constituírem um problema para a estrutura.

### **2.3.5. Campo de aplicação**

Este ensaio permite estimar a resistência à compressão do betão através da resistência à tracção que por sua vez é dada pela força de arranque. Sendo um ensaio de caracterização de resistências, este permite também determinar a resistência superficial do betão.



## ***Capítulo 3. Ensaaios de caracterização geométrica e detecção de defeitos***

### **3.1. Detecção de armaduras**

#### **3.1.1. Princípio em que se baseia**

A detecção de armaduras é feita pelos chamados detectores de armaduras, ou pacómetros (Figura 6), cujo funcionamento se baseia na alteração dos campos magnéticos causada pela presença de aço. Os modernos detectores de armaduras, para além de indicarem a localização e direcção das armaduras, permitem também avaliar os diâmetros e recobrimentos.



Figura 6 – Detector de armaduras [10]

#### **3.1.2. Descrição do ensaio**

Os detectores de armaduras são constituídos por um dispositivo indicador e por uma sonda (Figura 6). Fazendo uso da sonda percorrem-se pontos previamente estabelecidos para fazer o controlo, sendo que na presença de armadura o equipamento emite um sinal sonoro e os resultados como sendo a orientação das armaduras segundo x-y, o recobrimento e os diâmetros são indicados no dispositivo indicador. Este equipamento também dispõe de um Software que permite a transferência dos dados para um computador onde estes resultados podem ser observados e interpretados[10].

### **3.1.3. Limitações**

O ensaio tem algumas limitações em casos em que a densidade de armadura seja elevada, principalmente em caso de haver uma quantidade elevada de armaduras sobrepostas.

Na preparação do ensaio dever-se-á ter em conta a presença de irregularidades superficiais, como por exemplo, marcas de cofragem que podem influenciar as leituras. É necessário um cuidado especial em zonas onde os agregados possam ter propriedades magnéticas [6].

### **3.1.4. Vantagens**

O sistema constituído pela sonda e pelo dispositivo indicador é leve e compacto permitindo de uma forma económica, detectar armaduras, determinar o recobrimento e o respectivo diâmetro dessas armaduras. É um equipamento simples de usar e de muita precisão.

Em casos onde o betão seja ligeiramente reforçado, este ensaio *in situ* fornece valores confiáveis.

### **3.1.5. Campo de aplicação**

Este ensaio permite a detecção e identificação das armaduras bem como o seu recobrimento e o diâmetro. Pode também ser usado para a identificação de armaduras durante a escolha dos locais para a extracção de carotes.

É usado muitas vezes para fazer o levantamento das armaduras numa estrutura existente, quando não existe um projecto.

## 3.2. Ensaaios acústicos

Existem vários ensaios, ditos acústicos, que utilizam em comum o princípio da propagação de ondas sonoras em meios elásticos. Entre estes, destacam-se:

- **Impact echo:** O ensaio *impact echo*, originalmente desenvolvido para avaliação da integridade de estacas, é usado actualmente para detecção de vazios e de betão delaminado. Permite também a avaliação de espessuras.
- **Ensaio ultra-sónico:** Os ensaios com ultra-sons (ondas sonoras de elevada frequência) são realizados com a finalidade de avaliar as seguintes características do betão: (1) homogeneidade; (2) resistência e (3) presença de defeitos (vazios, fissuras).

### 3.2.1. Impact Echo

#### 3.2.1.1. Princípios em que se baseia

O equipamento consiste num transdutor de impactos (gerador de ondas acústicas), num receptor e numa unidade de processamento (Figura 7). O método baseia-se na reflexão de ondas acústicas sempre que estas atravessam descontinuidades.

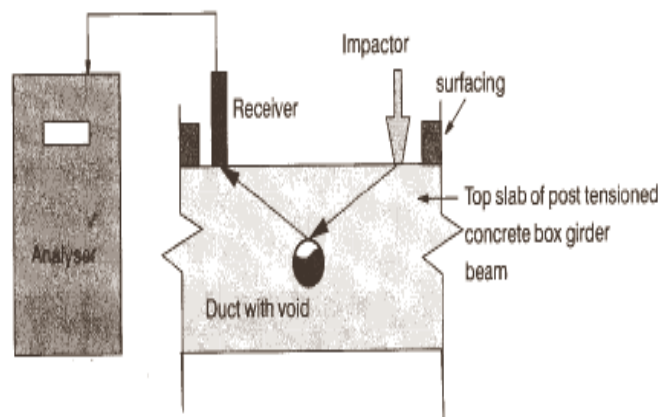


Figura 7 - Esquema de funcionamento do ensaio *impact echo*[10].

#### 3.2.1.2. Descrição do ensaio

Uma percussão é aplicada à superfície do betão através de um transdutor de impactos (gerador de ondas acústicas), gerando uma onda que se propaga pelo interior do betão. Se existir alguma descontinuidade no betão (vazios ou betão delaminado) a

onda é reflectida e posteriormente captada por um receptor colocado na superfície do betão. Os sinais captados são então processados, permitindo caracterizar os defeitos.

### **3.2.1.3. Limitações**

É um método que permite detectar vazios no betão, mas no entanto só detecta vazios com um tamanho considerável e, caso estejam completamente preenchidos com água não é possível detectá-los[11]. É necessário obter informação prévia sobre as disposições construtivas da estrutura (desenhos) e os resultados obtidos no ensaio posteriormente necessitam de ser analisados por um técnico fora do local do ensaio.

### **3.2.1.4. Vantagens**

É um método seguro, que não apresenta riscos para a construção e nem para o técnico que realiza o ensaio, requer acesso apenas de um dos lados permitindo detectar a existência e a profundidade de vazios e a existência de betão delaminado. Este método permite também avaliar espessuras de elementos e a profundidade das armaduras.

### **3.2.1.5. Campo de aplicação**

Este método acústico é usado com sucesso para quantificar e identificar a existência de descontinuidades/defeitos no betão como forma de manutenção preventiva por exemplo na avaliação de tabuleiros de pontes para determinar a existência de betão delaminado[12].

Segundo [12] a compreensão dos princípios físicos do método acústico *impac* *techo* e informações sobre a estrutura a ser testada são ambos importantes e necessários para que o trabalho de campo seja bem-sucedido.

### 3.2.2. Ensaio ultra-sónico

#### 3.2.2.1. Princípios em que se baseia

O equipamento consiste num gerador de ultra-sons ligado a um emissor e um receptor (Figura 8). É medido o tempo gasto pela onda sonora entre o emissor e o receptor. Se a distância percorrida for conhecida, pode-se calcular a velocidade média da onda, a qual depende fundamentalmente da densidade e das propriedades elásticas do meio (módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson). Quanto mais denso for o meio, maior é a velocidade das ondas. Observam-se correlações muito boas entre a velocidade das ondas sonoras e a resistência do betão [10].

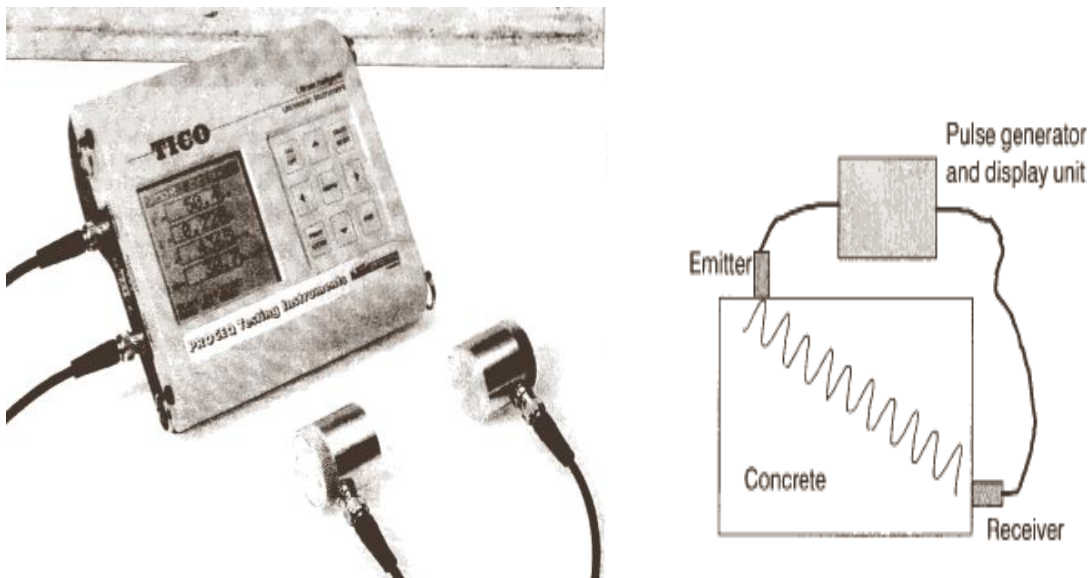


Figura 8 - Ensaio com ultras sons: Equipamento e esquema de funcionamento [10]

Sendo assim, sabendo o comprimento do percurso e o tempo gasto neste percurso tem-se:

$$V = \frac{L}{T} \quad (3.1)$$

Onde:

V [Km/s] – velocidade média da onda,

L [Km] – comprimento do percurso,

T [s] – Tempo gasto no percurso.

A Tabela 1 mostra uma típica correlação entre a velocidade média da onda e a qualidade do betão [10].

Velocidade da onda	Qualidade do betão
4.5	Excelente
3.5 – 4.5	Bom
3.0 – 3.5	Duvidoso
2.0 – 3.0	Pobre
2.0	Muito pobre

Tabela 1 – Relação entre a velocidade do ultra-som e a qualidade do betão [10]

Sabendo que a velocidade média da onda depende fundamentalmente da densidade e das propriedades elásticas do meio como referido anteriormente, a velocidade média da onda também pode ser calculada usando a seguinte expressão [10]:

$$V = \frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (3.2)$$

Onde:

V [Km/s] – Velocidade média da onda,

E [N/mm<sup>2</sup>] – Módulo de elasticidade,

$\rho$  [Kg/m<sup>3</sup>] – Densidade,

$\nu$  – Coeficiente de Poisson.

Por outro lado, a presença de defeitos reflecte os ultra-sons, o que permite detectar a sua eventual presença.

### 3.2.2.2. Descrição do ensaio

O equipamento de ensaio é constituído por um gerador de ultra-sons ligado a um emissor e um receptor (Figura 8). Este gerador de ultra-sons proporciona a geração de impulsos que são transmitidos posteriormente para o betão e recebidos no receptor que amplifica o impulso medindo e mostrando o tempo gasto no percurso entre o emissor e o receptor (Figura 8). Impulsos electrónicos (gerador de ultra-sons) são gerados

repetidamente e transformados em ondas mecânicas que são transmitidas pelo emissor que por sua vez deve estar devidamente acoplado ao betão [6].

A medição da velocidade média da onda pode ser feita tendo por base 3 tipos de arranjos (Figura 9):

- Transmissão directa;
- Transmissão semidirecta;
- Transmissão indirecta ou transmissão de superfície.

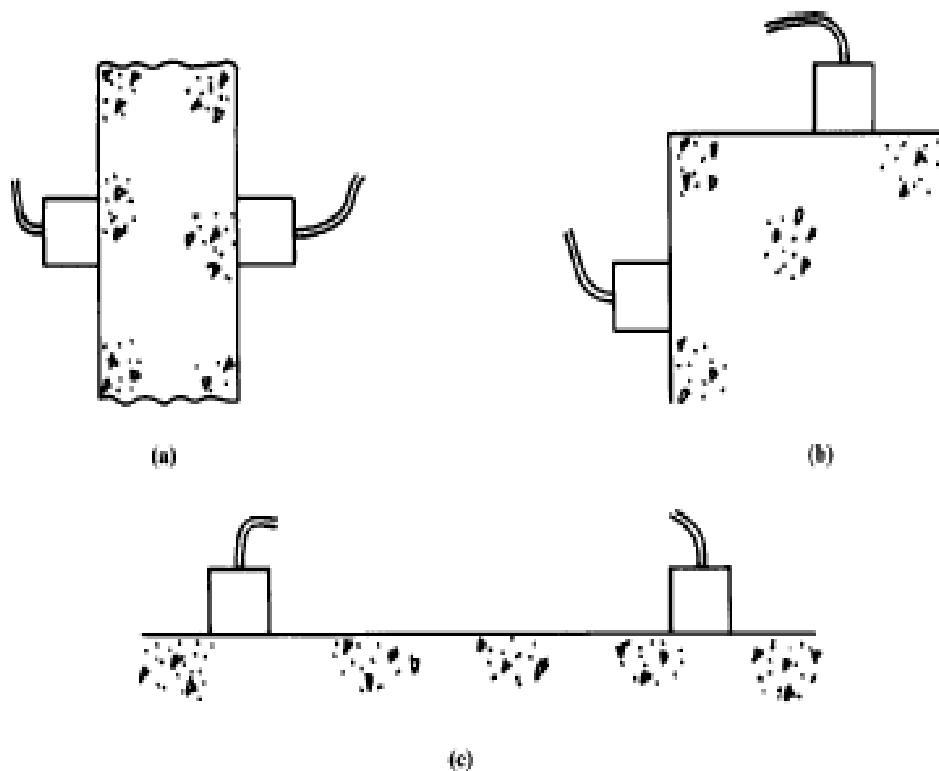


Figura 9 – Tipos de arranjos: a) Directa; b) Semidirecta; c) Indirecta [6]

O método directo é o que fornece resultados mais fiáveis do ponto de vista da medição do tempo de percurso entre o emissor e o receptor [6]. Além disso o caminho está claramente definido, podendo ser medido com maior precisão. Sendo assim este método deve ser usado sempre que possível na avaliação da qualidade do betão [6].

Caso não seja possível o uso do método directo pode-se usar o método semidirecto que também pode fornecer resultados satisfatórios, desde que o ângulo entre o emissor e o receptor não seja muito grande, e, se o comprimento do percurso entre estes também não for muito grande [6].

Por exclusão de partes conclui-se que o método que produz resultados menos satisfatórios é o método indirecto. O sinal recebido pelo receptor está dependente da dispersão do impulso devido a existência de descontinuidades e portanto altamente sujeito a erros [6]. A velocidade medida será predominantemente influenciada pela superfície de betão, que pode não ser representativa do corpo do elemento estrutural que se pretende avaliar, e o comprimento do percurso da onda também é incerto [6].

### **3.2.2.3. Limitações**

É essencial que os resultados obtidos nos ensaios sejam devidamente avaliados e interpretados por técnicos que estejam familiarizados com esta técnica [6]. Quando ambas as faces da componente da estrutura que se pretende avaliar não estiverem disponíveis é necessário recorrer ao uso do método indirecto em que os resultados obtidos estão sujeitos a erros como referido anteriormente. Este método permite determinar o grau de fissuração de uma estrutura mas no entanto a sua utilização para a detecção de defeitos existentes no interior do betão não é fiável quando o betão contém água [6].

Outro ponto fraco deste método é determinação da resistência do betão, em que produz resultados pouco fiáveis [6].

### **3.2.2.4. Vantagens**

A medição da velocidade média da onda, a qual depende fundamentalmente da densidade e das propriedades elásticas do meio fornece resultados fiáveis e muitos uteis de uma forma completamente não destrutiva. O equipamento usado para realizar o ensaio é relativamente barato, fácil de manusear (quando o operador possui conhecimentos sobre o equipamento e sobre os factores que podem alterar as leituras), e fornece resultados com um elevado grau de confiança.

### **3.2.2.5. Campo de aplicação**

São amplas as aplicações das ondas ultra-sónicas quer em ensaios laboratoriais, quer em ensaios realizados *in situ*. Em relação às estruturas de betão em que se pretende verificar a sua qualidade, estas ondas permitem verificar a qualidade em relação à [10] :

- Homogeneidade do betão;
- A presença de vazios, fissuras ou outras imperfeições;
- Alterações no betão que ocorrem com o passar do tempo;
- A qualidade do betão relativamente à sua resistência.

### **3.3. GPR (Ground Penetrating Radar)**

#### **3.3.1. Descrição do ensaio**

Ensaaios com GPR (*Ground Penetrating Radar*) têm uma longa aplicação em inspeções geofísicas, tendo-se tornado actualmente de uso frequente em inspeções de pontes de betão armado. A forma mais comum do funcionamento do GPR é o modo em que o emissor e o receptor da antena são mantidos a uma distância fixa e movidas numa linha recta por forma a produzir um perfil (mapa)[1]. Permite portanto mapear os limites e pode mostrar as disposições construtivas da superfície de por exemplo o tabuleiro de uma ponte.

O GPR dispõe de algumas características invulgares como sendo o facto do impulso transmitido ser muito curto, o que permite uma medição precisa das distâncias entre as antenas colocadas na superfície e os objectos encontrados na sub-superfície[1].

#### **3.3.2. Princípios em que se baseia**

O equipamento é constituído por uma antena simultaneamente emissora e receptora de ondas electromagnéticas, uma unidade de controlo, uma gravador oscilográfico e um conversor de energia de corrente contínua. O funcionamento do GPR baseia-se no seguinte princípio: sempre que as ondas electromagnéticas encontram um material diferente (com diferentes propriedades dieléctricas), parte da energia é reflectida à superfície e captada pela antena, o que permite mapear as fronteiras entre os diferentes materiais ou discontinuidades existentes (Figura 10)[10].

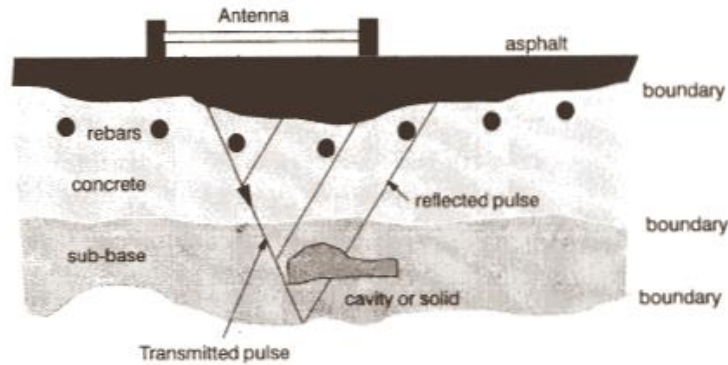


Figura 10 – Esquema de funcionamento do GPR [10]

### 3.3.3. Limitações

Trata-se, dum equipamento dispendioso, tornando o seu uso bastante oneroso quando se pretende avaliar pequenas áreas. Além disso a sua utilização requer um técnico muito especializado.

### 3.3.4. Vantagens

A antena é portátil e de uso bastante rápido. Em geral é possível analisar um metro quadrado por minuto, sendo ainda possível, se necessário, visualizações em tempo real permitindo localizar armadura, vazios e fissuras.

Ao contrário de algumas técnicas, o GPR não necessita de uma condição ambiental favorável, ou seja, não há restrições relativamente as condições ambientais.

### 3.3.5. Campo de aplicação

Em estruturas de betão armado este método permite detectar um elevado número de parâmetros incluindo:

- O recobrimento de armaduras;
- Localização de vazios;
- Localização de fissuras;
- Existência de betão delaminado;
- Localização de armaduras;
- Localização de cabos de pré-esforço.

### 3.4. Termografia

A termografia é usada principalmente na detecção de betão delaminado, sendo particularmente eficaz na detecção de defeitos de aderência entre laminados de carbono e a superfície de betão.

#### 3.4.1. Descrição do ensaio

O equipamento consiste numa fonte de calor e numa câmara termográfica. A fonte de calor emite um flash de infravermelhos, captado pela câmara, e decorrido um curto período de tempo tira-se outra, e assim por diante enquanto decorrer o ensaio. As diferenças de temperatura observadas nas várias imagens causam um contraste, permitindo detectar a presença de defeitos (Figura 11).

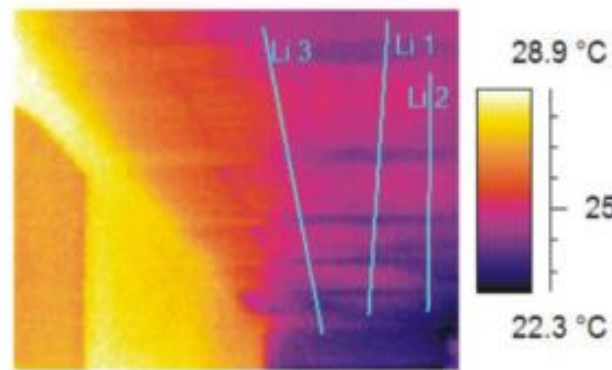


Figura 11- Exemplo de termografia[13]

Em relação as condições do ambiente envolvente da componente da estrutura a ser analisada no dia anterior o tempo deve ser seco e ensolarado [1]. O ensaio pode ser realizado duas ou três horas depois do nascer ou pôr do sol, ou ambas as vezes [1] sendo a transferência de calor rápida. A superfície a ser ensaiada deve estar limpa de detritos pois estes possuem uma condutibilidade térmica podendo portanto interferir na análise dos resultados. Além disso é necessário fazer um alinhamento por forma a que as fotografias sejam tiradas sempre à mesma secção (secção testada).

A câmara de infravermelhos fica conectada com um equipamento periférico que permite o armazenamento dos dados que posteriormente serão analisados num computador.

### **3.4.2. Princípios em que se baseia**

A termografia é uma técnica que permite a detecção de defeitos localizados na camada superficial de betão através da medição da temperatura da superfície. Este método baseia-se em 2 princípios. O primeiro princípio é que uma superfície emite radiação electromagnética com uma intensidade que depende da temperatura. O segundo princípio é que a presença de anomalias tendo uma condutividade térmica mais baixa que o material circundante interfere com o fluxo de calor e altera a distribuição da temperatura superficial.

### **3.4.3. Limitações**

Uma das limitações deste ensaio é facto dos equipamentos usados serem dispendiosos. São também necessários padrões de referência e se o ensaio for realizado sobre provetes pode ser necessário uma fonte de calor para a produção do gradiente térmico.

### **3.4.4. Vantagens**

Uma das vantagens do uso da termografia é o facto do equipamento usado ser portátil, o que facilita o transporte do mesmo, e é de fácil manuseio.

O ensaio pode ser feito sem contacto directo com a superfície a ser inspeccionada e pode-se analisar uma grande área de forma relativamente rápida usando as camaras de infravermelhos.

### **3.4.5. Campo de aplicação**

A termografia pode ser usada para detectar a existência de betão delaminado, a perda de calor e alterações da humidade de elementos de betão, principalmente em elementos planos [1]. Basicamente este método permite a detecção de anomalias existentes na camada superficial de betão.

### 3.5. Endoscopia

A endoscopia é usada na inspeção detalhada de vazios de bainhas de pré-esforço que tenham sido detectados previamente por outros meios.

#### 3.5.1. Descrição do ensaio

O equipamento consiste numa sonda altamente flexível com cerca de 6 mm de diâmetro e cerca de um metro de comprimento, sendo que equipamentos mais modernos podem atingir maiores comprimentos de sonda, sonda essa dotada de uma microcâmara numa extremidade e o endoscópio na outra.

Os equipamentos mais modernos dispõem de um monitor onde se pode observar em tempo real as imagens (Figura 12).



Figura 12 – Exemplo de endoscópio com monitor[14]

O ensaio obriga a abertura de um furo com cerca de vinte e cinco milímetros de diâmetro por onde é inserida a sonda, sendo por isso um ensaio intrusivo. A abertura do furo deve ser feita cuidadosamente, pois há o perigo de danificar cordões de pré-esforço no caso da inspeção de bainhas de pré-esforço[10].

Para além da câmara que se encontra na extremidade da sonda é necessário que esta também seja dotada de uma luz na extremidade para que se possa iluminar o local a ser inspeccionado.

### **3.5.2. Princípios em que se baseia**

Este ensaio baseia-se principalmente numa inspecção visual dentro do furo inspeccionado. Insere-se a sonda constituída por um conjunto de fibras ópticas dentro de um furo existente ou de um furo previamente feito especificamente para a realização do ensaio. Esta sonda tendo uma câmara acoplada na extremidade e um sistema de iluminação permite inspeccionar um elemento da estrutura.

### **3.5.3. Limitações**

Para uma correcta interpretação dos resultados esta deve ser feita por um perito ou engenheiro com experiencia em inspecções visuais. Pode ser considerado um método parcialmente destrutivo nos casos em que seja necessário abertura do furo para inspeccionar o elemento.

### **3.5.4. Vantagens**

As imagens obtidas podem ser armazenadas num CD o que permite proceder a análise dos resultados obtidos após a realização do ensaio. Os equipamentos mais modernos para além da opção de armazenamento de imagens em CD também permitem armazenar as informações numa simples *Pendrive*. Para além disso podem ser inseridos em meios diferentes. O equipamento usado é de fácil manuseio e de fácil armazenamento dos dados para posterior análise. De uma forma geral este método permite a inspecção visual de elementos de uma estrutura que de outra forma não seria possível.

### **3.5.5. Campo de aplicação**

Este ensaio aplicado em pontes e viadutos permite:

- Inspeção detalhada de bainhas de pré-esforço;
- Inspeccionar juntas de dilatação;
- Possível corrosão existentes nas armaduras;
- Verificar a qualidade da betonagem;
- Verificar as condições dos materiais existentes nas cavidades inspeccionadas;

- Avaliar condições gerais da estrutura.

### 3.6. Radiografia

#### 3.6.1. Descrição do ensaio

O ensaio radiográfico pode ser feito usando dois tipos de raios: o raio-X e o raio- $\gamma$ . A principal diferença no uso destes dois tipos de raios reside principalmente no facto de serem usados fontes diferentes para gerar cada um destes raios e as suas respectivas capacidades de penetração [15]. Para a escolha da fonte de radiação deve-se ter em conta alguns factores como sendo o tipo de aplicação ou simplesmente restrições económicas.

O equipamento consiste num emissor de raios-X acoplado em geral a um veículo. À medida que o veículo se move ao longo da ponte, as imagens podem ser analisadas em tempo real num monitor instalado dentro do veículo, ou podem ser armazenados e analisadas posteriormente.

#### 3.6.2. Princípios em que se baseia

**Raio-X** – uma fonte de raios-X emite um feixe de raios em direcção à componente a ser analisada e uma película fotográfica de raio-X é colocada atrás dessa componente que vai ser atravessada pela radiação (Figura 13)[1]. Este feixe de raios X ou  $\gamma$  sofre uma perda de intensidade durante a passagem pelo material.

O grau de atenuação da radiação, ou a quantidade de radiação perdida vai depender da qualidade da radiação, densidade e da espessura dos materiais das componentes da estrutura analisadas [1]. No caso do uso de raios- $\gamma$  a fonte de radiação é uma fonte de isótopos.

A relação entre a intensidade de fótons incidentes e transmitidas é [1]:

$$I = I_0 * e^{-\mu x} \quad (3.3)$$

Onde:

$I$  – Intensidade de fótons transmitidos,

$I_0$  – intensidade de fótons incidentes,

$\mu$  – Coeficiente de atenuação,

$x$  – Espessura do elemento.

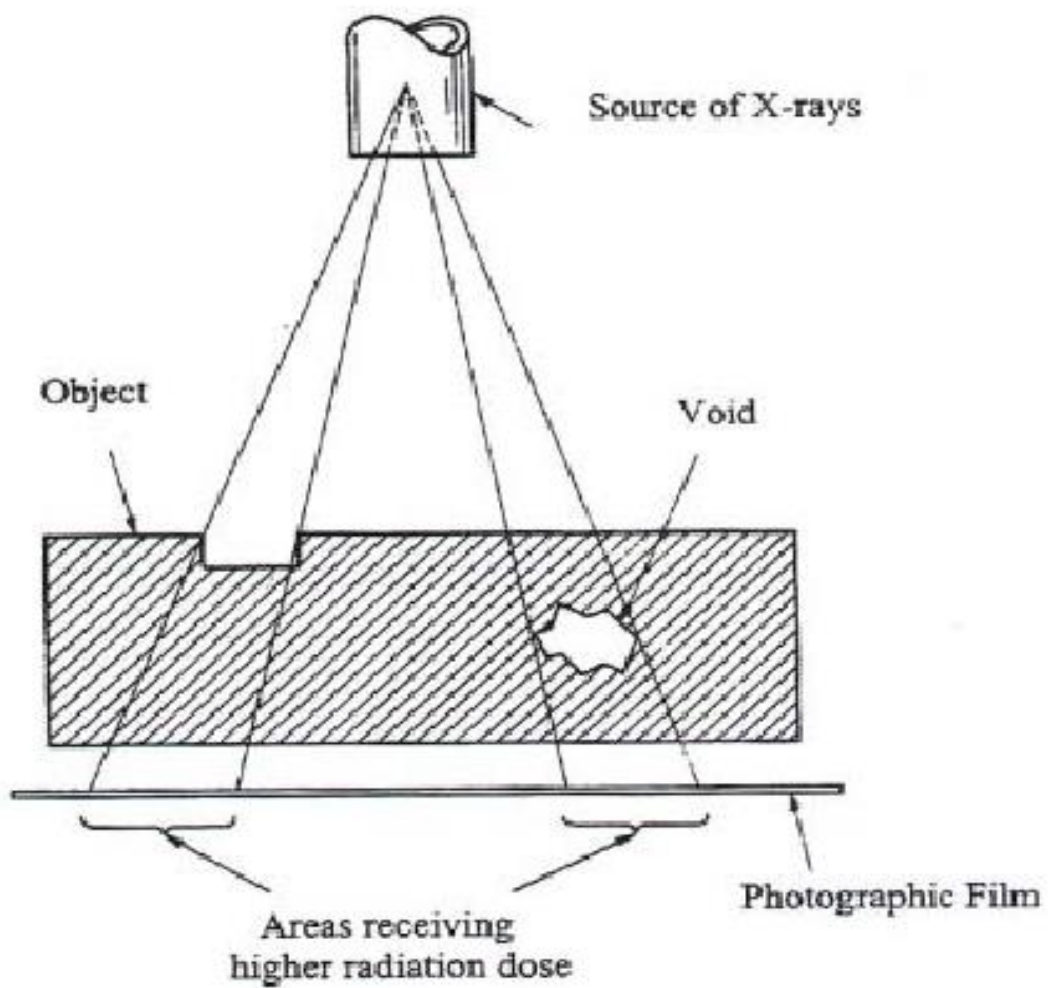


Figura 13 – Princípio de funcionamento da radiografia usando uma fonte de raios-X[1]

Analisando a figura anterior, que ilustra o princípio de funcionamento de uma radiografia usando raios-X, consegue-se perceber de que forma a existência de discontinuidades aparecem nas fotografias tiradas.

### **3.6.3. Limitações**

Caso seja necessário avaliar elementos com uma espessura considerável é necessário recorrer ao uso de raios-X, pois estes atingem maiores profundidades do que raios- $\gamma$ , mas tem um inconveniente de serem muito mais caros.

Este método apresenta o inconveniente de exigir procedimentos especiais de segurança devido a problemas de saúde e segurança causados pela radiação emitida, não só para os operadores como para pessoas que vivem nas proximidades da estrutura, sendo necessário isolar a área do público em geral.

Em muitas estruturas não se consegue usar este método pois não se consegue, ou é muito difícil a colocação da película fotográfica numa posição adequada. Para a realização deste ensaio exige-se que o(s) operador(es) tenham formação e autorização para realizar este tipo de ensaio.

### **3.6.4. Vantagens**

A principal vantagem da radiografia é a sua elevada fiabilidade.

### **3.6.5. Campo de aplicação**

A aplicação principal da radiografia consiste na detecção de defeitos em injecções de cabos de pré-esforço. Trata-se de um dos métodos mais fiáveis [10]. Trata-se de um método muito bom no que se refere a análise de elementos de aço de uma estrutura [1].

Pode também ser usado para a localização de fissuras e vazios existentes no elemento analisado, variações de densidade dos materiais, bem como a localização da posição das armaduras existentes no betão [1].



## **Capítulo 4. Ensaaios de carga**

Os ensaios de carga são usados com o objectivo de caracterizar o comportamento da estrutura como um todo. Existem fundamentalmente dois tipos de ensaios de carga:

1. Ensaaios de diagnóstico (*diagnostic load tests*) que incluem:
  - Ensaaios estáticos;
  - Ensaaios pseudo-dinâmicos;
  - Ensaaios dinâmicos.
2. Provas de carga (*proof load tests*).

Os ensaios de diagnóstico são realizados com cargas conhecidas e consistem basicamente em comparar os resultados previstos numericamente com os resultados obtidos durante o ensaio.

Os ensaios do tipo prova de carga são menos usuais e destinam-se a determinar a carga máxima que a ponte pode suportar, compatível com o seu funcionamento em regime linear. Como é evidente, um ensaio deste tipo acarreta um risco elevado de introduzir danos na ponte e, por esse motivo, em geral só é realizado em casos excepcionais.

### **4.1. Ensaaios de diagnóstico**

#### **4.1.1. Descrição do ensaio**

Como se disse acima, distinguem-se três tipos de ensaio de diagnóstico: ensaios estáticos, ensaios pseudo-dinâmicos e ensaios dinâmicos. Nos ensaios estáticos recorre-se a veículos com peso conhecido, criteriosamente posicionados no tabuleiro a fim de gerar esforços ou deslocamentos máximos nas secções críticas (em geral as secções de vão e apoio). O valor das cargas, assim como a sua posição, são definidos de forma à que os esforços provocados sejam representativos das cargas de serviço[16]. Em Portugal não existe nenhum documento oficial que fixe os procedimentos a adoptar em

ensaaios de carga, mas é usual usarem-se cargas que provoquem na estrutura esforços da ordem dos 60% a 70% dos esforços característicos das sobrecargas do RSA (1983) que, como se sabe, são valores que supostamente têm uma probabilidade de 95% de não serem atingidos em períodos de 50 anos. A Figura 14 ilustra o posicionamento de veículos durante o ensaio de carga estático de um viaduto.



Figura 14 – Posicionamento de veículos (ensaio de carga estático de um viaduto)

Nos ensaios pseudo-dinâmicos é usado um veículo que se move lentamente ao longo da ponte. O objectivo é determinar linhas de influência reais e compará-las com as correspondentes linhas de influência determinadas numericamente.

Nos ensaios dinâmicos usam-se acelerómetros criteriosamente posicionados ao longo da estrutura, os quais permitem medir a resposta da estrutura e determinar parâmetros dinâmicos, tais como a frequência e a configuração dos modos de vibração e coeficientes de amortecimento. Existem fundamentalmente três tipos de ensaio para caracterização dinâmica das estruturas [17]:

- Ensaaios de vibração forçada, com controlo das forças de excitação;
- Ensaaios em regime livre;
- Ensaaios da estrutura às acções ambientais, que correspondem às condições normais do seu uso.

O primeiro tipo de ensaio é mais usual em estruturas de pequenas dimensões pois exige o uso de equipamentos geradores de vibrações que, no caso de pontes de dimensão apreciável, são dispendiosos. Nos ensaios em regime livre é imposto um deslocamento à estrutura, normalmente por meio de um cabo repentinamente libertado, medindo-se a resposta da estrutura após a libertação do cabo, isto é, em regime livre. Trata-se de um ensaio bastante adequado à avaliação dos coeficientes de amortecimento, embora os outros tipos também o permitam fazer.

No último tipo de ensaio, o mais usual em pontes, mede-se a resposta da estrutura às acções dinâmicas a que normalmente está sujeita: vento e tráfego. Trata-se de um ensaio mais simples do que os anteriores, pois não exige o uso de equipamento especial para introdução de forças de excitação. Além disso, o ensaio é realizado com a ponte em serviço, o que é uma importante vantagem, dado que não obriga ao encerramento temporário da ponte. Os métodos para determinação dos modos de vibração neste tipo de ensaio, usualmente designados por *métodos de identificação modal estocástica*, estão bem estabelecidos [17].

#### **4.1.2. Princípios em que se baseia**

O conceito destes ensaios baseia-se no princípio de que as frequências e os modos de vibração de uma estrutura são funções da massa e da rigidez da mesma [18]. Caso sejam introduzidos danos numa estrutura, a massa da mesma permanece igual. O mesmo não se pode dizer da rigidez da estrutura que altera-se quando se introduzem danos à estrutura alterando portanto as frequências e os modos de vibração.

#### **4.1.3. Limitações**

Durante a execução destes ensaios é necessário cortar o tráfego da ponte, para que se possam posicionar os veículos nas posições correctas. O nível de carregamento atingido durante o ensaio deve ser representativo das cargas em condições de serviço [19].

#### 4.1.4. Vantagens

Os ensaios de diagnósticos permitem verificar e ajustar as previsões do modelo numérico usado [19].

Os ensaios fornecem informações muito úteis quando os modelos estruturais usados (malhas ou método dos elementos finitos) não conseguem prever com precisão o comportamento da estrutura devido à incertezas em relação às propriedades dos elementos da estrutura ou condições de fronteira [19].

Actualmente com o avanço tecnológico dos sensores, computadores e os sistemas de comunicação, é muito mais simples executar ensaios de diagnósticos

#### 4.1.5. Campo de aplicação

No âmbito das avaliações de pontes existentes, os ensaios de diagnóstico podem ser usados sempre que haja dúvidas sobre a adequação do modelo numérico desenvolvido. Algumas dessas dúvidas poderão relacionar-se com:

- Valores das propriedades mecânicas dos materiais;
- Condições fronteira, incluindo interação solo-estrutura;
- Influência de elementos secundários, como o tapete betuminoso, lancis e vigas de bordadura moldadas *in situ*;
- Efeitos estruturais não contabilizados, como o efeito de arco.

### 4.2. Provas de carga

#### 4.2.1. Descrição do ensaio

As provas de carga são realizadas sempre que se pretenda determinar por via experimental a sobrecarga máxima que uma ponte pode suportar em condições de segurança, isto é, sem que a ponte sofra danos, como por exemplo fissuração. Como se disse anteriormente, trata-se de um ensaio muito delicado devido ao perigo real de introduzir danos irreversíveis na estrutura.

No entanto, se realizados cuidadosamente, poderão ser úteis especialmente nos casos em que haja falta substancial de informação, como por exemplo em pontes antigas nas quais não existam nem projecto nem registos de obra, ou pontes com estrutura muito difícil de modelar numericamente, como pode acontecer com certas pontes antigas de alvenaria[16].

Basicamente o ensaio consiste em carregar a ponte com uma carga de valor crescente até que haja sinais de que a estrutura está a entrar em regime não linear. No decorrer do ensaio, medem-se as deformações que decorrem da aplicação desta carga.

A ponte é devidamente monitorizada à medida que a carga aumenta, interrompendo-se o ensaio logo que se cumpra o critério de paragem previamente estabelecido. Levantamentos topográficos de precisão antes e depois do ensaio permitirão avaliar eventuais deformações residuais não recuperadas.

O *Bulletin 22 da fib* [20] descreve vários sistemas para introdução de carga crescente.

#### **4.2.2. Princípios em que se baseia**

O princípio deste ensaio baseia-se na medição de deformações impostas a estrutura pela introdução de cargas.

#### **4.2.3. Limitações**

É um ensaio muito delicado pois acarreta um perigo real de introdução de danos irreversíveis à estrutura em análise, sendo portanto necessário medidas de segurança.

É necessário isolar a área, devido aos perigos já referidos anteriormente, causando portanto perturbações no tráfego.

Não se deve realizar provas de carga caso o estado de degradação da ponte seja tal, que o acréscimo de carga possa provocar o colapso da mesma.

#### **4.2.4. Vantagens**

Permite avaliar o desempenho e obter valores com maior nível de confiança para pontes antigas sem projectos.

Permite avaliar os efeitos da fadiga sobre a estrutura pois durante o ensaio há ciclos de carga e de descarga. O carregamento é aplicado de forma controlada.

#### **4.2.5. Campo de aplicação**

Para além de permitir a avaliação do desempenho de uma ponte, permitem determinar a capacidade de carga e outras características do comportamento estrutural.

## Capítulo 5. Caso de estudo

### 5.1. Considerações iniciais

Com a expansão das estradas e dos caminhos-de-ferro, verificada nos últimos dois séculos, o número de obras de arte aumentou drasticamente [21]. Muitas destas obras de arte (pontes) sofreram uma deterioração assinalável e evidenciam as mais variadas anomalias [21].

Estas anomalias/patologias que afectam as obras de arte advém de vários factores como sendo o ambiente envolvente da estrutura (agentes agressivos naturais), a alteração do fluxo de tráfego, a falta de manutenção, entre outros factores.

Quando aparecem anomalias é necessário verificar através de inspecções visuais como uma primeira avaliação o estado geral da estrutura e caso seja necessário executam-se um conjunto de ensaios *in situ*, que podem ser parcialmente destrutivos ou não destrutivos e que permitem avaliar os danos reais provocados.

A ponte objecto de estudo atingiu um estado de degradação tal que, ponderando entre a sua reparação ou substituição chegou-se a conclusão quer do ponto de vista técnico, quer do ponto de vista económico, que a melhor solução seria a substituição.

## 5.2. Descrição da ponte

A ponte sobre a qual foi realizada alguns ensaios com o objectivo de avaliar a sua segurança é constituída por um tabuleiro em laje vigada e continua, assente sobre dois encontros perdidos e dois pilares cujas fundações encontram-se no leito do rio (Figura 15). O vão central possui um comprimento de 22,8 m e os extremos possuem um comprimento de 18,6 m, formando um total de 60,0 m de comprimento.



Figura 15 - Vista de Sul para Norte da ponte [22]

Longitudinalmente a ponte é constituída por 4 vigas longitudinais, sobre as quais assenta-se a plataforma de rodagem e dois passeios. As vigas longitudinais encontram-se ligadas entre si por carlingas, uma por cada apoio e duas por cada tramo formando um total de dez carlingas (vigas transversais) (Figura 16).

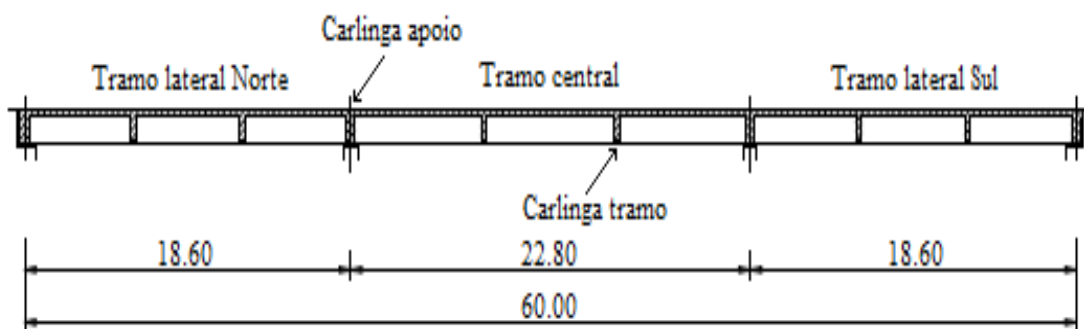


Figura 16 – Corte longitudinal pelo eixo da ponte [22]

As fundações dos pilares e encontros são do tipo indirecto constituídos por estacas pré-fabricadas e cravadas de betão armado.

A ponte objecto de estudo encontra-se num estado avançado de degradação, como se pode observar nas figuras seguintes. Estas fotos foram tiradas do tabuleiro da ponte que se encontra num estado avançado de degradação, podendo-se observar a corrosão das armaduras que se encontram expostas.



Viga 1



Viga 2



Viga 3



Viga 4

Figura 17 – Tramo sul [22]



Figura 18 –Tramo central [22]



Viga 1



Viga 2



Viga 3



Viga 4

Figura 19 – Tramo norte[22]

### 5.3. Extracção de carotes

A ponte descrita anteriormente foi objecto de vários ensaios entre os quais a extracção de carotes numa viga do tabuleiro, num dos encontros e num pilar. Sobre estas carotes foram realizadas ensaios de resistência à compressão em que se obtiveram os resultados apresentados na Tabela 2.

Localização dos provetes	Identificação dos provetes	Massa (g)	Altura (mm)	Secção (mm <sup>2</sup> )	Carga de rotura (KN)	Tensão de rotura (MPa)
Encontro sul	EE3	1870	99	7698	487,7	63,5
	EE4-1	1873	99	7698	503,9	65,5
	EE4-2	1885	99	7698	528,4	68,5
Viga 4	V4ME1	1868	99	7698	344,8	45
	V4ME3-1	1876	99	7698	314,3	41
	V4ME3-2	1887	99	7698	342	44,5
Pilar sul	P1	1160	84	5542	336	60,5
	P2	1140	84	5542	207	37,5
	P3	1151	84	5542	190	34,5

Tabela 2 - resultados de carotes extraídas da ponte [22]

Analisando a Tabela 2, pode-se constatar uma enorme diferença entre o valor máximo e o valor mínimo da tensão de rotura obtida para os provetes sendo que o projecto especificava a mesma resistência do betão para todos os elementos da estrutura. Através destes resultados pretende-se estimar o valor do  $f_{ck}$  (valor característico da tensão de rotura do betão à compressão [23]) do tabuleiro, que é o elemento que originou maiores preocupações de segurança.

Para proceder à estimação deste valor é necessário escolher qual o modelo probabilístico mais adequado. Se existir mais do que um modelo e existirem dúvidas sobre qual deles é o mais adequado, deve-se optar-se pelo mais conservativo.

No caso específico das resistências do betão, os modelos probabilísticos usualmente recomendadas são o modelo Normal e o modelo Log-normal.

Usando a distribuição Normal de Probabilidade tem-se algumas desvantagens pois é uma distribuição de probabilidade que contém valores negativos e como se sabe a resistência é sempre positiva. Por isso é necessário calcular a probabilidade do valor do

$f_{ck}$  ser negativo, probabilidade esta que deve ser muito pequena. Caso contrário o modelo normal não deve ser utilizado.

Para além da escolha do modelo mais adequado ao cálculo do  $f_{ck}$ , coloca-se ainda outra questão relativamente a quantidade de carotes à considerar na estimativa do  $f_{ck}$ . Pode-se considerar apenas os valores do tabuleiro (três carotes), ou pode-se considerar a totalidade das carotes (nove carotes).

### 5.3.1. Modelo Normal

Uma variável aleatória continua  $x$  tem distribuição normal de probabilidade se a sua função densidade de probabilidade (FDP) for dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} * \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (5.1)$$

$$-\infty < x < \infty \quad -\infty < \mu < \infty \quad \sigma^2 > 0$$

Em que:

$$X \sim N(\mu, \sigma^2) \quad (5.2)$$

Os cálculos foram efectuados para duas situações: considerando a totalidade das amostras e considerando apenas as amostras do tabuleiro. Para o primeiro caso obteve-se a média  $\mu = 51.17$  e o desvio padrão  $\sigma = 13.21$ , obtendo-se assim um valor de  $f_{ck} = 29.44$  MPa. Para o segundo caso, usando apenas as amostras do tabuleiro obteve-se uma média  $\mu = 43.5$  e o desvio padrão  $\sigma = 2.18$ , obtendo-se assim um valor de  $f_{ck} = 39.91$  MPa.

Analisando os dois valores de  $f_{ck}$  obtidos considerando a totalidade das amostras e considerando apenas as amostras do tabuleiro, observa-se uma enorme diferença dos valores. Este exemplo ilustra um facto curioso, pois juntando valores mais elevados (em relação as carotes do tabuleiro) obtém-se uma estimativa mais pequena. A explicação está no facto de, apesar da média subir, o desvio padrão também sobe e penaliza o valor de  $f_{ck}$ .

Sabendo que o projecto especificava características idênticas para o betão dos pilares, encontros e tabuleiro, é aceitável considerar a totalidade das amostras como sendo parte da mesma população. Sendo assim o valor de  $f_{ck}$  calculado usando a distribuição normal de probabilidade é  $f_{ck} = 29.44$  MPa (valor obtido usando as nove carotes).

Como já se referiu anteriormente, usando a distribuição normal, é necessário calcular a probabilidade do valor de  $f_{ck}$  ser negativo, tendo-se obtido  $5,35 \cdot 10^{-5}$ , valor este que é efectivamente pequeno.

### 5.3.2. Modelo Log-Normal

Uma variável aleatória continua  $x$  tem distribuição log-normal de probabilidade se a sua função densidade de probabilidade (FDP) for dada por:

$$X \sim N(\mu, \sigma) \Leftrightarrow (Y = e^X) \sim \text{LN}(\mu, \sigma) \quad (5.3)$$

$$f(y) = \frac{1}{y\sigma\sqrt{2\pi}} * \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(y) - \mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (5.4)$$

$$y > 0 \quad -\infty < \mu < \infty \quad \sigma > 0$$

Em que:

$$Y \sim \text{LN}(\mu, \sigma) \quad (5.5)$$

À semelhança do modelo Normal, os cálculos foram efectuados considerando duas situações: considerando a totalidade das amostras e considerando apenas as amostras do tabuleiro. Para o primeiro caso obteve-se uma média  $\mu = 3.90$  e o desvio padrão  $\sigma = 0.26$ , obtendo-se assim um valor de  $f_{ck} = 32.26$  MPa. Para o segundo caso, usando apenas as amostras do tabuleiro, obteve-se uma média  $\mu = 3.77$  e o desvio padrão  $\sigma = 0.05$ , obtendo-se assim um valor de  $f_{ck} = 39.98$  MPa.

Analisando os dois valores de  $f_{ck}$  obtidos considerando a totalidade das amostras e considerando apenas as amostras do tabuleiro, observa-se uma enorme diferença dos valores. À semelhança do que aconteceu usando o modelo normal, quando se usa a

totalidade das carotes obtém-se uma estimativa mais conservativa. Sendo assim o valor de  $f_{ck}$  calculado usando a distribuição Log-normal de probabilidade é  $f_{ck} = 32,26$  MPa.

A Figura 20 compara o modelo Normal e o modelo Log-normal com a mesma média e desvio padrão da amostra usada. Pela análise da Figura 20, observa-se que usando o modelo Normal a probabilidade de existirem valores da resistência à compressão muito baixos não seria inteiramente desprezável. Julga-se, por isso que, no presente caso, o modelo log-normal é mais adequado.

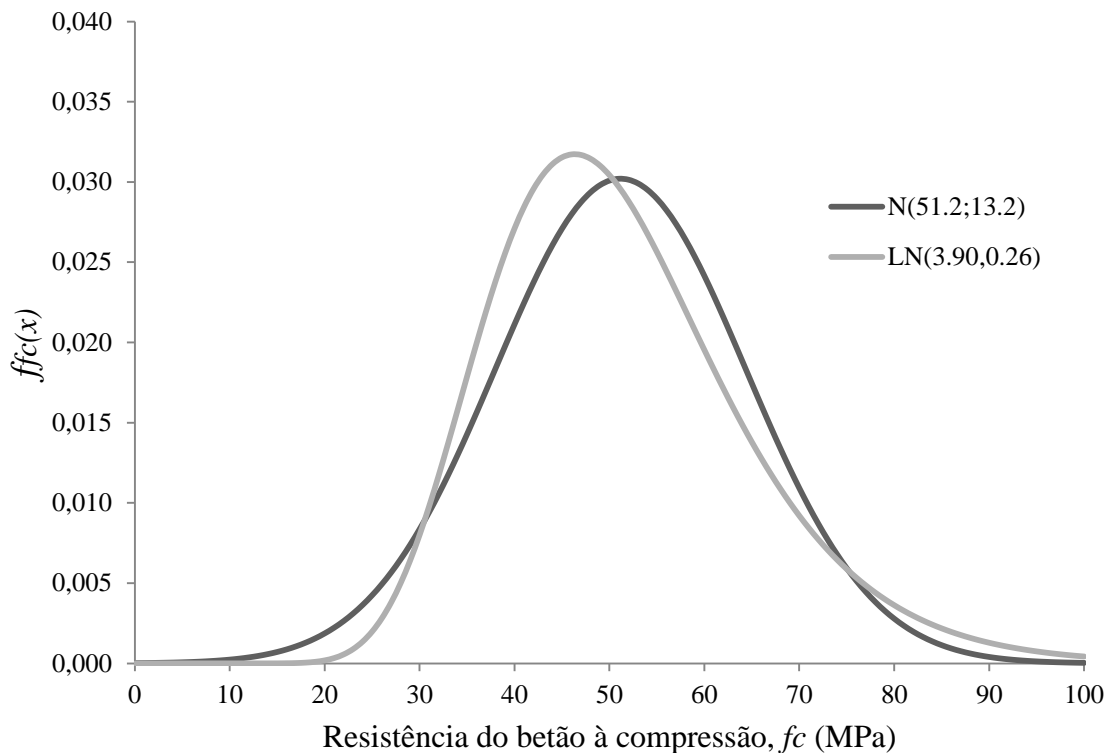


Figura 20 – Modelo Normal e Log-Normal da resistência do betão à compressão, com média e desvio padrão iguais aos da amostra usada

Sendo assim o valor do  $f_{ck}$  é 32.26 MPa usando o modelo log-normal e a totalidade das carotes.

É interessante comparar este valor (que resultou de simples considerações probabilísticas) com o valor que se obtém usando a norma NP EN 13791-2008. Para o estabelecimento da classe do betão, essa norma propõe duas abordagens: a Abordagem A e a Abordagem B [24].

A Abordagem A permite determinar a estimativa da resistência à compressão *in situ* característica da zona de ensaio quando estão disponíveis pelo menos 15 carotes. O valor  $f_{ck, is}$  é o menor valor de:

$$f_{ck, is} = f_{m(n), is} - k_2 \times s \quad (5.6)$$

Ou de

$$f_{ck, is} = f_{is, menor} + 4 \quad (5.7)$$

Onde

$s$  é o desvio padrão dos resultados dos ensaios ou  $2,0 \text{ N/mm}^2$  tomando-se o maior valor;

$k_2$  é dado em disposições nacionais, ou, se não for dado, é igual a 1,48.

A Abordagem B permite determinar a estimativa da resistência à compressão *in situ* característica da zona de ensaio quando estão disponíveis 3 a 14 carotes carotes. O valor  $f_{ck, is}$  é o menor valor de:

$$f_{ck, is} = f_{m(n), is} - k \quad (5.8)$$

Ou de

$$f_{ck, is} = f_{is, menor} + 4 \quad (5.9)$$

A margem  $k$  depende do número  $n$  de resultados de ensaio e o valor apropriado é seleccionado na Tabela 3 que se encontra na norma NP EN 13791-2008.

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

Tabela 3 – margem  $k$  [24]

A amostra retirada da ponte é constituída por nove carotes, optando-se assim pela Abordagem B. A seguir são apresentados os resultados obtidos:

$$f_{ck, is} = f_{m(n), is} - k = 51,2 - 6 = 45,2 \text{ N/mm}^2$$

Ou

$$f_{ck, is} = f_{is, menor} + 4 = 34,5 + 4 = 38,5 \text{ N/mm}^2$$

Escolhe-se o menor valor de  $f_{ck, is}$ , optando-se pelo valor de 38,5 N/mm<sup>2</sup>. A classe de resistência é obtida a partir da Tabela 4, utilizando a estimativa à compressão *in situ* característica. Este quadro apresenta os requisitos relativos à resistência mínima à compressão *in situ* característica em relação às classes de resistência da EN 206-1.

Classe de resistência à compressão da EN 206-1	Relação entre a resistência <i>in situ</i> característica e a resistência característica de provetes normalizados	Mínima resistência <i>in situ</i> 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

Tabela 4 – Mínima resistência à compressão *in situ* característica para as classes de resistência à compressão de EN 206-1[24]

A partir do quadro anterior, tendo um  $f_{ck} = 38,5 \text{ N/mm}^2$  estabelece-se uma classe de resistência à compressão C45/55.

Nota-se que o valor de  $f_{ck}$  obtido usando a norma NP EN 13791-2008 é superior ao valor obtido usando modelos probabilístico. Repara-se que a Abordagem B da norma não faz depender a estimativa de  $f_{ck}$  do desvio padrão da amostra, o que é uma importante limitação dessa abordagem.



## Capítulo 6. Conclusões

A elaboração deste trabalho teve como objectivo realçar a importância dos ensaios não destrutivos para a avaliação de pontes existentes, bem como o seu uso após a construção de uma ponte, por exemplo, para atestar perante o dono da obra (e o público em geral) a sua aptidão para entrada em serviço.

Tendo em vista atingir os objectivos acima descritos, dividiu-se os NDT em três grandes grupos: “Ensaaios de caracterização de resistências”, “Ensaaios de caracterização geométrica e detecção de defeitos” e “Ensaaios de carga”.

Nos ensaios de caracterização de resistências procurou-se mostrar as informações que estes podem fornecer relativamente à qualidade do betão. Para tal, fez-se uma descrição dos ensaios mais comuns usados na caracterização da resistência do betão, bem como os seus princípios físicos, limitações, vantagens e campos de aplicação.

Nos ensaios de caracterização geométrica e detecção de defeitos, à semelhança dos ensaios de caracterização de resistências, fez-se uma descrição dos ensaios mais comuns, destacando os seus princípios físicos, limitações, vantagens e campos de aplicação, realçando sempre a importância destes para a detecção de elementos constituintes do betão armado e para a detecção de possíveis descontinuidades.

Nos ensaios de carga, cujo objectivo é caracterizar o comportamento da estrutura como um todo, fez-se igualmente a descrição dos ensaios, os seus princípios físicos, limitações, vantagens e campos de aplicação.

Após ter feito a descrição dos ensaios mais usuais, mostrou-se a aplicação prática de um destes ensaios a um caso de estudo. No caso de estudo, fez-se a descrição de uma ponte onde foram realizados vários ensaios tendo por fim a avaliação da segurança da mesma. Sobre a ponte objecto de estudo foram efectuados vários ensaios entre os quais a extracção de carotes. Sobre estas carotes foram efectuados ensaios de resistência à compressão. Com os resultados obtidos do ensaio, mostrou-se de que forma pode-se estimar o valor de  $f_{ck}$  (valor característico da tensão de rotura do betão à compressão) usando modelos probabilísticos. Aplicou-se também as abordagens previstas na norma

NP EN 13791-2008 que permitem estimar o valor de  $f_{ck}$ . Como se viu a Abordagem B apresenta uma limitação importante pelo facto de não fazer intervir o desvio padrão da amostra de resistências.

Com o valor obtido através da norma NP EN 13791-2008 atribui-se uma classe de resistência do betão de C45/55.

**Bibliografia**

- [1] IAEA (International Atomic Energy Agency), "Guidebook on non-destructive testing of concrete structures," no. 17. 2002.
- [2] J. Newman and B. S. Choo, *Advanced Concrete Technology - Testing and Quality*. 2003, p. 313.
- [3] Tecnofix, "Catálogo Geral - N 03 - 09." .
- [4] "EN 12504-1:2000 - Testing concrete in structures - Cored specimens - Taking, examining and testing in compression." 2000.
- [5] "EN 12390-3:2002 - Testing hardener concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens," no. August. 2002.
- [6] J. H. Bungey, S. G. Millard, and M. G. Grantham, *Testing of Concrete in Structures, 4th edition*. Taylor & Francis Group, 2006.
- [7] "EN 12504-2 - Testing concrete in structures - Part 2: Non-destructive testing - Determination of rebound number." 2001.
- [8] BSI (British Standards Institution), "BS 1881 - Part 207: 1992 - Testing Concrete." London.
- [9] F. A. Branco and J. De Brito, *Handbook of Concrete Bridge Management*. Library of Congress, 2004, p. 468.
- [10] M. J. Ryall, *Bridge management*. 2001, p. 450.
- [11] Highways Agency, "Design Manual for Roads and Bridge - Volume 3 Part 7 - Advice Notes on the Non-Destructive Testing of Highway Structures," vol. 3, no. August 2006. 2006.
- [12] M. J. Sansalone and W. B. Streett, "The Impact-Echo Method," *NDT net*, vol. 3, 1998.
- [13] Luís V. Mendonça, "Termografia por Infravermelhos - Inspeção de betão," *Rev. Eng. Vida*, vol. 16, p. 16, 2005.
- [14] SKF, "Catálogo Endoscópio SKF da Série TKES 10." 2011.
- [15] N. J. Carino, *Nondestructive testing of concrete - History and Challenges*. 1994.
- [16] Samaris, "Sustainable and Advanced Materials for Road Infrastructure - Guidance for the optimal assessment of highway structures." 2006.
- [17] J. Rodrigues, "Identificação Modal Estocástica - Métodos de análise e aplicações em estruturas de engenharia civil," Universidade do Porto, 2004.

- 
- [18] K. Womack, M. Halling, and S. Bott, "Static and Dynamic Testing of a Girder Bridge in Salt Lake City, Utah," 2001.
- [19] P. Olaszek, M. Łagoda, and J. R. Casas, "Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance - Diagnostic Load testing and assessment of existing bridges: exemples of application," *Taylor & Francis Group*, no. April 2013, p. 10, 2013.
- [20] Fib, "Monitoring and safety evaluation of existing concrete structures." p. 304, 2003.
- [21] Paulo Cruz, D. Wiśniewski, and J. R. Casas, "Métodos de Avaliação da Segurança de Pontes Existentes," *Rev. Port. Eng. Estruturas*, p. 16.
- [22] L. A. do C. Jacinto, "Avaliação da segurança de pontes existentes - Abordagem Probabilística Bayesiana," Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade de Lisboa, 2011.
- [23] "Eurocódigo 2 - Projecto de estruturas de betão Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios." 2010.
- [24] "NP EN 13791-2008 - Avaliação da resistência do betão nas estruturas e em produtos prefabricados." 2008.
- [25] <http://www.engenhariapt.com/2011/03/01/ponte-vasco-da-gama/>

## **Anexos**

### EXEMPLOS DE EQUIPAMENTOS EXISTENTES NO MERCADO

**Tabela 1: Original Schmidt**

Original Schmidt

[www.proceq.com](http://www.proceq.com)

<b>Dados Técnicos</b>				
	Tipo N	Tipo NR	Tipo L	Tipo LR
Faixa de medição	10-70 N/mm <sup>2</sup> (1.450 a 10.152 psi)			
Energia de impacto	2,207 Nm		0,735 Nm	
Bobina de papel	Não	Sim	Não	Sim

Normas:

- ISO/DIS 8045
- EN 12 504-2
- ENV 206
- DIN 1048, parte 2
- BS 1881, parte 2
- ASTM C 805
- ASTM D 5873 (Rocha)
- NFP 18-417
- B 15-225
- JGJ/T 23-2001
- JJG 817-1993

**Tabela 2: Caroteadora SPIT SD 350E (3200W)**

Caroteadora SPIT SD 350E (3200W)

[www.tecofix.pt](http://www.tecofix.pt)

<b>Dados Técnicos</b>	
Potência	3.200W (arranque eléctrico)
Frequência	50-60 Hz
Rotação	1ª Velocidade 230RPM, 2ª Velocidade 500RPM, 3ª Velocidade 1.030RPM
Capacidade de Perfuração a Água	De $\phi 51$ a $\phi 350$ mm (recomendado até $\phi 300$ )
Encabadouro	1-1/4'' UNC
Peso	13,0 Kg
Utilização	Em Base

- Base recomendada: SDR 350 (17,0 Kg) para furos até  $\phi 350$ ;
- Equipada com dispositivo térmico para protecção contra sobreaquecimentos;
- Alimentação: 220V com terra, devidamente ligado;
- Sem ligação à terra o motor não arranca.

**Tabela 3: DY-2 Família**

DY-2 Família

[www.proceq.com](http://www.proceq.com)

<b>Dados Técnicos</b>	
<b>DY-2 Família</b>	
Máx. resistência à tensão	DY-206: 6 KN, 1349 lbf
	DY-216: 16 KN, 3597 lbf
	DY-225: 25 KN, 5620 lbf
Acurácia e resolução	EN ISSO 7500-1 Classe 1 ( $\pm 1\%$ de 20% da força máx.)
Capacidade de memória	100 medições
Capacidade de bateria	1500 mAh, 3.7V (mín. 80 medições)
Conexão do carregador Tipo	USB A (5V, 500 mA)
Peso	4.5 Kg
Dimensões da carcaça	109*240*205.5 mm
Temperatura operacional	-10 a 50°C (32 a 122°F)
Temperatura de armazenamento	-10 a 70°C (14 a 158°F)
<b>Dyna Estrich</b>	
Display	Em N/mm <sup>2</sup> com base em diâmetro. Disco de testes 50 mm
Força de tracção	Máx. 4.400 N (990 lbf)
Resistência de tracção	2,2 N/mm <sup>2</sup> (320 psi)
Precisão	< 3%
Curso de tracção	20 mm (0,79 in.)
Peso total	2,8 Kg (6 lbs; 3 oz)

**Tabela 4: Profometer 5+**

Profometer 5+

[www.proceq.com](http://www.proceq.com)

<b>Dados Técnicos</b>	
Memória	Memória não volátil par 40.000 valores medidos (160.000 com modelo SCANLOG) e 60 objectos, respectivamente
Display	LCD de 128*128 pixels com iluminação de fundo
Interface	RS 232 ou com adaptador para Porta USB no PC
Software	Software ProVista para fazer download dos dados e para avaliação no PC
Pilhas	6*1,5V para 45h de operação; 30h com iluminação de fundo acesa
<b>Faixa de medição</b>	
Temperatura operacional	0 °C a +60 °C
Temperatura de armazenamento	Intervalo menor até 100 mm (3,94 pol.)
Medição da profundidade	Intervalo maior até 185 mm (7,28 pol.)
Medição de diâmetro	Até 70 mm (2,76 pol.)

Normas:

- BS 1881 parte 204
- DIN 1045
- SN 505 262
- DGZfP B2 (recomendações)

**Tabela 5: Pundit Lab**

Pundit Lab

[www.proceq.com](http://www.proceq.com)

<b>Dados técnicos</b>	
Medição do tempo de trânsito	
Gama	0.1 – 9999 $\mu$ s
Resolução	0.1 $\mu$ s
Display	79 * 21 mm OLED de matriz passiva
Transmissor	Pulso de excitação otimizado 125V, 250V, 350V, 500V, AUTO
<b>Receptor</b>	
Passos de ganho seleccionáveis	1x, 10x, 100x, AUTO
Largura da banda	20 kHz – 500 kHz
Memória	Não volátil, > 500 leituras
Configurações regionais	Unidades métricas e imperiais suportadas
<b>Alimentação eléctrica</b>	
Pilha	4x pilhas AA (> 20 horas de uso contínuo)
Alimentação	5v, < 500mA via carregador USB
Computador	5v, < 500mA directamente via cabo USB
<b>Mecânica</b>	
Dimensões	172 x 55 x 220 mm
Peso	1.316 Kg (incluindo pilhas)
<b>Condições ambientais</b>	
Temperatura operacional	-10 a 60° (0 a 140°)
Humidade	<95% UR, sem condensação

**Tabela 6: GPR INTERRAGATOR EZ**

GPR INTERRATOR EZ

[www.vermeer.com](http://www.vermeer.com)

<b>Características gerais</b>	
Tipo	Conjunto de carro de lançamento de duas rodas/antena; roda codificadora
Dimensões	66 cm de comprimento x 48 cm de largura x 30 cm de altura
Altura de alavanca	Nominal 101,6 cm; ajustável
Peso	Aproximadamente 18 Kg com antena
<b>Operacional</b>	
Temperatura	-
Humidade	10% a 90 % sem condensação
Ambiental	A unidade de controlo é blindada como medida de protecção contra agressões do meio ambiente; pode ser usada em condições climáticas severas
Velocidade	Até 8 Km/h
<b>Antena</b>	
Antena	Antena de 400 MHz
Largura de pulso	2,5 ns
Taxa de transmissão	100 KHz
Dimensões	30 cm x 30 cm x 20 cm
Peso	10 lbs
<b>Software</b>	
Amostragem	512 amostras
Velocidade de leitura	100 leituras/s
Transferência de dados	Através de Micro Vault USB de 64 MB ou através de sincronização activa da microsoft
<b>Hardware</b>	
Processador	Processador StrongArm RISC da intel a 206 MHz
Mostrador	Visor de cristal liquido de cores vivas de matriz activa com 21,3 cm
Memória	512 MB de memória flash
Unidade externa de dados	USB Micro Vault de 64 MB

**Tabela 7: Flir E50**

Flir E50

[www.poupenergia.com](http://www.poupenergia.com)

<b>Características</b>	
Câmara visual - resolução	3.1 Megapixéis
Fusão <i>Picture in Picture</i> (PIP)	Exibe imagem térmica sobreposta a imagem visual correspondente
Precisão	Alta – 2%
Bateria	Recarregável de íões de lítio com duração de até 4 horas contínuas; substituível em campo
Mira laser	Marca na tela o local para onde o laser está apontado
Conectividade Wi-Fi	Envia imagens para dispositivos móveis para partilhar relatórios e informações críticas rapidamente
Correcção para janela IR	Ajustes no termovisor compensam a perda de transmissibilidade ao utilizar uma janela IR
Identificação do ponto Frio/Quente	Marca automaticamente na tela o ponto mais frio e o ponto mais quente
Sensibilidade térmica	0,005 °C a 25 °C
Resolução IR	240 x 180 (43.200 pixels)
Faixa de temperatura	-20 °C a 650 °C (-4 °F a 1202 °F)
Zoom	4x
Inclui	Cartão de memória, bateria recarregável, fonte de alimentação AC, cabo USB, alça de mão, protector de lente, mala rígida para transporte e software FLIR tools.

**Tabela 8: Endoscópio SKF da Série TKES 10F**

Endoscópio SKF da Série TKES 10F

[www.skf.com](http://www.skf.com)

<b>Dados técnicos</b>	
Tubo de inserção e fonte de iluminação	Tubo Flexível
Sensor de imagem	Sensor de imagem CMOS
Resolução (H x V)	Estática: 640 x 480 pixels
	Dinâmica: 320 x 240 pixels
Diâmetro do tamanho da ponta (tudo de inserção)	5,8 mm (0.23 pol.)
Comprimento do tubo	1m (39.4 pol.)
Campo de visão	67°
Profundidade do campo	1,5 – 6 cm (0.6 – 2.4 pol.)
Fonte de iluminação	4 LEDs ajustáveis brancos (0- 275 Lux/4 cm)
Temperatura operacional da sonda	-20 a + 60 °C (-4 a +140 °F)
Nível de protecção de entrada	IP 67

