

## **A UTILIZAÇÃO DE EQUIPAMENTO ULTRASSÓNICO NA CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE ELEMENTOS EM BETÃO ARMADO**

**Marco Antonio Santiago Abreu Filho**

*Dissertação apresentada no âmbito da obtenção do grau de Mestre em Engenharia da Construção no contexto do Programa de Dupla Diplomação entre o Instituto Politécnico de Bragança e a Universidade Salvador.*

Orientação:

**Prof. Doutora Eduarda Luso**

**Prof. Doutor Carlos Moreno**

Coorientação:

**Prof. Luciano Ferreira**

**Bragança  
2020**

Aos meus pais Marco e Silvia e  
à minha irmã Bianca.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço aos meus pais Silvia Abreu e Marco Abreu, que sempre me incentivaram e me apoiaram mesmo nos momentos mais difíceis e compreenderam minha ausência enquanto me dedicava à realização deste mestrado, na mesma proporção que, mesmo à distância, fizeram-se muito presentes nessa jornada.

Agradeço à minha irmã Bianca Abreu que sempre me incentivou e me encorajou a perseguir os meus sonhos por mais difíceis que fossem de alcançar.

Agradeço aos meus orientadores Professora Doutora Eduarda Luso e Professor Doutor Carlos Moreno por toda a dedicação e empenho que demonstraram ao longo do desenvolvimento deste trabalho, por toda a confiança que depositaram em mim e por compartilharem seu conhecimentos e experiências que foram de imensurável valor para que eu pudesse me desenvolver e aperfeiçoar os meus próprios conhecimentos.

Agradeço ao meu coorientador Professor Luciano Ferreira pelo seu apoio e dedicação.

Agradeço à equipe do Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Politécnico de Bragança, Sr. João Augusto e Sr. Octávio Manuel, por toda a colaboração prestada.

Agradeço a Heloísa Diniz por todo o apoio emocional e intelectual, pelo companheirismo, incentivo e por ter estado ao meu lado em todos os momentos dessa jornada, tornando-a menos árdua.

Agradeço aos bons e velhos amigos que sempre estiveram comigo e me apoiaram mesmo à distância, em especial, Matheus, Gabriel, Rafael e Alberto.

Por fim, agradeço as novas amizades que cultivei em Portugal, em especial, Lucas, Diogo, Bernardo e Ricardo.

## RESUMO

Devido à grande importância do betão e do betão armado na construção civil, o mercado e a indústria tiveram a necessidade técnica e económica, de desenvolver e aprimorar técnicas e ensaios para caracterização do mesmo. Os tipos de ensaios podem ser divididos entre os destrutivos, que geram danos que inutilizam completamente ou parcialmente a peça ou o elemento objeto de estudo, os não destrutivos, que não geram danos, ou geram danos insignificantes que podem ser reparados após os ensaios, e os parcialmente destrutivos, que consistem em retirar uma pequena amostra de uma estrutura existente, para realizar ensaios laboratoriais, sem comprometer a e posteriormente repará-la. Grande parte dos ensaios destrutivos é conduzida utilizando provetes recolhidos durante a betonagem, o que inviabiliza a sua utilização no caso de inspeções e diagnóstico em estruturas de betão já existentes. Os ensaios não destrutivos, realizados “*in situ*”, surgem então como importante opção para atestar e certificar a qualidade e especificações dos materiais. O ensaio do ultrassom foi um dos métodos não destrutivos que teve muita evolução e ganhou espaço no mercado nos últimos anos. O presente estudo pretende, com o auxílio de um equipamento ultrassónico atual do tipo scanner, avaliar a precisão e as capacidades com vista à caracterização mecânica de elementos em betão e betão armado. De entre as caracterizações pretende-se estimar o módulo de elasticidade e a resistência à compressão, avaliar a uniformidade das peças, bem como identificar armaduras.

**Palavras-chave:** betão; betão armado; ultrassom; ensaio não destrutivo.

## ABSTRACT

Due to the great importance of concrete and reinforced concrete in construction, the market and industry had the technical and economic need to develop and improve techniques and tests for its characterization. The types of tests can be divided between destructive, which totally or partially destroys the element under study, non-destructive, which do not generate damage, or generate insignificant damage to be repaired after testing, or minor destructive, which consist in remove a small sample from an existing structure, to perform laboratory tests, without compromise the structure integrity and then repair the damage. Much of the testing in the construction industry is usually done with specimens collected during concreting, consequently, these methods are impracticable in case of inspections and diagnosis an existing concrete structure. Non-destructive testing, performed “*in situ*”, come as an important option to certify and ensure the quality and specifications of materials. The ultrasonic method was one of the non-destructive testing that has developed the more and gained market share in recent years. With the use of a modern ultrasonic equipment scanner type, this study aims to verify the accuracy and capabilities of this method in order to perform the mechanical characterization of concrete and reinforced concrete elements. Among the characterizations it is intended to estimate the modulus of elasticity and the compressive strength, to evaluate the uniformity in concrete elements and to identify reinforcement bars.

**Keywords:** concrete; reinforced concrete; ultrasound; non-destructive testing.

## ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS .....	iii
LISTA DE TABELAS .....	v
LISTA DE GRÁFICOS .....	vi
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Contextualização.....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.3. Estrutura da tese .....	2
2. GENERALIDADES DO BETÃO.....	5
2.1. Qualidade e resistência.....	5
2.1.1. Cimento .....	6
2.1.2. Agregados .....	7
2.1.3. Água .....	8
2.1.4. Adjuvantes e adições.....	10
2.1.5. Colocação e compactação .....	11
2.1.6. Cura.....	11
2.2. Controle e conformidade.....	12
3. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS .....	15
3.1. Método do martelo de Schmidt ou do esclerómetro.....	16
3.2. Método de arrancamento “pull-off” .....	17
3.3. Método de arrancamento “pull-out” .....	19
3.4. Utilização dos ensaios não destrutivos em conjunto com os destrutivos .....	21
4. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS PELA TÉCNICA DE ULTRASSONS.....	23
4.1. Funcionamento do ensaio .....	24
4.1.1. Tipos de medição.....	25
4.2. Aplicações no betão.....	28
4.2.1. Qualidade .....	29
4.2.2. Uniformidade .....	29
4.2.3. Profundidade de fendas .....	30
4.2.4. Módulo de elasticidade .....	31
4.2.5. Resistência à compressão.....	32
4.3. Fatores que influenciam os resultados .....	34

4.3.1. Agregados .....	35
4.3.2. Tipo do cimento .....	36
4.3.3. Temperatura .....	36
4.3.4. Teor de humidade.....	37
4.3.5 Varões de aço .....	37
4.4. Aparelho ultrassónico tipo scanner.....	38
4.4.1. Funcionamento .....	39
4.4.2. Aplicações .....	40
4.4.3. B-Scan .....	40
4.4.4. Vantagens e desvantagens.....	41
5. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	43
5.1. Materiais utilizados.....	44
5.2. Equipamentos utilizados .....	45
5.3 Metodologia.....	46
5.3.1. Provetes .....	46
5.3.2. Ensaios de ultrassom .....	49
5.3.3. Ensaio de arrancamento “pull-off”.....	53
5.3.4. Ensaio do esclerómetro .....	55
5.3.5. Ensaio de compressão .....	55
6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	57
6.1. Provetes cúbicos de betão simples.....	57
6.2. Provetes prismáticos de betão simples.....	68
6.3. Provetes cúbicos de betão armado .....	74
6.4. Provetes cilíndricos de calda de injeção .....	79
7. CONCLUSÕES .....	81
7.1. Sugestões para trabalhos futuros.....	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	83

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Influência da máxima dimensão do agregado sobre a resistência do betão.....	8
Figura 2 - Relação entre a resistência do betão e a razão água/cimento. ....	9
Figura 3 - Influência das condições de cura sobre a resistência à compressão do betão.	12
Figura 4 - Representação esquemática de um ensaio de compressão.....	13
Figura 5 - Ensaio do esclerómetro.....	17
Figura 6 - Ensaio "pull-off". ....	18
Figura 7 - Método de arrancamento desenvolvido por Volf. ....	19
Figura 8 - Método de arrancamento "pull-out". ....	20
Figura 9 - Exemplo de curva de correlação. ....	21
Figura 10 - Esquema de funcionamento do aparelho ultrassónico.....	23
Figura 11 - Aparelho ultrassónico. ....	24
Figura 12 - Tipos de ondas geradas em um sólido e direção do deslocamento.....	25
Figura 13 - Transmissão direta. ....	26
Figura 14 - Transmissão semi-direta. ....	26
Figura 15 - Transmissão indireta.....	27
Figura 16 - Medições consecutivas para a transmissão indireta.....	27
Figura 17 - Reta para a determinação da velocidade de pulso usando transmissão indireta .....	28
Figura 18 – Método para determinar espessura de diferente qualidade do betão.....	30
Figura 19 - Método para estimar profundidade de fendas.....	31
Figura 20 - Influência das proporções de agregado e cimento na velocidade do pulso.	35
Figura 21 - Varões de aço transversais ao percurso do pulso.....	38
Figura 22 - Varões de aço longitudinais ao percurso do pulso.....	38
Figura 23 - Ultrassom do tipo scanner. ....	39
Figura 24 - Esquema de funcionamento do ultrassom tipo scanner.....	39
Figura 25 - Esquema da realização de um B-Scan. ....	41
Figura 26 - Equipamento ultrassónico Pundit PL-200PE.....	45
Figura 27 - Equipamento DY-216 para ensaio de “pull-off”. ....	45
Figura 28 - Martelo de teste de betão modelo NR.....	45
Figura 29 - Máquina de compressão. ....	46
Figura 30 - Representação dos provetes cúbicos e primas de betão simples. ....	46
Figura 31 - Representação dos provetes de betão armado.....	47

Figura 32 - Representação dos provetes prismáticos após o corte. ....	48
Figura 33 - Representação das medições com equipamento ultrassónico em provetes cúbicos de betão simples. ....	49
Figura 34 - Representação da verificação rápida de uniformidade dos provetes prismáticos com equipamento ultrassónico. ....	50
Figura 35 - Representação de medições de velocidade de pulso nos provetes prismáticos para verificação de uniformidade prevendo os futuros cortes. ....	51
Figura 36 - Representação do tipo de medição B-Scan e imagem transversal gerada do provete BA1. ....	52
Figura 37 - Resultado de análise realizada com o software MATLAB para o provete BA1 .....	52
Figura 38 - Representação das medições com equipamento ultrassónico em provetes cilíndricos de calda de injeção. ....	53
Figura 39 - Representação da preparação do ensaio de arrancamento "pull-off" .....	54
Figura 40 - Detalhamento do ensaio "pull-off". ....	54
Figura 41 - Curva de conversão do ensaio do esclerómetro considerando o ângulo da realização do ensaio. ....	55
Figura 42 - Representação esquemática e gráfica do ensaio de uniformidade pelo método do ultrassom nos provetes prismáticos. ....	69
Figura 43 - B-Scan do provete BA1. ....	74
Figura 44 - Resultado de análise realizada com o software MATLAB para o B-Scan do provete BA1. ....	75
Figura 45 - B-Scan do provete BA2. ....	75
Figura 46 - Resultado de análise realizada com o software MATLAB para o B-Scan do provete BA2. ....	76
Figura 47 - B-Scan do provete BA3. ....	76
Figura 48 - Resultado de análise realizada com o software MATLAB para o B-Scan do provete BA3. ....	77
Figura 49 - Segunda análise do B-Scan do provete BA3. ....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos mecânicos e físicos especificados para cada classe de resistência de cimento. ....	7
Tabela 2 - Técnicas não destrutivas e suas aplicações para caracterização do betão.....	15
Tabela 3 - Relação entre a velocidade do pulso e a qualidade do betão.....	29
Tabela 4 - Valores de s de acordo com o tipo de cimento.....	33
Tabela 5 - Intervalos de velocidades do pulso ultrassônicos expectáveis para alguns tipos de rocha.....	36
Tabela 6 - Correção da velocidade de pulso de acordo com a temperatura. ....	37
Tabela 7 - Proporções, em massa, utilizadas para as produções de betão. ....	47
Tabela 8 - Medições provetes cúbicos na idade de 28 dias e valores mais representativos .....	57
Tabela 9 - Trecho do quadro 3.1 do Eurocódigo 2.....	58
Tabela 10 - Módulo de elasticidade e resistência à compressão dos provetes cúbicos estimados pela velocidade de pulso ultrassônico, resistência à compressão pelo ensaio destrutivo e respetivos erros. ....	59
Tabela 11 - Módulo de elasticidade e resistência à compressão dos provetes cúbicos estimados pela velocidade de pulso ultrassônico para as idades de 3 e 7 dias.....	63
Tabela 12 - Módulo de elasticidade e resistência à compressão dos provetes cúbicos estimados pela velocidade de pulso ultrassônico para as idades de 14 e 21 dias.....	64
Tabela 13 - Resultados da verificação rápida da uniformidade dos provetes prismáticos. ....	68
Tabela 14 - Resistência à compressão dos trechos do provetes prismáticos estimada pela velocidade de pulso ultrassônico, resistência à compressão pelo ensaio destrutivo e respetivos erros.....	70
Tabela 15 - Resistência à compressão dos trechos do provetes prismáticos estimada pelo ensaio “pull-off”, resistência à compressão pelo ensaio destrutivo e respetivos erros...	71
Tabela 16 - Resistência à compressão dos trechos do provetes prismáticos estimada pelo ensaio do esclerómetro, resistência à compressão pelo ensaio destrutivo e respetivos erros. ....	73
Tabela 17 - Resistência à compressão dos provetes de betão armado estimada pela velocidade de pulso ultrassônico, obtida pelo ensaio destrutivo e respetivos erros.....	78
Tabela 18 - Velocidade de pulso e resistência à compressão dos provetes cilíndricos. .	79

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Correlação linear para o traço T1.....	60
Gráfico 2 - Correlação linear para o traço T2.....	61
Gráfico 3 - Correlação linear para o traço T3.....	61
Gráfico 4 - Evolução da resistência do provete C1-T1. ....	65
Gráfico 5 - Evolução da resistência do provete C2-T1. ....	65
Gráfico 6 - Evolução da resistência do provete C3-T1. ....	65
Gráfico 7 - Evolução da resistência do provete C4-T1. ....	65
Gráfico 8 - Evolução da resistência do provete C5-T1. ....	65
Gráfico 9 - Evolução da resistência do provete C6-T1. ....	65
Gráfico 10 - Evolução da resistência do provete C1-T2. ....	66
Gráfico 11 - Evolução da resistência do provete C2-T2. ....	66
Gráfico 12 - Evolução da resistência do provete C3-T2. ....	66
Gráfico 13 - Evolução da resistência do provete C4-T2. ....	66
Gráfico 14 - Evolução da resistência do provete C5-T2. ....	66
Gráfico 15 - Evolução da resistência do provete C6-T2. ....	66
Gráfico 16 - Evolução da resistência do provete C1-T3. ....	67
Gráfico 17 - Evolução da resistência do provete C2-T3. ....	67
Gráfico 18 - Evolução da resistência do provete C3-T3. ....	67
Gráfico 19 - Evolução da resistência do provete C4-T3. ....	67
Gráfico 20 - Evolução da resistência do provete C5-T3. ....	67
Gráfico 21 - Evolução da resistência do provete C6-T3. ....	67
Gráfico 22 - Correlação linear do ensaio "pull-off". ....	72
Gráfico 23 - Correlação linear do ensaio do esclerómetro. ....	73
Gráfico 24 - Correlação linear do ensaio de ultrassom para os provetes de calda de injeção .....	80

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Contextualização

A utilização do betão como material de construção teve início há milhares de anos, sendo obtido pela mistura de cascalho, areia, água e um ligante hidráulico (cimento) [1, 2]. No ano de 1830 apareceram as primeiras referências ao betão armado, que pode ser definido como uma ligação solidária de uma estrutura resistente à tração (aço) com o betão, e desde a sua descoberta seu uso pôde ser desenvolvido, aperfeiçoado e disseminado de forma que, atualmente, é o material mais utilizado como estruturas de edificações, passagens pedonais, viadutos, pontes, etc. [3, 4].

Os materiais de construção, como o betão armado, podem ser definidos como sendo elementos de naturezas diversas, que são utilizados e confeccionados a fim de que desempenhem um papel específico e previsível, de forma que possa garantir o comportamento de uma construção destinada a um determinado fim [5].

Com a necessidade de garantir e verificar a aplicação adequada dos materiais de construção, assim como a conformidade e atendimentos as especificações de projeto de uma edificação ou empreendimento, o controle tecnológico surge como importante ferramenta na engenharia civil. Como um dos seus principais instrumentos para poder assegurar que cada elemento de uma construção desempenhará seu papel corretamente temos a caracterização tecnológica [5, 6].

A caracterização tecnológica de um material trata-se de poder perceber como será o seu comportamento quando submetido a solicitações de esforços, entender suas propriedades decorrentes da sua natureza, ou seja, intrínsecas a ele, e compreender os requisitos técnicos que deverá atender para cumprir as funções que deverá desempenhar [5].

Devido à grande importância do betão armado na construção civil, o mercado e a indústria tiveram a necessidade, técnica e económica, de desenvolver e aprimorar técnicas e ensaios para caracterização do mesmo [7]. Quanto aos tipos de ensaios temos os destrutivos, que geram danos que inutilizam completamente ou parcialmente a peça ou o elemento objeto de estudo, os não destrutivos, que não geram danos, ou geram danos insignificantes que podem ser reparados após os ensaios, e os parcialmente destrutivos, que consistem em retirar uma pequena amostra de uma estrutura existente, para realizar ensaios laboratoriais, sem comprometê-la e posteriormente repará-la [8, 9].

Durante a execução de uma obra é comum recolher uma amostra dos materiais empregados na construção para então realizar ensaios em laboratório, ou no próprio sítio da construção, empregando-se, neste caso, os métodos de ensaios destrutivos para caracterizar o betão [6, 7].

Os provetes recolhidos durante a betonagem podem não representar a realidade do betão efetivo na obra devido estes terem um controle e condições diferentes quanto a compactação, cura e lançamento [7, 9]. Os ensaios não destrutivos, realizados no sítio da construção, surgem então como importante método para atestar e certificar a qualidade e especificações dos materiais [10].

Os métodos não destrutivos também são pertinentes e aplicáveis para a caracterização e diagnóstico de estruturas existentes. Devido à sua característica inerente de serem não invasivos e por isso considerados uma forma de viabilizar a análise e o exame de estruturas, nos últimos anos houve diversas tentativas para desenvolver esses métodos que hoje já apresentam eficiência em realizar diagnósticos [10, 11].

Tendo suas primeiras citações na década de 40, o ultrassom foi um dos métodos de ensaio não destrutivo que teve muita evolução e ganhou espaço no mercado nos últimos anos [9, 12]. Esse estudo pretende, com o auxílio de um equipamento ultrassónico atual tipo scanner, nortear a precisão e as capacidades desse método de realizar a caracterização mecânica de elementos em betão armado.

## **1.2. Objetivos**

Os objetivos principais deste trabalho são:

- Estimar resistência à compressão de elementos de betão com equipamento ultrassónico;
- Localizar armaduras em elementos de betão armado com equipamento ultrassónico;
- Verificar a uniformidade em peças de betão com equipamento ultrassónico.

## **1.3. Estrutura da tese**

Este trabalho está dividido em sete capítulos, sendo o primeiro uma contextualização geral das temáticas a serem desenvolvidas.

No capítulo 2 é abordado o betão de forma generalizada, seus constituintes, composição, fatores que influenciam na sua qualidade e resistência, critério de classificação e controlo de conformidade.

No capítulo 3 são introduzidos e apresentados os principais métodos de ensaio não destrutivos utilizados na indústria da construção, com maior enfoque naqueles destinados a estimar a resistência à compressão do betão.

No capítulo 4 é trabalhado de forma detalhada o método de ensaio do ultrassom, seu funcionamento, suas aplicações, os fatores que influenciam nos resultados e por fim é introduzido o aparelho ultrassónico tipo scanner e seu princípio de funcionamento que difere dos aparelhos convencionais.

No capítulo 5 é descrito todo o programa experimental, como se desenvolveu, quais os materiais que foram utilizados, quais os equipamentos que foram utilizados, os ensaios que foram realizados e todos os procedimentos adotados.

No capítulo 6 são apresentados e discutidos todos os resultados obtidos no programa experimental e, por fim, o capítulo 7 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.



## **2. GENERALIDADES DO BETÃO**

O betão pode ser definido como sendo um material compósito, tendo uma fase contínua denominada matriz, obtida pela mistura de um ligante hidráulico e água (aglomerante), e uma fase dispersa formada por materiais granulares (agregados) [13].

O ligante hidráulico frequentemente utilizado é o cimento, principal aglomerante empregado na indústria da construção. Trata-se de um material que ao ser misturado com água atinge um estado plástico de alta trabalhabilidade, permitindo que possa ser moldado em formatos variados até que as reações de hidratação façam com que este endureça e se torne rígido, de forma que não seja mais deformável e adquira resistência [2, 14].

Os materiais granulares que compõem a fase dispersa do betão podem ser divididos entre agregados miúdos, como a areia, e agregados graúdos, como material britado ou seixos rolados [15]. Os agregados representam a maior fração volumétrica do betão, servindo como material de enchimento para reduzir custos de produção, mas além disso também contribuem para aumentar a resistência e durabilidade da mistura e têm a importante função de minimizar a variação volumétrica causada pelas reações de hidratação e secagem do ligante hidráulico [2].

Para completar a composição, ainda podem ser incorporados adjuvantes em pequenas quantidades ou adições no betão, que têm por objetivo modificar ou melhorar determinadas propriedades quer no estado fresco como no estado endurecido, como por exemplo a plasticidade e trabalhabilidade, e aumentar ou diminuir o tempo de presa [14].

O betão apresenta uma grande variedade de constituintes e as diversas possibilidades de combinações entre eles resultam em diferentes propriedades e características do produto final, a exemplo da resistência à compressão que pode ser de apenas 0,5 MPa ou chegar a ser superior a 800 MPa [2].

A versatilidade de características que o betão pode apresentar, unida aos custos dos materiais constituintes que em geral são inferiores às demais alternativas, e às peças poderem ser moldadas nas mais variadas formas e tamanhos, contribui para tornar este o material de construção mais utilizado no mundo [15].

### **2.1. Qualidade e resistência**

O betão poder-se-á observar uma grande variabilidade de características, devido às proporções e propriedades dos seus constituintes. A composição de um betão deverá

ser definida de acordo com os requisitos que se pretende atender para cada caso específico de aplicação [2]. Para um betão ser considerado de qualidade este deve atender a critérios relacionados ao seu estado fresco e ao seu estado endurecido [16].

No estado fresco, o betão deve apresentar uma consistência que permita o seu adensamento adequado e uma coesão suficiente para que não haja segregação dos constituintes durante o seu transporte e lançamento. No estado endurecido, o betão deverá apresentar uma resistência à compressão adequada aos esforços a que será submetido e também uma durabilidade satisfatória [16].

Para se adquirir um betão que atenda às especificações de projeto, e que apresente um custo adequado, tornando uma solução estrutural vantajosa, deve-se entender como os constituintes e as condições de colocação, compactação e cura influenciam o comportamento da mistura. Este entendimento deve ser principalmente em relação à resistência à compressão, o principal fator ligado à qualidade do betão [2, 15].

#### 2.1.1. Cimento

Atualmente, há uma grande diversidade de tipos de cimentos disponíveis no mercado, e a sua escolha deve ser pensada de acordo com sua futura aplicação tendo em vista o tipo de estrutura, as dimensões das peças, as condições ambientais e as necessidades relacionadas às condições de obra [15, 17].

A norma NP EN 197-1 [18] versão portuguesa da Norma Europeia EN 197-1:2000, define os requisitos mecânicos, físicos, químicos e de durabilidade que devem ser respeitados para que um cimento seja certificado [2].

Na Tabela 1 é possível observar os requisitos físicos e mecânicos para as três classes de resistência de referência: classe 32,5, classe 42,5 e classe 52,5. São consideradas duas classes de resistência nos primeiros dias para cada classe de resistência de referência: uma indicada por N, resistência normal, e uma indicada por R, resistência elevada [18].

Observando na Tabela 1 as classes de resistência de referência e seus tempos de presa, é possível dizer que os cimentos de classe 52,5 atingem resistências mecânicas mais elevadas em um menor espaço de tempo. Desta forma, estes seriam uma melhor opção em casos de projetos que apresentem grandes vãos, como pontes, ou para pré-fabricados, enquanto as classes 32,5 e 42,5 seriam mais indicados para obras correntes [17].

**Tabela 1 - Requisitos mecânicos e físicos especificados para cada classe de resistência de cimento.**

Classe de resistência	Resistência à compressão			Tempo de início de presa	Expansibilidade
	MPa				
	Resistência nos primeiros dias	Resistência de referência			
2 dias	7 dias	28 dias	min	mm	
32,5 N	-	$\geq 16,0$	$\geq 32,5$ $\leq 52,5$	$\geq 75$	
32,5 R	$\geq 10,0$	-			
42,5 N	$\geq 10,0$	-	$\geq 42,5$ $\leq 62,5$	$\geq 60$	$\leq 10$
42,5 R	$\geq 10,0$	-			
52,5 N	$\geq 10,0$	-	$\geq 52,5$ -	$\geq 45$	
52,5 R	$\geq 10,0$	-			

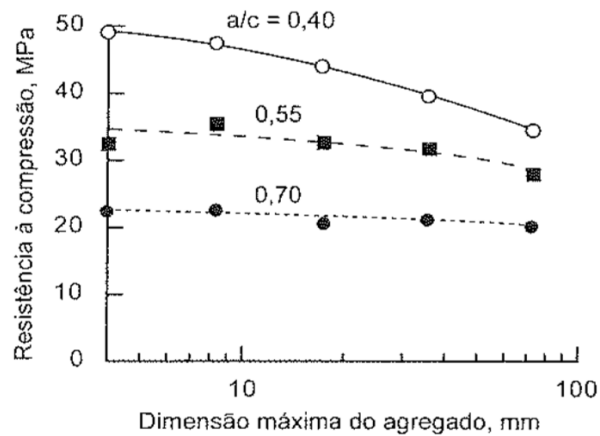
Fonte: NP EN 197-1 [18].

### 2.1.2. Agregados

Os agregados representam grande parte do volume do betão, cerca de 60% a 78%, e suas características influenciam diretamente a qualidade e as propriedades da mistura [2]. Dada a sua importância é relevante compreender como estes atuam na mistura, sabendo que a escolha inadequada pode gerar problemas técnicos e económicos [19].

As características minerais, geométricas e a textura afetam as propriedades do betão, tanto no estado endurecido quanto no estado fresco [2]. A textura do agregado irá interferir basicamente na aderência com a pasta cimentícia e, assim como a forma, influenciará diretamente a resistência à compressão, especialmente nas primeiras idades do betão. Um betão com agregados mais rugosos tende a ser mais resistente em relação a um com agregados de superfície lisa, considerando a mesma mineralogia [20].

A granulometria do agregado é outro fator que possui efeito sobre a resistência à compressão do betão [19]. Uma maior dimensão máxima do agregado tende a resultar em uma menor resistência, pois partículas maiores são mais propícias a gerar microfissuras nas zonas de transição entre a pasta e o agregado [21]. Esse comportamento pode ser visto na Figura 1 para diferentes razões água/cimento.



**Figura 1 - Influência da máxima dimensão do agregado sobre a resistência do betão.**

Fonte: METHA e MONTEIRO, 2008 [21].

Contudo, para uma maior dimensão máxima do agregado, mantendo o teor de cimento e a mesma consistência do betão, seria necessária uma menor quantidade de água de amassadura. Dessa forma, o aumento da dimensão máxima do agregado poderia possibilitar uma menor razão água/cimento ( $a/c$ ), implicando uma maior resistência à compressão do betão [19].

A natureza e as características minerais dos agregados também afetam outras propriedades físicas do betão endurecido, como a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. A deformação da mistura, movimentos de expansão e retração, pode ser condicionada pela possibilidade de deformação e porosidade dos agregados [2].

### 2.1.3. Água

A água é um importante fator na composição do betão, pois tem a função de hidratar o ligante hidráulico, iniciando as reações químicas que levarão ao endurecimento e ganho de resistência da mistura. A quantidade de água presente na mistura deve ser o suficiente para proporcionar a trabalhabilidade e colocação em obra, mas não pode ser em excesso para não prejudicar a coesão de forma que haja a segregação dos constituintes [17].

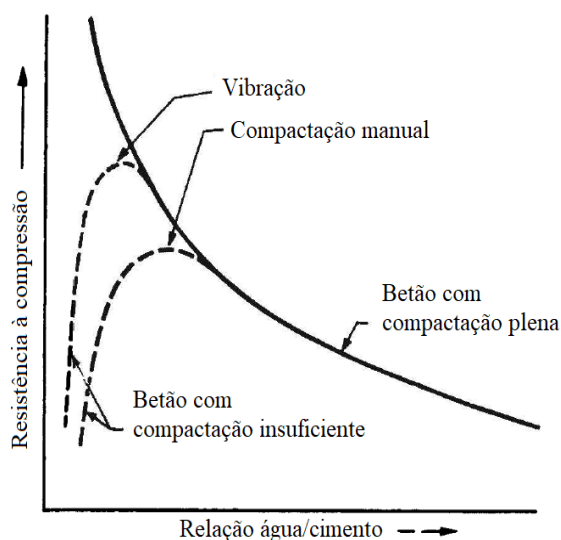
Outro problema relacionado a um elevado teor de água na mistura seria a formação de uma rede de poros ocasionados pela evaporação da água excedente, o que prejudicaria a resistência do betão assim como a sua durabilidade, pois elevaria o seu índice de vazios [2].

A quantidade de água utilizada na amassadura do betão, incluindo a humidade própria dos agregados, é denominada água de amassadura [17]. Um fator importante a se avaliar é a qualidade da água, pois eventuais impurezas podem prejudicar o tempo de pressa, a resistência final do betão e no caso de haver cloretos ainda pode corroer a armadura do betão armado [21]. A norma NP EN 1008 [22] define que se a água for potável é adequada para a produção do betão, enquanto águas de outras origens devem ser avaliadas de acordo com os procedimentos disponíveis nessa norma.

A razão água/cimento, volume de água pelo volume de cimento, influencia diretamente a resistência do betão. Para um betão plenamente compactado, pode afirmar-se que quanto maior a razão a/c, menor será a resistência. Em 1919, o investigador americano Duff Abrams estabeleceu uma relação entre a razão a/c e a resistência à compressão, expressa pela Equação 1 [20].

$$f_c = \frac{K_1}{K_2^{a/c}} \quad (1)$$

Na equação anterior,  $f_c$  é o valor da resistência do betão expressa em MPa e  $K_1$  e  $K_2$  são constantes empíricas. Na Figura 2 é possível observar o comportamento da variação da resistência com a razão água/cimento, para um betão plenamente compactado.



**Figura 2 - Relação entre a resistência do betão e a razão água/cimento.**

Fonte: Adaptado de NEVILLE, 2016 [20].

#### 2.1.4. Adjuvantes e adições

Adjuvantes são, em sua maioria, produtos químicos que são adicionados ao betão durante a amassadura em quantidades não superiores a 5% em relação à massa do cimento. Estes produtos têm por finalidade alterar ou melhorar propriedades específicas do betão em seus estados fresco ou endurecido [20].

Existe uma enorme variedade de adjuvantes disponíveis no mercado. Os principais fins para que se destinam são retardar ou acelerar a presa e o endurecimento, reduzir a permeabilidade, inibir a corrosão da armadura, elevar a resistência ao desgaste, reduzir o teor de água, aumentar a plasticidade, entre outros [17].

É importante salientar que se for utilizado mais de um adjuvante em simultâneo, deve-se primeiro verificar, através de ensaios, a compatibilidade entre eles. Um erro na dosagem ou a utilização de adjuvantes incompatíveis pode produzir o efeito contrário ao esperado. Para evitar que existam zonas com quantidades desproporcionais de adjuvantes, a mistura aos quais serão adicionados deve ser homogénea [17].

As adições são, basicamente, todos os constituintes do betão que não seja cimento, agregado, água ou adjuvante [17]. Estes materiais têm por objetivo melhorar determinadas propriedades da mistura ou permitir que o betão alcance propriedades especiais. As adições podem ser do tipo I, quase inertes, ou do tipo II, pozolânicas ou com características hidráulicas latentes [2].

Como exemplo de adições do tipo I é possível citar os pigmentos, cuja função é atribuir cor ao betão, e o filler calcário, este muito comum em Portugal, que é capaz de diminuir a porosidade aumentando a compacidade da pasta [2]. Das adições do tipo II pode-se citar o metacaulino e a sílica activa que diminuem a permeabilidade e aumentam a resistência do betão [17].

Tratando-se ainda do tipo II, as adições de pozolanas naturais e filler são capazes de diminuir a permeabilidade e porosidade do betão, tornando-o mais resistente aos sulfatos e melhorando a sua durabilidade. As adições também podem representar benefícios ambientais, e económicos, como por exemplo as cinzas volantes e as escórias de alto forno, resíduos e subprodutos industriais, que podem ser incorporados ao betão melhorando suas características e dando um destino a esses resíduos [2, 17].

### 2.1.5. Colocação e compactação

As propriedades e proporções dos constituintes não são os únicos fatores que irão definir a qualidade do betão no seu estado endurecido [20]. As etapas de colocação e compactação contribuem significativamente para a porosidade e, conseqüentemente, para a resistência do produto final [23].

Uma colocação do betão mal executada poderá acarretar na segregação dos constituintes, de forma que a peça apresente variabilidade de propriedades e um elevado índice de vazios, tornando-a estruturalmente inadequada e de baixa qualidade [20].

Imediatamente após, e também durante a colocação, inicia-se a operação de compactação do betão, esse processo pode ser manual ou mecânico e tem por objetivo tornar a mistura o mais densa possível. A compactação deve ser feita de forma a eliminar o ar, diminuindo o índice de vazios, e o excesso de água no interior do betão [20, 23].

Apesar da importância de uma compactação bem executada, deve-se ter cuidado para não fazer em demasia, dado que o excesso de vibração pode gerar a segregação da mistura [16].

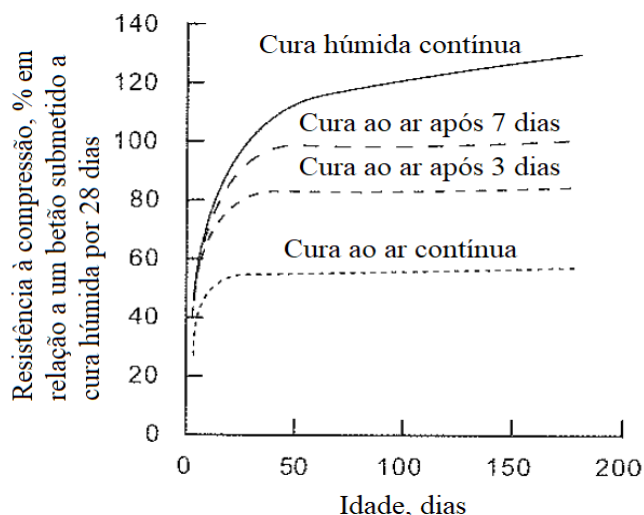
### 2.1.6. Cura

A cura é a última operação relacionada com a produção e aplicação do betão e tem significativo impacto na qualidade e resistência da mistura. Esse procedimento tem por objetivo manter o betão saturado para que as reações de hidratação não sejam interrompidas, permitindo que a mistura continue ganhando resistência [2, 20].

Especialmente nos primeiros dias, ou idades jovens do betão, o procedimento de cura evita a retração plástica e minimiza o surgimento de fissuras e trincas, principalmente na zona superficial [5].

Além dos efeitos visíveis, como a fissuração da superfície do betão, a não realização da cura ainda gera um aumento na porosidade. Essa porosidade reduz a resistência aos sulfatos, e conseqüentemente a durabilidade, a capacidade de proteção das armaduras e a resistência à compressão do betão [2].

A Figura 3 explicita a influência que a realização da cura húmida, assim como o tempo da sua realização, pode ter sobre a resistência à compressão do betão [21].



**Figura 3 - Influência das condições de cura sobre a resistência à compressão do betão.**

Fonte: Adaptado de METHA e MONTEIRO, 2008 [21].

## 2.2. Controle e conformidade

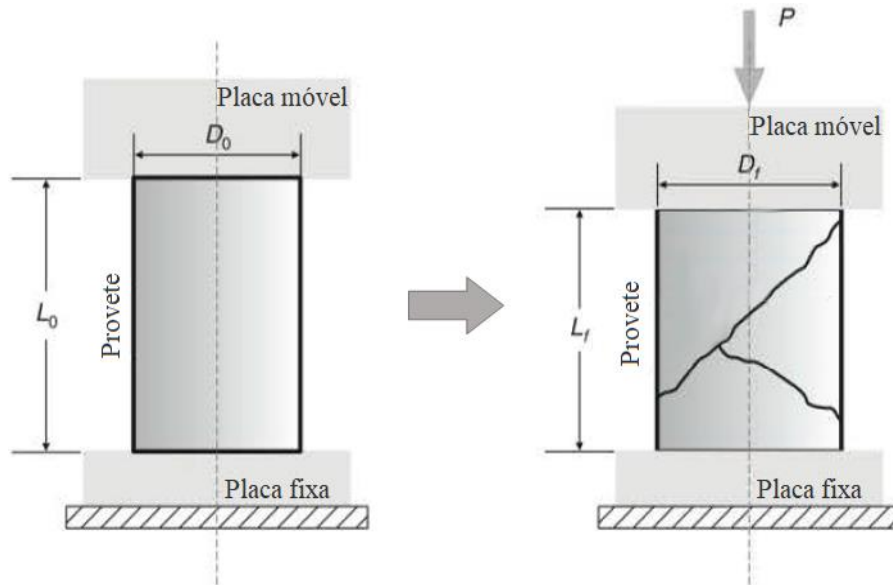
A qualidade e a resistência do betão serão influenciadas por diversos fatores de formas diferentes e uma falha entre os processos de fabrico, colocação, compactação ou cura podem comprometer o produto final. Um betão heterogéneo, com excesso de vazios e com consistência inadequada pode ter sido produzido com os mesmos constituintes, e mesmas proporções, que um betão que apresente uma boa qualidade e resistência [2].

A NP EN 206-1 [24], estabelece que todo o betão deve ser sujeito ao controlo da produção sob a responsabilidade do produtor, e como parte integrante desse controlo tem-se o controlo da conformidade. Essa norma caracteriza o controlo de conformidade como um conjunto de ações e decisões a implementar para verificar a conformidade do betão com as especificações.

As propriedades do betão encontradas através dos ensaios normalizados são as consideradas para controlo da conformidade. Contudo a própria norma NP EN 206-1 [24] ressalta que os valores reais das propriedades do betão na estrutura podem diferir dos determinados pelos ensaios, dependendo, por exemplo, das dimensões da estrutura, da colocação, da compactação, da cura e das condições climáticas.

Como referido anteriormente, a principal propriedade do betão a ser verificada é a resistência à compressão, que normativamente, é dada por um ensaio destrutivo realizado em provetes confecionados a partir de amostras retiradas aleatoriamente do betão [15, 24].

O ensaio de compressão consiste em aplicar uma carga axial crescente a um provete específico. O provete, que pode ser cilíndrico ou cúbico, fica apoiado em uma placa fixa enquanto uma placa móvel aplica a carga de compressão gradualmente. O funcionamento do ensaio transcorre conforme representado na Figura 4, em que  $L_0$  é o comprimento inicial do provete,  $D_0$  o diâmetro inicial,  $L_f$  o comprimento final,  $D_f$  o diâmetro final e  $P$  é a carga aplicada [8].



**Figura 4 - Representação esquemática de um ensaio de compressão.**

Fonte: Adaptado de GARCIA et al, 2000 [8].

Este ensaio, quando aplicado a um betão, fornece uma única propriedade mecânica: o limite de resistência à compressão (a máxima tensão que o material pode suportar). Esse parâmetro é calculado dividindo a carga máxima aplicada pela área da secção inicial do provete [8].

A NP EN 206-1 [24] estabelece os critérios que um conjunto de provetes de um determinado betão deve atender para que este seja considerado conforme quanto à sua resistência à compressão. Ainda, é normalizada a maneira como as amostras devem ser selecionadas e recolhidas, assim como a frequência mínima de amostragem.

A classe do betão é determinada pelo valor característico da resistência à compressão em provetes cilíndricos e em provetes cúbicos, expressa da seguinte forma:  $C(f_{ck})/(f_{ck,cube})$ .

O ensaio a compressão do betão é um ensaio destrutivo no qual os provetes são inutilizados durante a sua realização [8]. Contudo, os resultados obtidos através dos

provetes podem não refletir a realidade do betão utilizado em obra, de forma que ensaios não destrutivos podem ser importantes ferramentas para melhorar o controlo de conformidade [9].

### 3. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Os métodos de ensaios não destrutivos podem ser aplicados em peças já finalizadas ou em processo de confecção sem prejudicar a integridade e o desempenho das mesmas. Esses ensaios geram pouco ou nenhum dano ao objeto analisado que pode ser facilmente reparado após o ensaio de forma que não deixe vestígios [25].

As principais aplicações desses métodos em novas estruturas são para o controle de qualidade e verificação de conformidade. Tratando-se de estruturas existentes, podem ser aplicados para nortear acerca da integridade e condições estruturais [26].

Em 2005 a International Atomic Energy Agency (IAEA) publicou um estudo sobre as técnicas não destrutivas utilizadas em estruturas de betão. A Tabela 2 apresenta as principais técnicas utilizadas na indústria e suas respectivas aplicações [25].

**Tabela 2 - Técnicas não destrutivas e suas aplicações para caracterização do betão.**

Métodos não destrutivos	Aplicações											
	Resistência	Módulo de Elasticidade	Espessura de camadas	Profundidade de fendas	Abertura de fendas	Distribuição de fendas	Desenvolvimento de fendas	Vazios	Delaminação	Localização de armaduras	Dimensão de armaduras	Deterioração de armaduras
Lupas					X	X						
Esclerómetro de reflexão	X											
<i>Pull-out test</i>	X											
Ultrassons	X	X	X	X				X	X	X		
Radar								X	X	X		
Termografia						X		X	X			
Radiografia			X					X		X	X	X
Emissão acústica							X					
Corrente magnética										X	X	X
Half-cell Potential (corrente elétrica)												X
Fotografia					X	X						

Fonte: Adaptado de IAEA 2005 [25].

Uma das aplicações dos métodos não destrutivos é estimar a resistência à compressão do betão. Essa estimativa é feita através da medição de outras propriedades e posteriores correlações, uma vez que a determinação direta dessa propriedade mecânica só é possível através de ensaio destrutivo [26].

Os ensaios não destrutivos que podem ser utilizados para estimar a resistência à compressão do betão são o ensaio do esclerómetro, os ensaios de arrancamento “pull-off” e “pull-out”, e o ensaio do ultrassom [25]. Este último será estudado em pormenor no capítulo 4.

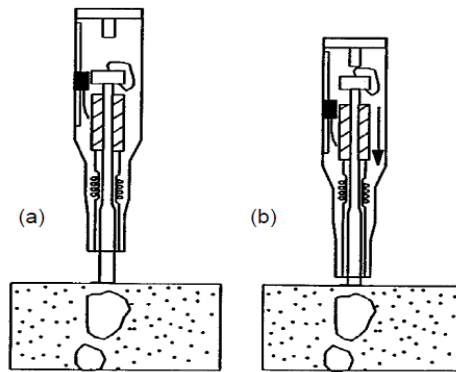
### **3.1. Método do martelo de Schmidt ou do esclerómetro**

Um método de ensaio utilizando um martelo para medir a dureza superficial do betão foi desenvolvido pelo engenheiro suíço Ernest Schmidt em 1948, baseando-se no princípio do ressalto [27]. Esse princípio é fundamentado no facto que o ressalto de uma massa elástica depende da dureza da superfície com a qual esta choca [26].

O ensaio consiste em submeter a superfície do betão ao impacto de um martelo, ligado a uma mola em estado de tensão, medindo seu respetivo recuo, ou índice esclerométrico. O recuo depende de dois fatores, a energia cinética pré-impacto e o quanto dessa é absorvida. Parte da energia inicial é absorvida no atrito mecânico do equipamento e a outra parte no contato entre o equipamento e o betão. A energia absorvida está relacionada com a resistência superficial do betão, com a qual é possível estimar a resistência à compressão [9, 26].

O esquema do ensaio está representado na Figura 5. O início do ensaio consiste em pressionar o martelo contra a superfície do betão comprimindo a mola (a). A mola solta-se quando atinge o estado máximo de compressão (b). Com o recuo obtém-se o índice esclerométrico [26].

A resistência à compressão do betão é estimada através de uma relação com o valor da sua dureza superficial, essa por sua vez encontrada a partir do índice esclerométrico medido no ensaio [26]. Os valores obtidos neste ensaio variam também de acordo com o equipamento utilizado, pelo que cada fabricante deve dispor de uma tabela de correlação própria.



**Figura 5 - Ensaio do esclerómetro.**

Fonte: Adaptado de SAMPAIO, 2010 [26].

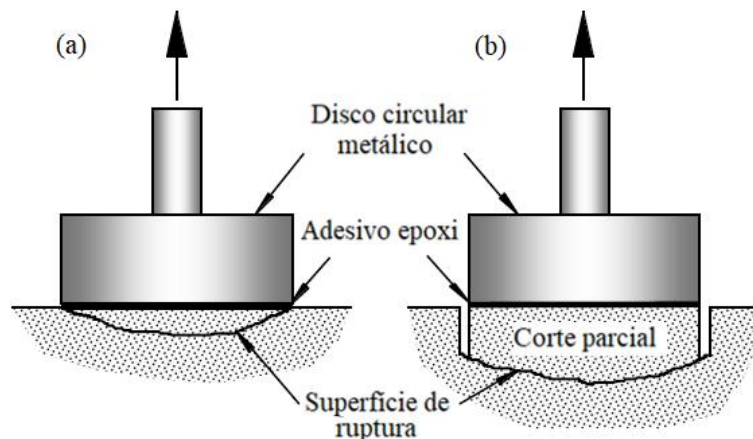
A principal vantagem deste ensaio é o facto de ser realizado com um equipamento leve, de rápida e simples operação, podendo obter-se uma grande quantidade de dados em um curto período de tempo [9]. A aplicação desse método tem como desvantagem o facto de os resultados poderem refletir apenas a qualidade da superfície do betão testado e não ser representativo da peça como um todo. Irregularidades na superfície terão significativos impactos nos resultados obtidos, e o ensaio ainda é afetado pelo tipo de agregado, humidade e idade do betão, especialmente após três meses quando já se pode ter influência da carbonatação [9, 26].

O investigador Malhotra indica que este método pode apresentar uma margem de erro entre 15% e 20% para amostras que apresentem condições semelhantes àsquelas a partir das quais as curvas de correlação foram estabelecidas [27].

O investigador Bungey considera que uma margem de erro inferior a 15% pode ser alcançada em laboratório para betões com idades de até 90 dias e com condições idênticas aos utilizados para a calibração do equipamento. Este ainda considera improvável obter uma margem de erro melhor que 25% para ensaios realizados “*in situ*” [12].

### **3.2. Método de arrancamento “pull-off”**

O método de arrancamento “pull-off” foi desenvolvido na década de 70 do século XX. Para a realização do ensaio, um disco metálico e circular é colado na superfície do betão em teste e uma força de tração é aplicada por um sistema mecânico portátil até que haja uma ruptura e, conseqüentemente, o desprendimento de uma porção do betão [9]. A Figura 6 esquematiza o funcionamento desse ensaio.



**Figura 6 - Ensaio "pull-off".**

Fonte: Adaptado de HENDERSON et al., 1991 [28].

Para a realização desse ensaio é recomendado que um corte superficial, que siga as dimensões do disco como em (b) na Figura 6, seja feito no betão de forma a evitar influências das condições de superfície, como a exemplo de superfícies que apresentem ocorrência de carbonatação [9].

Após o ensaio de arrancamento deve avaliar-se o modo de rotura ocorrido para validar os valores obtidos. Existem dois possíveis modos de rotura: a adesiva que ocorre pela resina (ou cola) e a coesiva que ocorre pelo betão. No caso da primeira, no disco metálico será possível observar apenas poucos vestígios de betão e os resultados não podem ser considerados representativos. No segundo caso será possível observar no disco metálico uma porção de betão com espessura variável, mas geralmente próxima ao valor do corte superficial, ou pré-caroteamento, realizado no betão [26].

A resistência à compressão do betão pode ser estimada através dos valores obtidos no ensaio de “pull-off” utilizando a Equação 2 [26].

$$f_{cm,cubo} = \left( \frac{f_{ctm,p}}{0,18} \right)^{3/2} \quad (2)$$

Na equação anterior,  $f_{ctm,p}$  é o valor médio da resistência à tração obtida no ensaio “pull-off”, expresso em MPa, e  $f_{cm,cubo}$  é o valor médio da resistência à compressão do betão em provetes cúbicos, expresso em MPa.

A principal vantagem do ensaio deve-se ao fato de ser de simples realização e poder ser aplicado tanto em superfícies horizontais quanto verticais sem influências

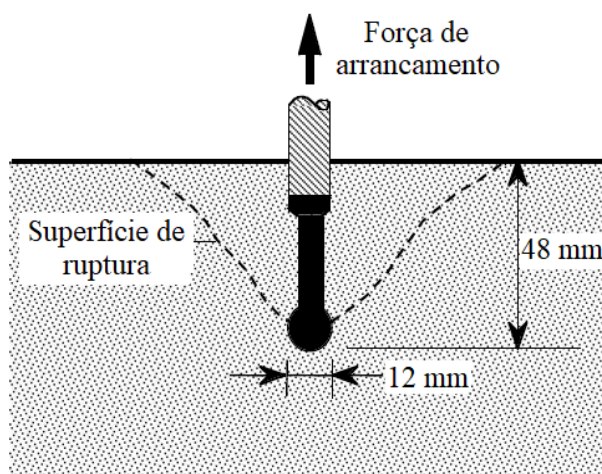
significativas nos resultados. Como desvantagem pode-se citar o facto de a superfície ensaiada necessitar de pequenos reparos após a execução do “pull-off” [9].

A BS 1881: Part 207 [29] indica que, para este ensaio, é provável obter um coeficiente de variação de 10% em resultados de um único local, indicando também que a margem de erro de ensaios laboratoriais para estimar a resistência à compressão é de aproximadamente 15%.

Os investigadores Long e Murray [30] realizaram diversos testes em laboratório e “*in situ*”. Para os ensaios laboratoriais obtiveram uma margem de erro de 8% no método do “pull-off” enquanto para os ensaios realizados “*in situ*” a margem de erro foi de 20%.

### 3.3. Método de arrancamento “pull-out”

A descrição mais antiga do método de arrancamento “pull-out” foi publicada na antiga União Soviética pelo investigador Skramtajew. O método foi desenvolvido simultaneamente por dois engenheiros, Volf e Gershberg, e consistia em inserir uma haste com uma extremidade esférica no betão em estado fresco para posteriormente medir a força necessária para extrair a haste do betão em seu estado endurecido, como mostra a Figura 7 [31].

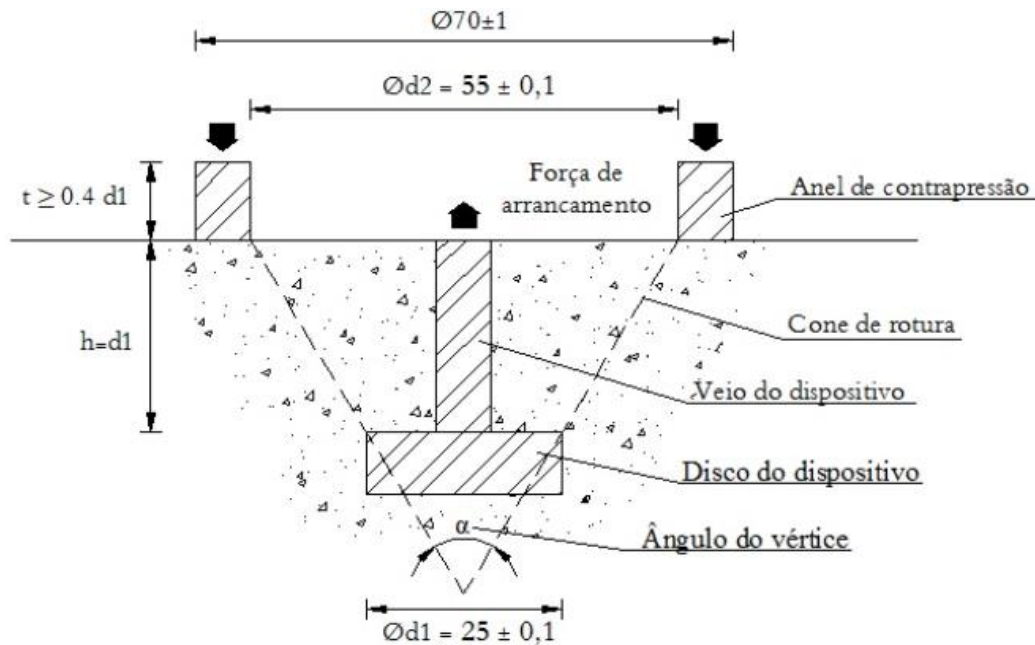


**Figura 7 - Método de arrancamento desenvolvido por Volf.**

Fonte: Adaptado de CARINO, 1991 [31].

O ensaio do “pull-out” desenvolveu-se ao longo dos anos. Atualmente, este ensaio mede a força necessária para extrair um disco metálico incorporado em uma amostra ou estrutura de betão. Um sistema de carga aplica uma força de arrancamento na haste de

metal ligada ao disco metálico enquanto reage com a superfície do betão através de um anel de reação concêntrico [31, 32]. A Figura 8 esquematiza o funcionamento do “pull-out” assim como indica as dimensões recomendadas para o dispositivo de arranque segundo a norma NP EN 12504-3 [33].



**Figura 8 - Método de arranque "pull-out".**

Fonte: MENDES, 2012 [32].

Com o resultado obtido através da realização do ensaio, pode estimar-se o valor da resistência à compressão do betão utilizando a Equação 3 proposta pela norma NP EN 12504-3 [33].

$$f_c = \frac{F_p}{A} \quad (3)$$

Na equação anterior,  $f_c$  é o valor da resistência à compressão do betão expressa em MPa,  $F_p$  é o valor da força de arranque máxima expressa em N e  $A$  é a área da superfície de rotura em mm<sup>2</sup> dada pela Equação 4.

$$A = \frac{1}{4} \pi \cdot (d_2 + d_1) \cdot [4h^2 + (d_2 - d_1)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Na equação anterior,  $d_1$  é o diâmetro do disco de “pull-out”,  $d_2$  é o diâmetro interno do anel de contrapressão e  $h$  é a distância entre o disco de “pull-out” e a superfície do betão.

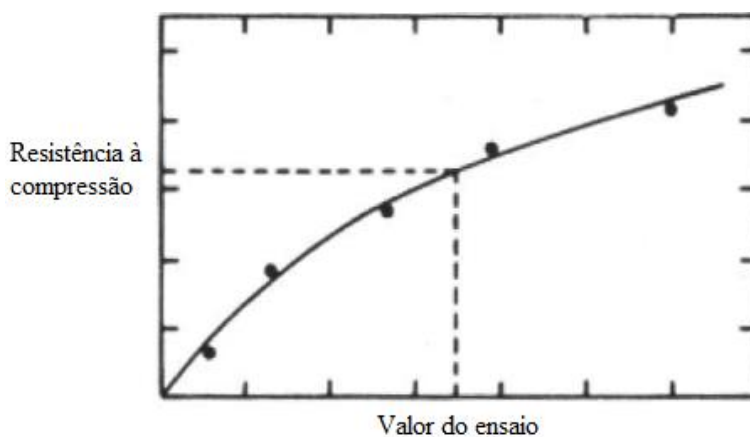
Esse método apresenta como vantagem a possibilidade de medir *in situ* a resistência do betão de maneira rápida. As desvantagens do método devem-se ao facto do betão precisar de pequenos reparos após a sua realização e à necessidade de planear previamente a realização do “pull-out”, uma vez que o disco de arrancamento deve ser inserido no betão em seu estado fresco, limitando o ensaio às construções novas [34].

O investigador Carino [31] indica que, para um disco colocado a 25 mm de profundidade e uma dimensão máxima de agregado de 19 mm, o coeficiente de variação para ensaios realizados *in situ* poderia ser de apenas 8%.

### 3.4. Utilização dos ensaios não destrutivos em conjunto com os destrutivos

Os ensaios não destrutivos não devem ser tratados como uma opção de substituição ao ensaio de compressão, devendo servir como uma complementação [9]. O procedimento adequado para utilizar os métodos não destrutivos como ferramenta de avaliação da resistência *in situ* é estabelecer uma curva de correlação, conforme indica a norma NP EN 13791 [35].

A curva de correlação tem como objetivo relacionar os valores obtidos pelos ensaios não destrutivos com aqueles obtidos pelo ensaio de compressão. É recomendado que seja estabelecida uma curva diferente para cada lote de betão sob investigação [9]. A Figura 9 apresenta um exemplo de curva de correlação.



**Figura 9 - Exemplo de curva de correlação.**

Fonte: Adaptado do Comité 228 do ACI, 1989 [36].

O comit  228 do ACI [36] recomenda que a curva de correla o seja estabelecida a partir de provetes padrão, cilindros ou cubos, e utilizando pelo menos seis níveis de resistência. Os níveis de resistência podem ser obtidos de um mesmo betão ensaiado a idades diferentes. Para se alcançar um grau de confiabilidade dos ensaios não destrutivos próximo ao do ensaio de compressão pode adotar-se a Equa o 5.

$$\frac{n_{nd}}{n_c} = \left( \frac{\delta_{nd}}{\delta_c} \right)^2 \quad (5)$$

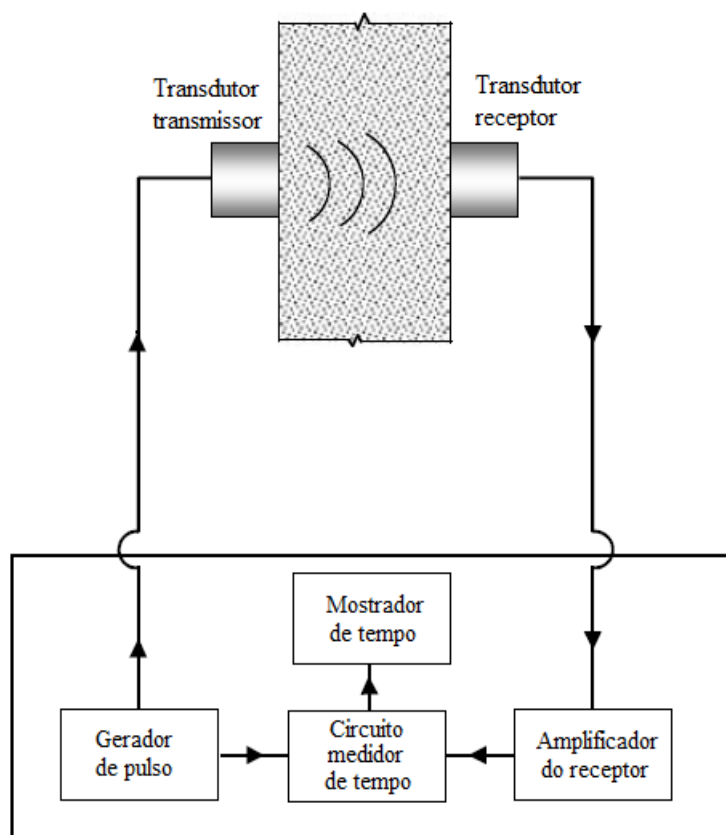
Na equa o anterior,  $n_{nd}$    o número de ensaios não destrutivos,  $n_c$    o número de ensaios de compressão,  $\delta_{nd}$    o coeficiente de varia o dos ensaios não destrutivos e  $\delta_c$    o coeficiente de varia o dos ensaios de compressão.

#### 4. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS PELA TÉCNICA DE ULTRASSONS

Em meados da década de 40 do século XX surgiram, nos Estados Unidos, os primeiros relatos de medições de velocidade de pulsos mecanicamente gerados. Naqueles estudos foi constatado que a velocidade do pulso depende primordialmente das propriedades elásticas do material e praticamente não depende da sua geometria [12].

O desenvolvimento do método da propagação de ondas ultrassônicas ocorreu de forma simultânea: os investigadores Leslie e Cheesman criaram um aparelho chamado sinoscópio no Canadá, e o investigador Jones desenvolveu o teste ultrassônico na Inglaterra [37].

Um aparelho portátil, leve, bateria própria e apresentação do tempo de propagação da onda ultrassônica em mostrador digital foi criado no início da década de 70 e recebeu o nome de PUNDIT (Portable Ultrasonic Non Destructive Indicating Tester) [37]. A Figura 10 apresenta de forma esquemática o funcionamento do aparelho ultrassônico e a Figura 11 mostra um aparelho real conforme o esquematizado.



**Figura 10 - Esquema de funcionamento do aparelho ultrassônico.**

Fonte: Adaptado de NAIK e MALHOTRA, 1991 [38].



**Figura 11 - Aparelho ultrassónico.**

Fonte: NAIK e MALHOTRA, 1991 [38].

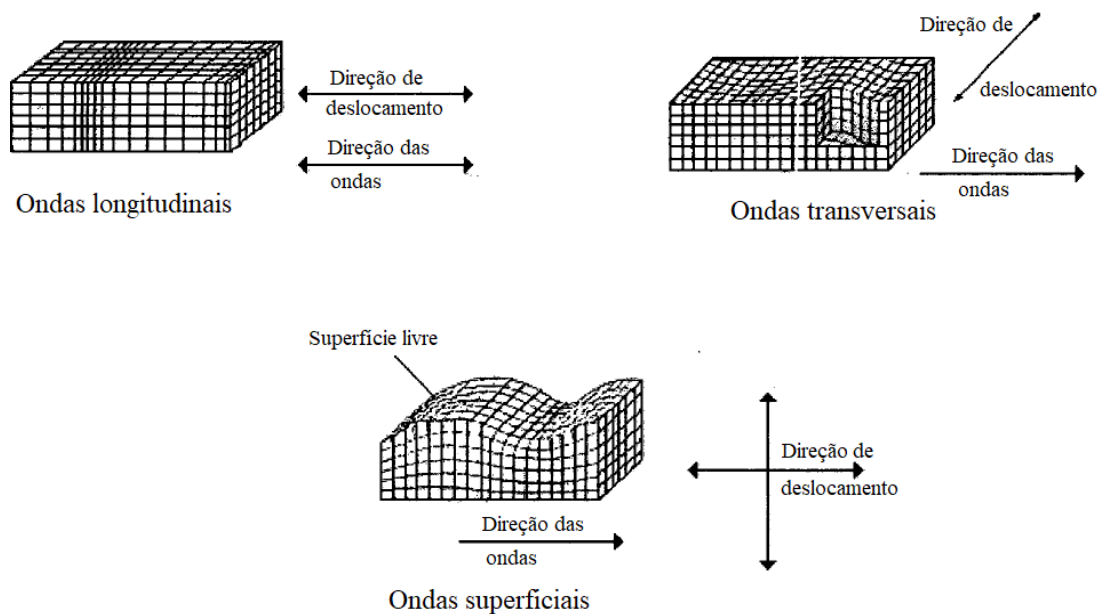
#### **4.1. Funcionamento do ensaio**

O ensaio de determinação da velocidade de propagação de ultrassons é do tipo não-destrutivo, ou seja, não gera qualquer dano ao elemento testado. Com este método, um elemento pode ser testado inúmeras vezes sem ser danificado, o que permite acompanhar as mudanças internas e o desenvolvimento das propriedades de um material ao longo do tempo [38].

Para a realização desse ensaio são gerados pulsos ultrassônicos por um transdutor eletro-acústico, capaz de converter energia elétrica em energia mecânica de vibração, e vice-versa [12]. O transdutor é composto por materiais cristalinos de efeito piezoelétrico, que lhe concedem a capacidade de fazer essa conversão de energia [37].

Um circuito eletrônico gera pulsos elétricos que excitam os materiais cristalinos à sua frequência natural, o que resulta na geração de ondas ultrassônicas capazes de atravessar o material em estudo. Um outro transdutor recebe os pulsos ultrassônicos, que são amplificados e novamente transformados em pulsos elétricos, o que permite medir o tempo de propagação [39].

Três tipos de ondas diferentes são gerados quando impulsos mecânicos são aplicados a um material sólido, sendo elas: longitudinais, transversais e superficiais. As ondas longitudinais fazem com que as partículas se desloquem na mesma direção de propagação da onda, já as ondas transversais ocasionam movimentos perpendiculares e as superficiais geram movimento elípticos, como ilustrado na Figura 12 [12, 38].



**Figura 12 - Tipos de ondas geradas em um sólido e direção do deslocamento.**

Fonte: MENEGHETTI, 1999 [37].

As ondas longitudinais, que também são conhecidas como ondas de compressão, chegam a ser duas vezes mais rápidas que as outras duas, e por isso são as preferíveis para medição na realização do ensaio. Os transdutores são comumente projetados para gerar ondas longitudinais, contudo, inevitavelmente, algumas ondas transversais e superficiais são também geradas, mas não chegam a influenciar os resultados [37].

Em resumo, o objetivo do ensaio consiste em obter a velocidade longitudinal dos pulsos ultrassônicos. Essa velocidade é dada pela Equação 6 [34].

$$v = \frac{L}{T} \quad (6)$$

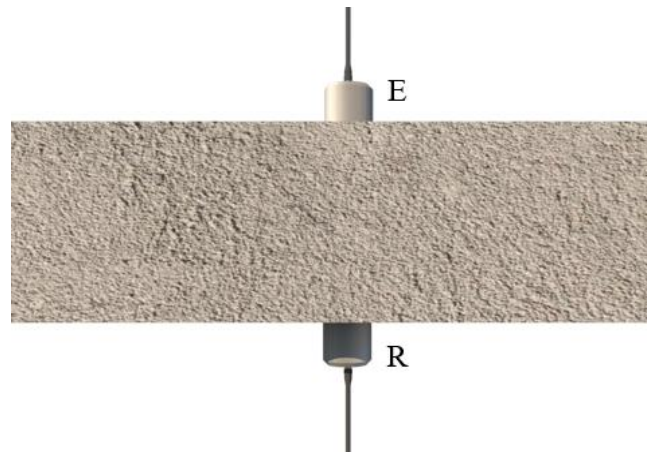
Na equação anterior,  $v$  é a velocidade longitudinal do pulso ultrassônico,  $L$  é a distância percorrida pelas ondas, e  $T$  é o tempo necessário para percorrer essa distância.

#### 4.1.1. Tipos de medição

Existem três modos de transmissão de pulso para a obtenção da velocidade de propagação, estes são classificados conforme o arranjo dos transdutores e podem ser diretos, semidiretos ou indiretos [12].

- Transmissão direta

Na transmissão direta os transdutores são dispostos em planos paralelos conforme mostra a Figura 13. Esse é o arranjo mais indicado para o ensaio, dado que dessa forma a energia de pulso transmitida entre o emissor e o recetor é máxima [38].

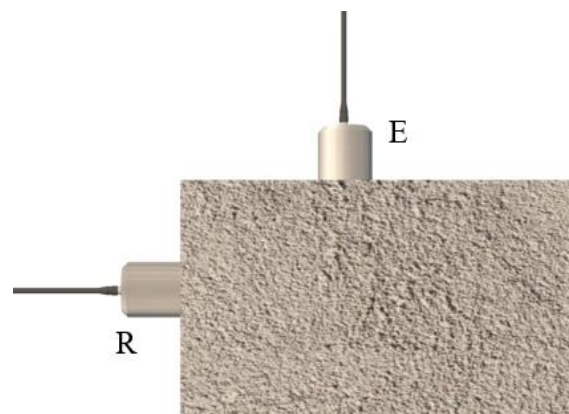


**Figura 13 - Transmissão direta.**

Fonte: Autoria própria.

- Transmissão semi-direta

Na transmissão semi-direta os transdutores são dispostos em planos perpendiculares conforme mostra a Figura 14. Neste arranjo obtêm-se resultados similares à transmissão direta e é indicado quando há necessidade de evitar concentrações de varões de aço. Deve ter-se cuidado para não afastar em demasia o emissor do recetor, de forma a evitar que a intensidade do pulso diminua a ponto de não ser detetada [38].



**Figura 14 - Transmissão semi-direta.**

Fonte: Autoria própria.

- Transmissão indireta

Na transmissão indireta os transdutores são dispostos no mesmo plano conforme mostra a Figura 15. Esse é o arranjo menos indicado para a realização do ensaio, pois a intensidade do sinal que chega ao recetor é significativamente menor quando comparado com a medição direta, e também mais suscetível a erros. A transmissão indireta é utilizada quando só há acesso a apenas uma face do objeto em estudo, como é possível acontecer em barragens, lajes e pavimentos de betão [26].

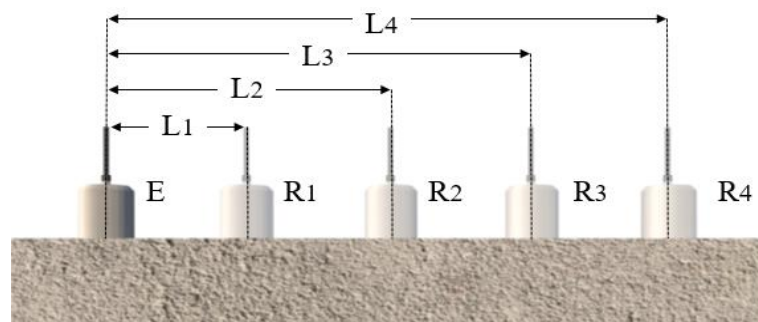


**Figura 15 - Transmissão indireta.**

Fonte: Autoria própria.

Quando os transdutores estão localizados na mesma face, a profundidade a que o pulso ultrassónico viaja muda com a distância entre o emissor e o recetor: quanto mais distantes estes estiverem, mais profunda será a camada pela qual o pulso viajará. Em consequência a este comportamento, a obtenção da velocidade de pulso não é tão direta como nos outros dois tipos de medição [26].

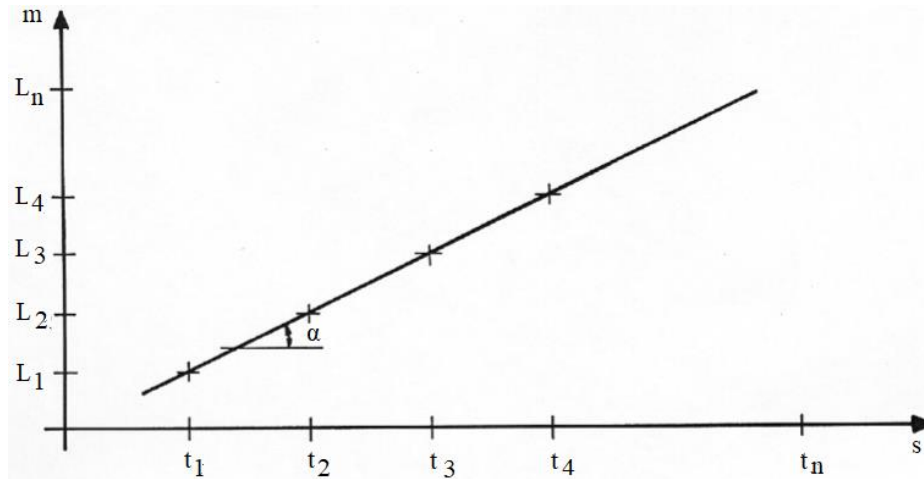
A determinação da velocidade do pulso é feita realizando diversas medições, onde o emissor deve ser mantido fixo e o recetor deve ser alocado em diferentes pontos equidistantes entre si, conforme ilustrado na Figura 16 [12].



**Figura 16 - Medições consecutivas para a transmissão indireta.**

Fonte: Autoria própria

Para prosseguir, uma relação deve ser graficamente estabelecida entre a distância dos dois transdutores, emissor e receptor, e o tempo que o pulso ultrassônico demora a percorrer as respectivas distâncias estabelecidas, conforme exemplificado na Figura 17 [26].



**Figura 17 - Reta para a determinação da velocidade de pulso usando transmissão indireta.**

Fonte: Adaptado de NBR 8802:2013 [40].

A velocidade de pulso poderá ser determinada pela inclinação da reta gerada através da Equação 7.

$$V = \tan \alpha \quad (7)$$

#### 4.2. Aplicações no betão

A determinação da velocidade com que o pulso ultrassônico longitudinal, ou de compressão, atravessa o betão pode possibilitar a determinação da uniformidade da peça ou de peças de um mesmo lote, acompanhar as mudanças de propriedades ao longo do tempo, auxiliar no controle de qualidade e estimar profundidade de fendas e fissuras e além disso a velocidade de propagação de ultrassons baseia-se no princípio de esta ser proporcional à raiz quadrada do módulo de elasticidade dinâmico do material sobre a densidade do mesmo [34].

#### 4.2.1. Qualidade

Muitos autores desde o início do desenvolvimento dessa técnica de ensaio criaram correlações entre a qualidade do betão e a velocidade do pulso ultrassónico. Um exemplo dessa correlação pode ser observado na Tabela 3. Os valores aí apresentados foram propostos por Whitehurst em 1951, para betões com massa volúmica de aproximadamente  $2400 \text{ kg/m}^3$  [26].

**Tabela 3 - Relação entre a velocidade do pulso e a qualidade do betão.**

Velocidade do pulso (m/s)	Qualidade do betão
> 4500	Excelente
3500 a 4500	Boa
3000 a 3500	Questionável
2000 a 3000	Baixa
< 2000	Muito baixa

Fonte: Adaptado de IAEA, 2002 [34].

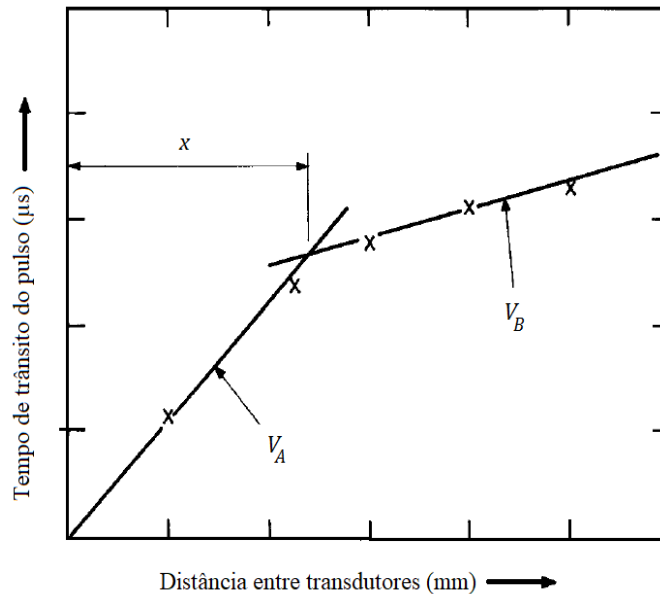
Contudo, essa classificação não é universal. O autor Jones, por exemplo, estabelece que a mínima velocidade de pulso para um betão ser considerado de boa qualidade é  $4100 \text{ m/s}$  [34].

#### 4.2.2. Uniformidade

A variação da uniformidade ou homogeneidade do betão pode ser ocasionada por diversos fatores como falhas nos procedimentos de colocação, compactação e cura, exposição ao fogo, ação gelo e degelo, ataque por sulfatos, entre outros [41].

A realização do ensaio ultrassónico em diversos pontos de uma peça, ou em diversas peças de um mesmo lote de betão, e a análise estatística dos resultados, pode evidenciar a efetiva homogeneidade de um betão. O investigador Tomsett, sugere que para uma única peça confeccionada a partir de um único lote de betão, um coeficiente de variação de 1,5% significaria um bom padrão de construção. Tratando-se de várias peças ou vários lotes o coeficiente adequado seria de até 2,5%. Para uma estrutura inteira confeccionada com um betão semelhante, uma variação de 6% a 9% é sugerida como apropriada [41].

Utilizando o método da transmissão indireta descrita no item 4.1.1, podem distinguir-se camadas que apresentem diferentes propriedades e qualidade. A velocidade do pulso ultrassónico através de uma camada superior do betão,  $V_A$ , e de uma camada inferior de diferente qualidade ou diferentes propriedades,  $V_B$ , são indicadas pelas inclinações de duas retas diferentes que relacionam o tempo de propagação do pulso com a distância entre os transdutores, conforme é exemplificado na Figura 18 [12].



**Figura 18 – Método para determinar espessura de diferente qualidade do betão.**

Fonte: Adaptado de BUNGEY, 2006 [12].

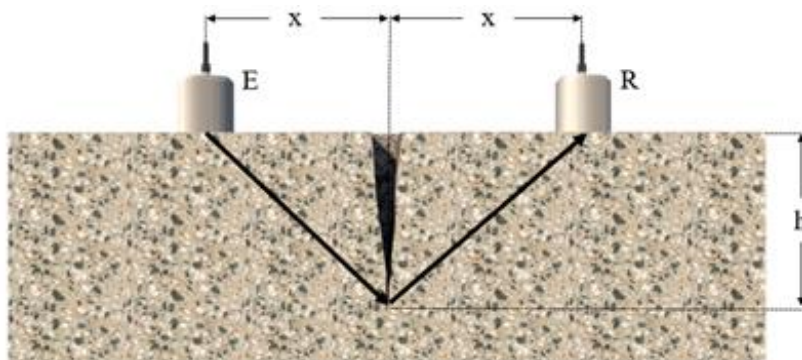
Obtido o valor da abscissa  $x$  da descontinuidade, observada na Figura 13, pode determinar-se a espessura,  $e$ , em que há a mudança de camadas através da Equação 8.

$$e = \frac{x}{2} \cdot \sqrt{\frac{(V_A - V_B)}{(V_A + V_B)}} \quad (8)$$

#### 4.2.3. Profundidade de fendas

A colocação dos transdutores em posição indireta possibilita ainda a medição da profundidade de fendas verticais e oblíquas. Um pulso ultrassónico transmite uma quantidade muito pequena de energia através do ar, logo, se no trajeto que um pulso deveria percorrer existir uma fenda, ou um vazio, que tenha uma área perpendicular à

direção de propagação maior que a área do transdutor emissor, o pulso irá difratar ao redor da falha. Nessa situação o tempo de transmissão do pulso será maior que em um betão semelhante sem defeitos [38]. A Figura 19 representa como é realizado o ensaio para estimar a profundidade da fenda de acordo com a Equação 9.



**Figura 19 - Método para estimar profundidade de fendas.**

Fonte: Autoria própria.

$$h = \frac{X}{T_2} \cdot \sqrt{T_1^2 - T_2^2} \quad (9)$$

Na equação anterior,  $h$  é a profundidade da fenda,  $X$  é a distância dos transdutores até a fenda (os transdutores devem estar equidistantes da fenda),  $T_1$  é o tempo de transmissão do pulso ao redor da fenda e  $T_2$  é o tempo de transmissão do pulso na superfície de um betão similar sem defeitos (a distância entre os transdutores para medir  $T_1$  e  $T_2$  deve ser a mesma).

Este método tem, porém, sérias limitações. Se a fenda estiver preenchida com água ou outros detritos, o pulso poderá propagar-se através dela. Também, se a fissura for muito pequena ou se a ponta não estiver muito bem definida, a velocidade de propagação não diminuirá o suficiente para que seja determinada uma profundidade [38].

#### 4.2.4. Módulo de elasticidade

Como exposto anteriormente, a velocidade a que o pulso ultrassônico se propaga em um sólido depende principalmente das propriedades elásticas do material e é praticamente independente da sua geometria e dimensões [12].

Uma das principais aplicações do método de ensaio do ultrassom é estimar o módulo de elasticidade dinâmico do betão, determinado de acordo com a Equação 10.

$$E_d = \frac{V^2 \cdot \rho}{K} \quad (10)$$

Na equação anterior,  $E_d$  é o valor do módulo de elasticidade dinâmico expresso em Pa,  $V$  é a velocidade do pulso em m/s,  $\rho$  é a densidade do betão em kg/m<sup>3</sup> e  $K$  é uma constante que depende do coeficiente de Poisson,  $\nu$ , conforme a Equação 11.

$$K = \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)} \quad (11)$$

#### 4.2.5. Resistência à compressão

Apesar da velocidade de propagação do pulso ultrassónico ser um indicador de qualidade, conforme mencionado no item 4.2.1, não há uma relação direta entre a resistência à compressão e essa velocidade [26]. Contudo, conhecendo o módulo de elasticidade dinâmico,  $E_d$ , determinado pelo método do ultrassom, que equivale aproximadamente ao módulo tangente na origem,  $E_c$  [42], é possível estimar o valor característico da resistência à compressão do betão,  $f_{ck}$ .

O Eurocódigo 2 [43] estabelece que o módulo de elasticidade secante do betão,  $E_{cm}$ , pode ser relacionado com o módulo tangente na origem, sendo que a razão  $E_c/E_{cm}$  é igual a 1,05. Assim, é possível relacionar o  $E_d$  calculado pelo ensaio do ultrassom com o  $E_{cm}$  e estimar a resistência à compressão através da Equação 12.

$$E_{cm} = 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3} \quad (12)$$

Na equação anterior,  $E_{cm}$  é o valor do módulo de elasticidade expresso em GPa e  $f_{cm}$  é definido pela Equação 13.

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad (13)$$

Na equação anterior,  $f_{cm}$  é o valor da resistência média à compressão do betão expressa em MPa e  $f_{ck}$  é o valor da resistência característica expressa em MPa.

Ainda segundo o Eurocódigo 2 [44], pode-se estimar a resistência à compressão de um betão para idades entre 3 e 28 dias a partir de um  $f_{cm}$  conhecido de um traço ou lote de betão através da Equação 14.

$$f_{ck}(t) = f_{cm}(t) - 8 \quad (14)$$

Na equação anterior,  $f_{ck}(t)$  é o valor da resistência característica à compressão expressa em MPa para uma determinada idade  $t$  em dias e  $f_{cm}(t)$  é determinado pela Equação 15.

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm} \quad (15)$$

Na equação anterior,  $\beta_{cc}(t)$  é um coeficiente que depende da idade do betão e é determinado pela Equação 16.

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \cdot \left[ 1 - \left( \frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (16)$$

Na equação anterior,  $t$  é a idade do betão em dias e  $s$  um coeficiente que depende do tipo de cimento conforme pode ser visto na Tabela 4.

**Tabela 4 - Valores de  $s$  de acordo com o tipo de cimento.**

Valor de $s$	Tipo de cimento
0,20	CEM 42,5R, CEM 52,5 N, CEM 52,5R (Classe R)
0,25	CEM 32,5 R, CEM 42,5 N (Classe N)
0,38	CEM 32,5 N (Classe S)

Fonte: Adaptado do Eurocódigo 2, 2010 [44].

A norma brasileira NBR 6118:2007 [45], também permite relacionar o módulo de elasticidade do betão com a sua resistência característica à compressão, para idades superiores a 7 dias, através da Equação 17.

$$E_{ci} = 5600 \cdot f_{ck}^{1/2} \quad (17)$$

Na equação anterior,  $E_{ci}$  é o valor do módulo de elasticidade expresso em MPa e  $f_{ck}$  é o valor da resistência à compressão expressa em MPa. Quando o valor de  $f_{ck}$  for desconhecido, este deve ser substituído por  $f_{cm}$  conforme a Equação 13.

A resistência à compressão ainda pode ser estimada através de curvas de correlação estabelecida para cada betão ou lote de betão em estudo conforme explicado no item 3.4.

Em estudo realizado em 1996, Komlos [46] et al., concluíram que a estimativa da resistência à compressão do betão pelo do método do ultrassom, mesmo que em laboratório e estabelecendo a curva de correlação é possível com uma confiabilidade apenas de aproximadamente 20%.

A investigadora Meneghetti [37] em 1999 em sua pesquisa atingiu um grau de confiança de 90% a 95% da relação velocidade de pulso e resistência à compressão do betão em ensaios laboratoriais estabelecendo curvas de correlação para os provetes ensaiados.

Em estudo publicado em 2011, Mahure et al., propuseram estabelecer curvas de correlação entre a velocidade de pulso e a resistência à compressão de variados traços de betão. As variações encontradas neste estudo entre as resistências previstas conforme as curvas e a obtidas através de ensaios de compressão ficaram entre 5,96% e -4,33%, indicando uma assertividade superior a 94% [47].

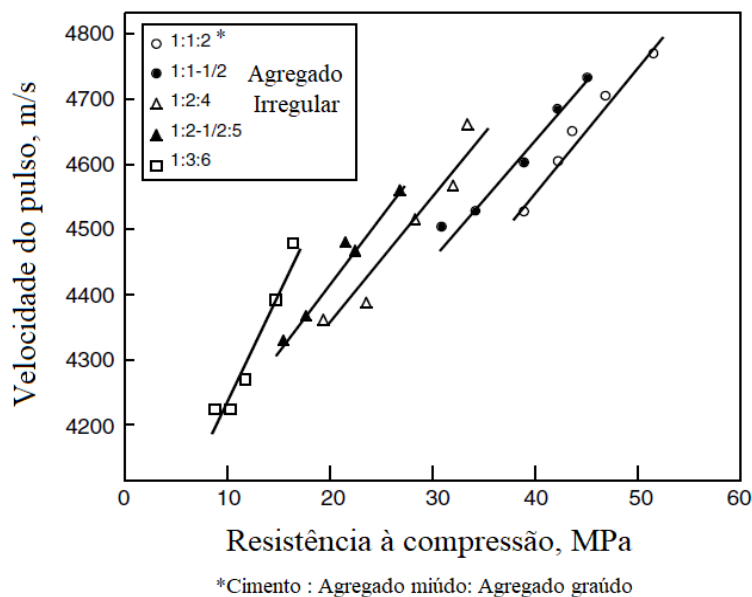
### **4.3. Fatores que influenciam os resultados**

Muitos são os fatores que podem afetar os resultados obtidos no ensaio ultrassónico, alguns relacionados à composição do betão e outros relacionados às condições “*in situ*” [12]. Os principais fatores são discutidos em seguida.

#### 4.3.1. Agregados

Como exposto no item 3.2.1, os agregados representam a maior parte percentual de um betão, e assim como possuem grande influência nas propriedades e na qualidade da mistura, estes também influenciam nas medições de pulso ultrassónico [2, 38].

A Figura 20 apresenta graficamente o modo como as proporções de agregado e cimento podem afetar a velocidade do pulso ultrassónico. É possível observar, para uma determinada velocidade de pulso, a redução da resistência à compressão com o aumento da relação agregado/cimento [38].



**Figura 20 - Influência das proporções de agregado e cimento na velocidade do pulso.**

Fonte: Adaptado de NAIK e MALHOTRA, 1991 [38].

Este fenómeno ocorre porque a velocidade do pulso no agregado é geralmente superior a velocidade do pulso na pasta de cimento, especialmente nas primeiras idades do betão [38]. Isso também influenciará a relação velocidade de pulso e resistência à compressão ao longo da idade do betão, visto que a resistência da pasta irá aumentar, conseqüentemente a velocidade do pulso nela também, e no agregado se manterá constante. Os investigadores Lee e Lee [48] concluíram que a velocidade do pulso ultrassónico média no betão chega a ser 16% superior que na argamassa nas primeiras idades. Contudo, essa diferença diminui ao passar dos dias.

O tipo de agregado utilizado na mistura também irá influenciar nos resultados do ensaio, dado que cada tipo tem uma faixa de velocidade de propagação ultrassônica característica, conforme mostra a Tabela 5 [9].

**Tabela 5 - Intervalos de velocidades do pulso ultrassônicos expectáveis para alguns tipos de rocha.**

<b>Tipo de rocha</b>	<b>Velocidade do pulso (m/s)</b>
Basalto	5270 - 6020
Dolomita	4370 - 6090
Granito	4000 - 5790
Calcário	3910 - 5780
Arenito	2550 - 4230
Quartzito	5570 - 5720

Fonte: Adaptado de CHUNG E LAW, 1993 apud EVANGELISTA, 2002 [9].

#### 4.3.2. Tipo do cimento

O tipo de cimento irá influenciar na velocidade de pulso ultrassônico de acordo com a sua taxa de hidratação. Um maior grau de hidratação do cimento significará um maior módulo de elasticidade e por consequência uma maior velocidade [49].

Um betão confeccionado a partir de um cimento que apresente um desenvolvimento das reações de hidratação mais rápido, ou seja, ganho inicial de resistência mais elevado, apresentará uma velocidade de propagação de pulso ultrassônico até 5% maior em relação à um betão de cimento comum, para uma mesma resistência à compressão [9, 49].

#### 4.3.3. Temperatura

A velocidade do pulso ultrassônico no betão não sofre alterações significativas entre as temperaturas de 10°C e 30°C. Para temperaturas fora dessa faixa deve-se corrigir a velocidade medida em ensaio conforme a Tabela 6 [34].

**Tabela 6 - Correção da velocidade de pulso de acordo com a temperatura.**

Temperatura	Correção para a velocidade do pulso medida	
	Betão seco	Betão saturado
°C	%	%
60	+5	+4
40	+2	+1,7
20	0	0
0	-0,5	-1
-4	-1,5	-7,5

Fonte: Adaptado de IAEA, 2002 [34].

#### 4.3.4. Teor de humidade

O teor de humidade no betão pode influenciar a velocidade do pulso ultrassónico devido a dois efeitos distintos. O primeiro, um efeito químico, estaria relacionado à taxa de hidratação do cimento, devido principalmente às condições de cura, contudo, a qualidade e a resistência à compressão também são afetadas por esse fator. O segundo, um efeito físico, ocorreria devido a possível presença de água livre nos vazios, afetando o ensaio de forma a se obter uma maior velocidade de pulso para uma mesma resistência à compressão [34].

#### 4.3.5 Varões de aço

A velocidade do pulso ultrassónico nos varões de aço chega a ser 1,2 a 1,9 vezes superior em relação à velocidade em um betão comum. A realização do ensaio em betões armados deve ser feita de forma a evitar que no percurso do pulso existam varões de aço, mas, caso isso não seja possível, alguns casos irão requerer a correção da velocidade medida [9].

No caso de existir armadura no percurso do pulso ultrassónico, o primeiro pulso que chega no transdutor recetor terá passado tanto pelo betão quanto pelo varão, o que significará uma velocidade medida superior que seria em caso não houvesse o aço [9].

Varões de aço transversais ao percurso do pulso, conforme representado na Figura 21, com diâmetros inferiores a 20 mm não chegam influenciar significativamente o ensaio, especialmente em betões que apresentem velocidade de pulso superior a 4000 m/s [12].



**Figura 21 - Varões de aço transversais ao percurso do pulso.**

Fonte: Autorial própria

Os varões de aço longitudinais ao percurso do pulso, conforme mostra a Figura 22, com diâmetros superiores a 6mm, apresentam influência significativa aos resultados do ensaio pelo que a velocidade medida deve ser corrigida [12]. Os autores Chung e Law, em 1983, propuseram a Equação 18 para corrigir a velocidade do pulso medida nestes casos.



**Figura 22 - Varões de aço longitudinais ao percurso do pulso.**

Fonte: Autorial própria

$$V_e = 5,90 - \frac{10,40 \cdot (5,90 - V)}{d} \quad (18)$$

Na equação anterior,  $V_e$  é a velocidade de propagação efetiva em km/s,  $V$  é a velocidade de propagação no betão expressa em km/s e  $d$  é o diâmetro do varão em mm.

#### 4.4. Aparelho ultrassónico tipo scanner

O ultrassom do tipo scanner, ou *pulse echo*, tem um funcionamento diferente do ultrassom convencional. Um exemplo desse tipo de aparelho é Pundit PL-200PE representado na Figura 23 [50].

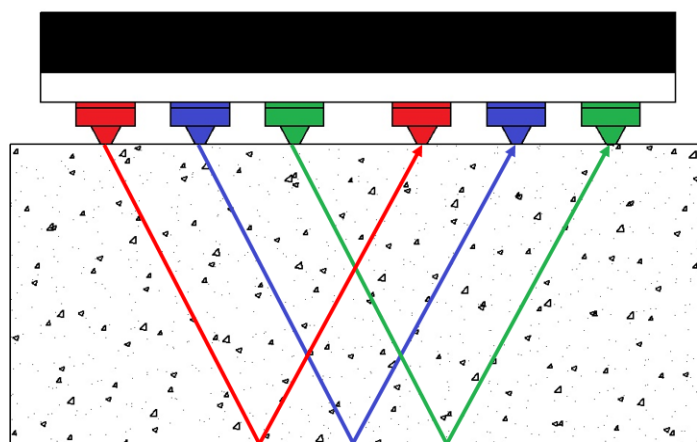


**Figura 23 - Ultrassom do tipo scanner.**

Fonte: Proceq SA [50].

#### 4.4.1. Funcionamento

O princípio de funcionamento baseia-se na medição do intervalo de transmissão de um pulso ultrassónico em um sólido e o recebimento do respetivo eco. Cada um dos nove transdutores do lado direito da Figura 23 forma um par com um respetivo transdutor do lado esquerdo. Os emissores localizados no lado direito emitem pulsos ultrassónicos enquanto os recetores localizados no lado esquerdo recebem os correspondentes ecos, conforme se esquematiza na Figura 24 [34, 50].



**Figura 24 - Esquema de funcionamento do ultrassom tipo scanner.**

Fonte: Adaptado de Proceq SA [50].

Nesse tipo de medição a velocidade do pulso ultrassónico é determinada de acordo com a Equação 19 [34].

$$V = \frac{2 \cdot d}{T} \quad (19)$$

Na equação anterior,  $V$  é a velocidade do pulso ultrassônico,  $d$  é a distância dos transdutores até a face oposta do sólido e  $T$  é o tempo de transmissão.

#### 4.4.2. Aplicações

As principais aplicações para o ultrassom do tipo scanner são a detecção e localização de vazios, tubos, regiões de segregação do betão, e fendas paralelas à superfície. Essas detecções são possíveis através de um modo de medição denominado B-Scan, com o qual é possível gerar uma imagem transversal, perpendicular à superfície, do objeto em teste [50].

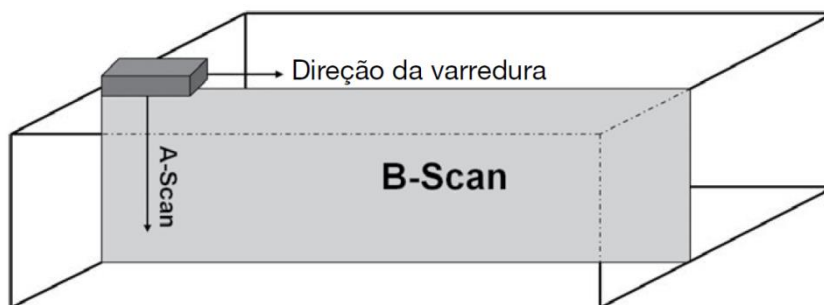
Com o aparelho ultrassônico tipo scanner também é possível determinar a velocidade com que um pulso percorre um objeto, porém, neste caso a onda é de cisalhamento e não de compressão. Outra aplicação é a possibilidade de estimar espessura e dimensões de peças pelas quais só se tenha acesso de um lado. Ao definir a velocidade de pulso característica da peça, ou de uma peça de betão semelhante e dimensões conhecidas, o aparelho pode retornar a espessura da peça em estudo através de um processamento interno da Equação 19 [34, 50].

Assim como é pode-se fazer com o aparelho ultrassônico convencional, através da velocidade de pulso característica medida pelo aparelho do tipo scanner, é possível verificar a uniformidade e homogeneidade de peças confeccionadas a partir de um mesmo lote de betão [34].

#### 4.4.3. B-Scan

Para a obtenção da imagem transversal do objeto em teste o aparelho ultrassônico realiza uma medição denominada de A-Scan. Essa medição é unidimensional e trata-se do percurso percorrido pelo pulso ultrassônico. Um defeito, ou algo que se diferencie muito do betão, tem sua profundidade definida pelo tempo de propagação, e a dimensão desse defeito é estimada através de uma análise da amplitude do sinal recebido [51].

A obtenção de uma imagem transversal do objeto em teste, B-Scan, trata-se de realizar diversas medições A-Scan deslocando o transdutor ao longo de um eixo, conforme esquematizado na Figura 25. As amplitudes obtidas pelas diversas medições A-Scan são convertidas em cores, ou em uma escala de cinza, para se obter uma imagem, bidimensional, que pode ser analisada e interpretada [51].



**Figura 25 - Esquema da realização de um B-Scan.**

Fonte: Adaptado de Proceq SA [50].

#### 4.4.4. Vantagens e desvantagens

As principais vantagens desse aparelho ultrassônico são, como expresso anteriormente, a possibilidade de gerar uma imagem transversal do objeto em teste e poder realizar o ensaio em peças que só se possa ter acesso de um lado [50].

A medição da velocidade de pulso tem tanto vantagens quanto desvantagens. Como essa velocidade é determinada através da interpretação dos resultados individuais de nove recetores, o valor do ensaio vai sofrer menos influências e o valor obtido será representativo, além da possibilidade de verificar a medição como dito no item 4.4.2 [50].

A onda ultrassônica gerada através desse aparelho é de corte, o que tem a desvantagem de não poder estimar o módulo de elasticidade do betão com esse valor obtido, porém esse tipo de onda traz mais uma vantagem, ela não percorre meios gasosos e líquidos, fazendo com que a humidade interna do betão não interfira no ensaio [50].

Uma grande desvantagem do aparelho tipo scanner é a impossibilidade de determinar a profundidade de fendas e fissuras como o aparelho convencional pode fazer, conforme explicado no item 4.2.3 [50].



## 5. PROGRAMA EXPERIMENTAL

A principal aplicação do método não destrutivo do ultrassom é estimar o módulo de elasticidade do betão, tal estimativa é feita através da velocidade do pulso longitudinal ou de compressão. Poder utilizar a velocidade de pulso encontrada com o ultrassom tipo scanner para tal estimativa seria de grande importância já que pela forma de medição o valor obtido com esse aparelho é mais representativo da peça e existe a possibilidade de verificar a medição [12, 50].

Para uma transmissão direta realizada por um ultrassom convencional, conforme item 4.1.1, a velocidade do pulso de cisalhamento pode ser relacionada com a velocidade de pulso de compressão através da Equação 20 [52].

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2 \cdot (1 - \nu)}{1 - 2\nu}} \quad (20)$$

Na equação anterior,  $V_p$  é a velocidade do pulso de compressão expressa em m/s,  $V_s$  é a velocidade do pulso de cisalhamento em m/s e  $\nu$  é o coeficiente de Poisson.

O primeiro passo desse estudo foi tentar possibilitar a utilização da velocidade de pulso ultrassónico obtido com o aparelho tipo scanner para estimar o módulo de elasticidade do betão. Considerando a Equação 20 e o comportamento da velocidade do pulso ultrassónico de acordo com a idade do betão e o tipo de cimento conforme estudo realizado pelos autores e investigadores Evangelista [9], Bungey [12], Meneghetti [37], Naik e Malhotra [38] e Lee e Lee [48], propõem-se a Equação 21 para betões com idades entre 3 e 28 dias e a Equação 22 para betões com idades superiores a 28 dias, com o objetivo de poder utilizar a velocidade de pulso de eco na Equação 10 (pág. 32), e consequentemente, na estimativa do módulo de elasticidade do betão.

$$V = 1,65 \cdot V_{echo} \cdot \exp(0,48 \cdot s \cdot j^{-0,1}) \quad (21)$$

Na equação anterior,  $V$  é a velocidade de pulso de compressão equivalente expressa em m/s,  $V_{echo}$  é a velocidade do eco obtida em ensaio,  $s$  é uma constante que depende do cimento como se indica na Tabela 4 (pág. 33) e  $j$  é a idade do betão em dias.

$$V = 1,65 \cdot V_{echo} \cdot \exp(0,3439 \cdot s) \quad (22)$$

Na equação anterior,  $V$  é a velocidade de pulso de compressão equivalente em m/s,  $V_{echo}$  é a velocidade do eco obtida em ensaio e  $s$  é uma constante que depende do cimento como se indica na Tabela 4.

As Equações 21 e 22 foram aplicadas em ensaios realizados em provetes normalizados, como será descrito ao longo do presente capítulo, e os resultados obtidos serão discutidos no capítulo 6.

Além da estimativa do módulo de elasticidade e da resistência à compressão, o aparelho ultrassónico foi testado na potencialidade de verificar a uniformidade de peças em betão, na possibilidade de localizar armaduras e estimar as áreas das secções dos varões de aço em peças de betão armado.

Para o este estudo, foram confeccionados dezoito provetes cúbicos em betão com 15 cm de aresta, três prismas em betão com dimensões 55 cm  $\times$  15 cm  $\times$  15 cm e foram utilizados três provetes cúbicos em betão armado com 20 cm de aresta já existentes em laboratório, confeccionados no ano de 2009.

A nível de curiosidade ainda foram ensaiados, com o equipamento de ultrassom, seis provetes cilíndricos de calda de injeção que estavam disponíveis no laboratório sendo utilizados em outro estudo. O objetivo para esses provetes foi determinar a velocidade de propagação de pulso ultrassónico em cada um e relacionar com a resistência à compressão aos 28 dias de idade.

## **5.1. Materiais utilizados**

Para a confeção dos provetes usados neste trabalho foram utilizados cimento CEM 32,5 N, (cuja ficha técnica se apresenta no Anexo 1), brita 8/14 de origem granítica (cuja granulometria e propriedades mecânicas e físicas obtidas em ensaios em conformidade com as normas NP EN 933-1 [53] e NP EN 1097-2 [54] se encontram no Anexo 2), areia natural 0/4 e água proveniente da rede de distribuição do Instituto Politécnico de Bragança.

## 5.2. Equipamentos utilizados

O equipamento ultrassônico utilizado para os ensaios foi o Pundit PL-200PE fabricado pela empresa Proceq, apresentado na Figura 26.



**Figura 26 - Equipamento ultrassônico Pundit PL-200PE**

Fonte: Proceq SA [50].

Para efeitos comparativos com os ensaios de ultrassom na estimativa da resistência à compressão, foram utilizados os equipamentos DY-216 da empresa Proceq, apresentado na Figura 27, para ensaio “pull-off”, e o martelo de teste de betão modelo NR da empresa Proceq, apresentado na Figura 28, para ensaio de dureza superficial. Os ensaios de compressão foram realizados na máquina de compressão modelo de 130 kN da empresa Matest, apresentado na Figura 29.



**Figura 27 - Equipamento DY-216 para ensaio de “pull-off”.**

Fonte: Proceq SA [50].



**Figura 28 - Martelo de teste de betão modelo NR.**

Fonte: Proceq SA [50].



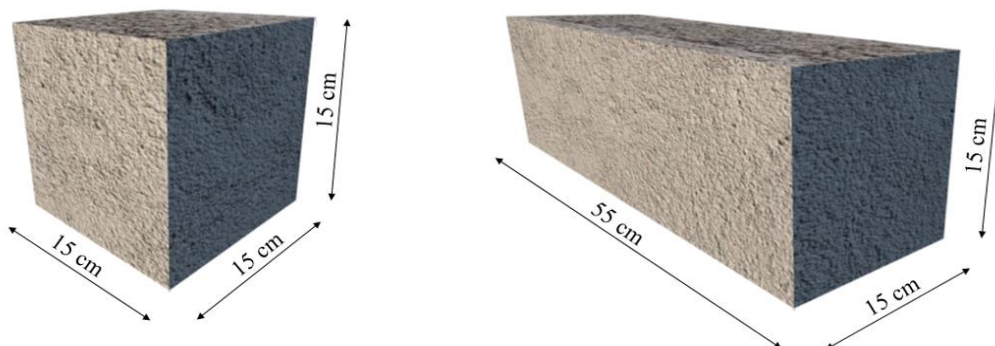
**Figura 29 - Máquina de compressão.**

Fonte: Matest S.p.A. [55].

### 5.3 Metodologia

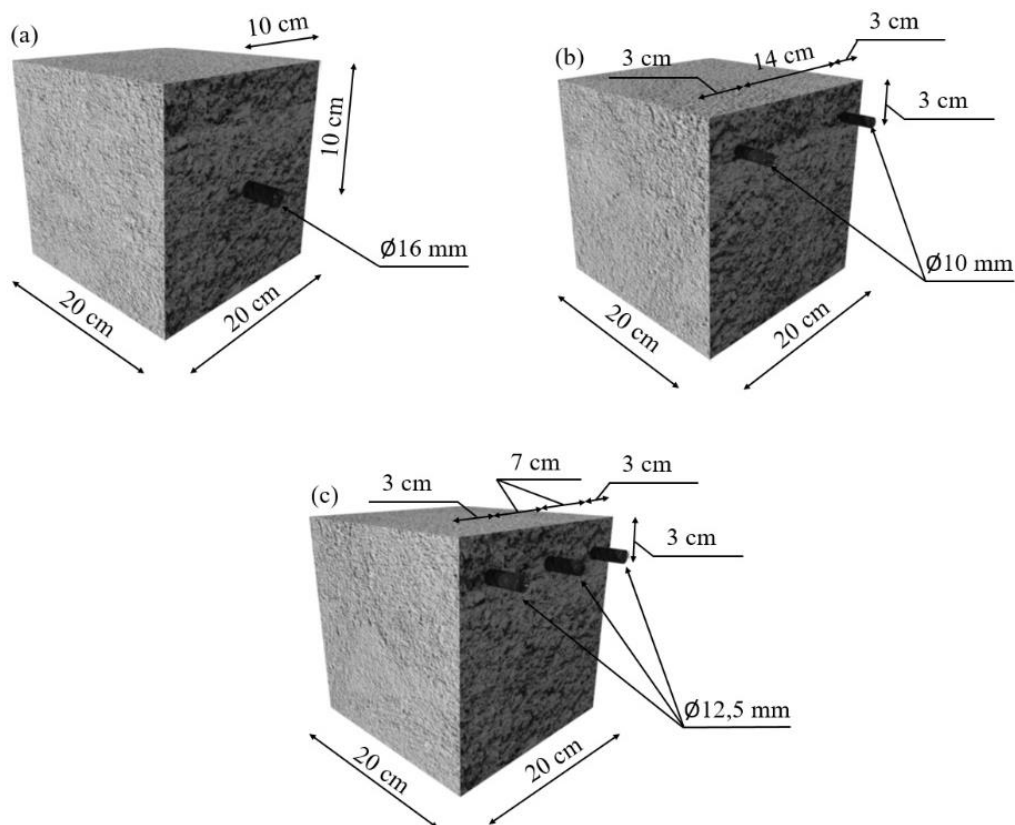
#### 5.3.1. Provetes

O programa experimental desenvolveu-se sobre dezoito provetes de betão simples de dimensões  $15\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ , de acordo com a NP EN 12390-2 [56], três prismas com dimensões  $15\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 55\text{ cm}$ , conforme representados na Figura 30, produzidos em laboratório para este trabalho. Foram igualmente utilizados neste estudo três provetes cúbicos de 20 cm de lado em betão armado que foram confeccionados no ano 2009, no Laboratório de Materiais de Construção da ESTiG para trabalhos académicos (ver Figura 31).



**Figura 30 - Representação dos provetes cúbicos e primas de betão simples.**

Fonte: Autoria própria.



**Figura 31 - Representação dos provetes de betão armado.**

Fonte: Autoria própria.

Para a produção das peças de betão simples foram rodados três betões com proporções diferentes, designados de T1, T2 e T3. As proporções utilizadas de cimento, areia, brita e água estão descritas na Tabela 7.

**Tabela 7 - Proporções, em massa, utilizadas para as produções de betão.**

Proporção	Cimento	Areia	Brita	Água
T1	1	1,28	2,28	0,40
T2	1	1,95	2,95	0,50
T3	1	1,28	2,28	0,55

Fonte: Autoria própria.

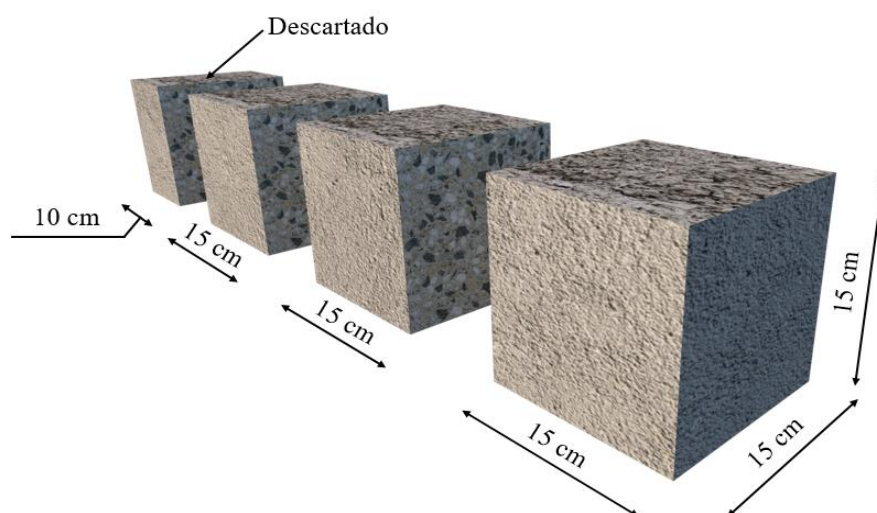
Foram produzidos seis provetes cúbicos, numerados de um a seis, para cada composição de betão, totalizando dezoito provetes. Sendo assim, o provete cúbico número um, confeccionado com o betão da proporção T1, recebeu o nome de C1-T1 e assim sucessivamente (Cn-T1, Cn-T2 e Cn-T3 com n=6).

Dos três prismas produzidos, dois foram confeccionados com o betão de composição T2 e um com o betão da proporção T1, ficando designados por P1-T2 e P2-T2, para a composição T2 e P1-T1 para a composição T1.

Os provetes de betão armado existentes no laboratório foram designados conforme a Figura 31, por (a) BA1, (b) BA2, (c) BA3. Relativamente a estes provetes não foi possível obter informação acerca da composição do betão nem sobre condições de cura. Contudo, foi garantido que foram produzidos a partir de betão de um mesmo lote e tiveram as mesmas condições de cura.

Os provetes cúbicos de betão simples (Cn-T1, Cn-T2 e Cn-T3) foram submetidos a cura húmida por 28 dias, sendo ensaiados pelo método do ultrassom nas idades de 3, 7, 14 e 28 dias e ensaiados à compressão aos 28 dias.

Os provetes prismáticos (P1-T1, P1-T2 e P2-T2) foram submetidos a cura húmida por 28 dias após o que ficaram expostos ao ar até à idade de 90 dias. Na idade de 90 dias foram realizados ensaios de ultrassom, “pull-off”, dureza superficial e ensaio de compressão. Os primeiros ensaios com o ultrassom ocorreram com os prismas intactos, para os demais ensaios os prismas foram cortados em três provetes de dimensões 15 cm × 15 cm × 15 cm, e uma sobra de dimensões 10 cm × 15 cm × 15 cm foi descartada, conforme representado na Figura 32.



**Figura 32 - Representação dos provetes prismáticos após o corte.**

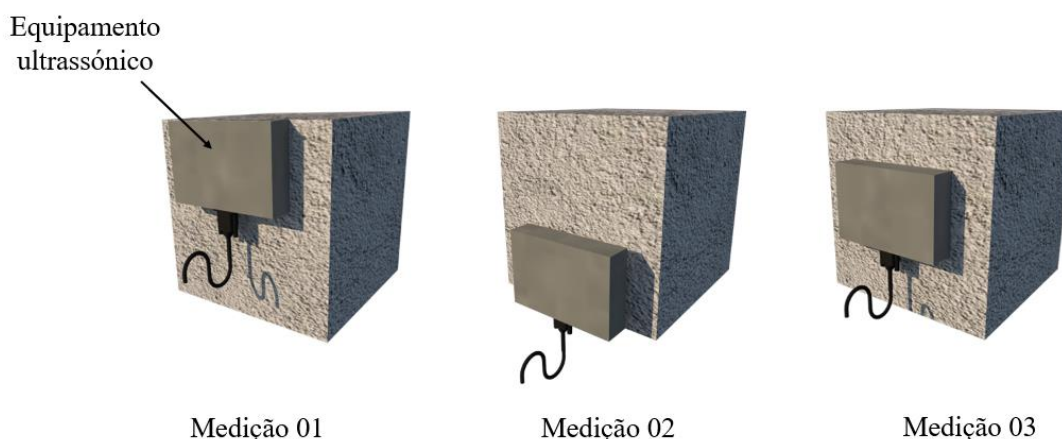
Fonte: Autoria própria.

Os trechos dos provetes prismáticos, exceto a parte descartada, foram numerados de um a três e nomeados de acordo com o número do prisma e a proporção do betão. O primeiro trecho do prisma de proporção T2 recebeu o nome de P1-T2.1.

A composição da calda de injeção utilizada na confecção dos provetes cilíndricos é constituída por 70% de cal hidráulica do tipo HL-5 e por 30% de cimento Portland branco de calcário do tipo CEM 32,5 R, além disso foi acrescentado na mistura aditivo plastificante em uma quantidade de 0,3% da massa total. Os provetes cilíndricos tinham o diâmetro de 15 cm e a altura de 30 cm, onde cerca de 50% do volume total era composto por calda de injeção e 50% composto por brita de origem granítica. Estes receberam a designação de PCn, com n=6.

### 5.3.2. Ensaios de ultrassom

O equipamento ultrassónico foi utilizado nos provetes de betão simples (Cn-T1, Cn-T2 e Cn-T3) para medir a velocidade de pulso, e com esse valor, poder estimar o módulo de elasticidade e a resistência à compressão. O aparelho foi colocado no modo de medição de velocidade de pulso, modo que requer que seja estabelecida a distância na qual o pulso deve ser medido, essa distância será o valor em milímetros entre a face que terá contado com o equipamento ultrassónico e a face oposta do provete, no caso 150 mm. A velocidade de pulso ultrassónico foi medida em três regiões dos provetes, no topo, na base e no centro, conforme representado na Figura 33.



**Figura 33 - Representação das medições com equipamento ultrassónico em provetes cúbicos de betão simples.**

Fonte: Autoria própria.

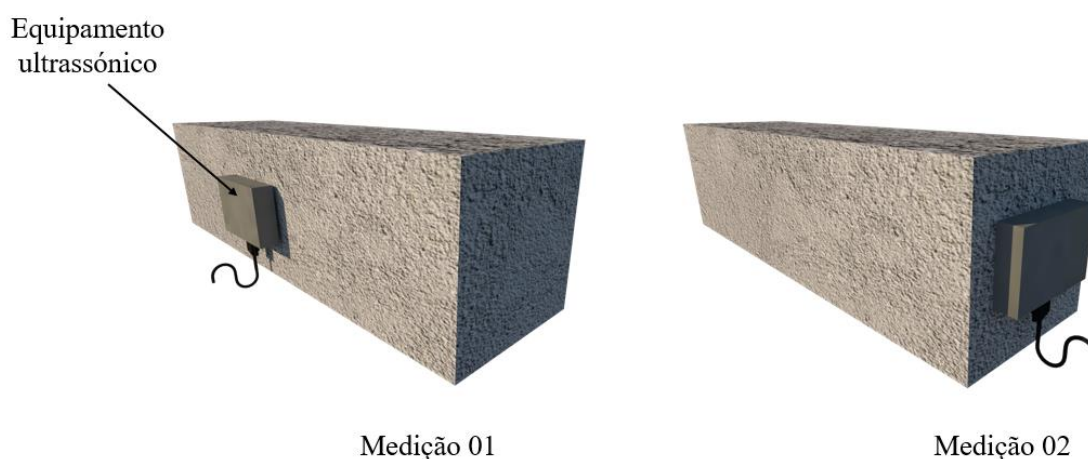
Os provetes que apresentaram velocidades de pulsos diferentes entre as medições foram verificados com outro tipo de medição. O aparelho foi colocado na função de medir a distância que um pulso ultrassônico percorre em um material a partir da predefinição da velocidade desse pulso. Foram testados os valores obtidos nas três medições e a velocidade de pulso que retornou ao aparelho a distância de 150 mm em mais pontos distintos foi a velocidade definida como sendo a representativa do provete.

Foram realizados ensaios de velocidade de pulso nos provetes cúbicos de betão simples nas idades de 3, 7, 14, 21 e 28 dias conforme representado na Figura 33.

Nos provetes prismáticos (P1-T1, P1-T2 e P2-T2) os ensaios ocorreram na idade de 90 dias, primeiramente o equipamento foi utilizado, através dos modos de medição de velocidade de pulso e posteriormente o de distância, para uma rápida verificação da uniformidade da peça.

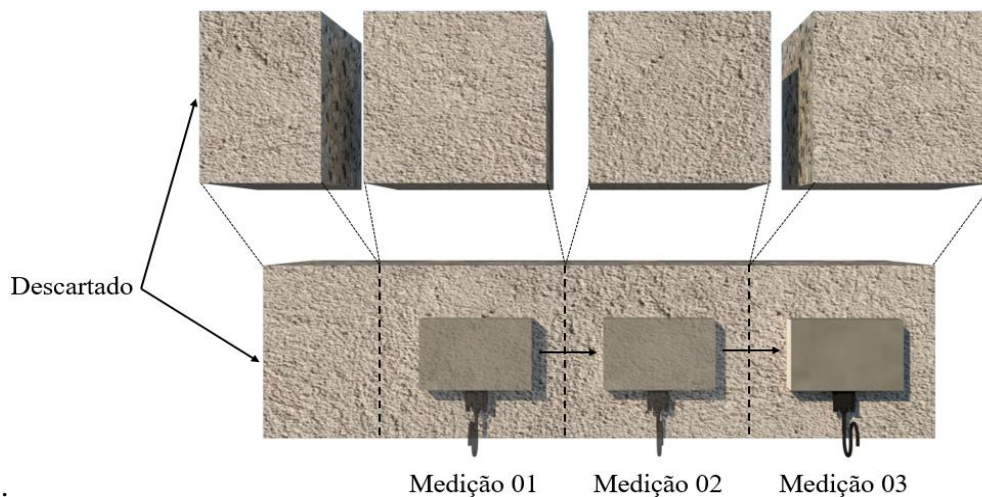
No centro da face maior do prisma foi realizada a medição 01, velocidade de pulso para a distância configurada de 150 mm, e na face menor foi realizada a medição 02, a distância percorrida pelo pulso ultrassônico configurado para a velocidade obtida na medição 01, conforme a Figura 34.

Após a verificação rápida foram feitas mais três medições de velocidade de pulso ultrassônico nos provetes prismáticos para ter uma melhor perspectiva da uniformidade da peça. O local das medições foi coincidente com o centro dos cortes que seriam realizados, conforme mostra a Figura 35.



**Figura 34 - Representação da verificação rápida de uniformidade dos provetes prismáticos com equipamento ultrassônico.**

Fonte: Autoria própria.



**Figura 35 - Representação de medições de velocidade de pulso nos provetes prismáticos para verificação de uniformidade prevendo os futuros cortes.**

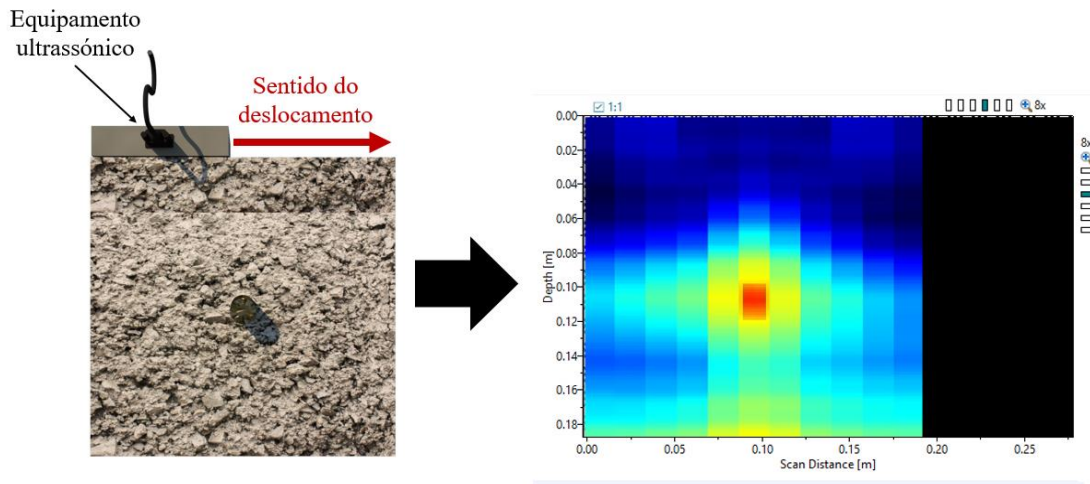
Fonte: Autoria própria.

Os trechos cortados dos provetes prismáticos (P1-T1.n, P1-T2.n e P2-T2.n com n=3) também foram ensaiados quanto a velocidade de pulso ultrassônico, conforme a Figura 33, para estimar com maior precisão o módulo de elasticidade e a resistência à compressão de cada um destes trechos. Esses ensaios também ocorreram na idade de 90 dias. Não foram realizados ensaios nos trechos descartados com dimensões de 10 cm × 15 cm × 15 cm.

Os provetes de betão armado (BA1, BA2 e BA3) foram ensaiados com o modo de medição B-Scan conforme apresentado no item 4.4.3. Nesse tipo de medição é necessário definir a velocidade do pulso ultrassônico que será utilizada para gerar a imagem transversal.

O objetivo de ensaiar os provetes de betão armado no modo B-Scan foi tentar visualizar os varões internos com uma certa precisão. Foram feitos diversos ensaios com velocidades de pulso ultrassônicos diferentes até se obter uma imagem próxima à realidade.

A Figura 36 apresenta como foi realizado o ensaio e a melhor imagem obtida. Como os restantes provetes de betão armado foram confeccionados com o mesmo betão de mesmo lote, os parâmetros encontrados para o provete BA1 foram repetidos nos ensaios dos provetes BA2 e BA3 cujo os resultados serão apresentados e discutidos no capítulo 6.

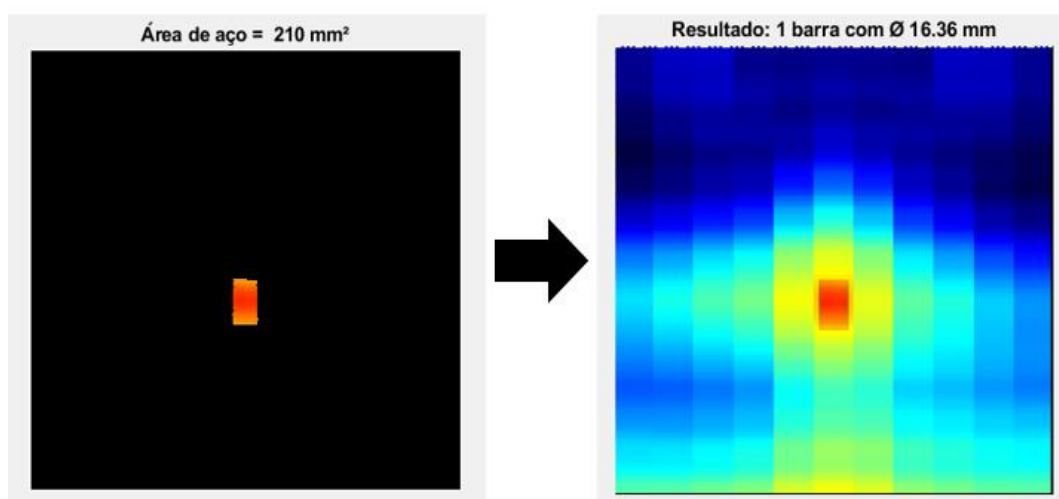


**Figura 36 - Representação do tipo de medição B-Scan e imagem transversal gerada do provete BA1.**

Fonte: Autoria própria.

Com o auxílio do software MATLAB foi estudada a composição da imagem em termos de RGB, sistema de cores, vermelho (“*Red*”), verde (“*Green*”) e azul (“*Blue*”), que são combinadas para gerar o espectro cromático que compõe as imagens digitais.

Conhecendo os valores de R, G e B, que na linguagem de programação utilizada variam de 0 a 255, da parte da imagem que corresponde ao aço, foi possível desenvolver um código, disponível no Anexo 3, para isolar o aço da imagem, calcular sua respectiva área e estimar a área da secção do varão conforme análise apresentada na Figura 37.

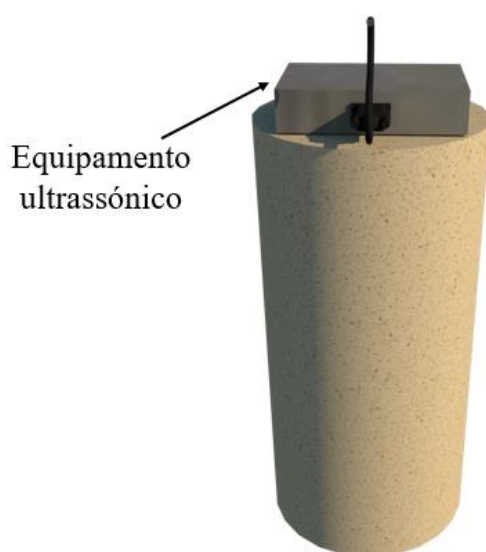


**Figura 37 - Resultado de análise realizada com o software MATLAB para o provete BA1.**

Fonte: Autoria própria.

Os provetes de betão armado também foram ensaiados para a velocidade de pulso ultrassónico, conforme a Figura 33, para estimar o módulo de elasticidade e a resistência à compressão desses provetes.

Os provetes cilíndricos de calda de injeção (PCn) foram ensaiados para a velocidade de pulso com o aparelho ultrassónico em contato com a face circular superior do provete, conforme representado na Figura 38. As velocidades medidas foram verificadas colocando o modo de medição em distância e foram adotadas as velocidades que apresentaram o menor erro de verificação para cada provete.

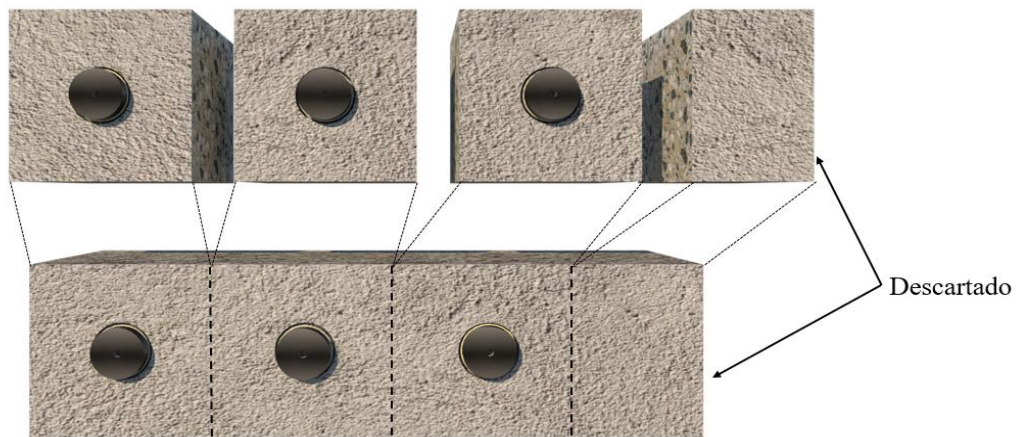


**Figura 38 - Representação das medições com equipamento ultrassónico em provetes cilíndricos de calda de injeção.**

Fonte: Autoria própria.

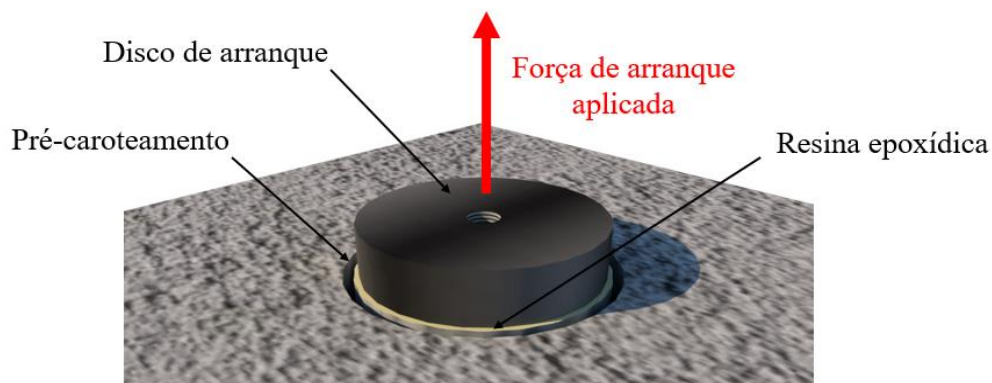
### 5.3.3. Ensaio de arrancamento “pull-off”

Os ensaios de arrancamento “pull-off” foram realizados nos prismas, após serem cortados conforme Figura 32, na idade de 90 dias. A preparação para o ensaio ocorreu 48 horas antes da execução. No centro dos cortes que seriam realizados nos prismas, foi feito o pré-caroteamento com diâmetro de 50 mm e profundidade média de 1 cm e as pastilhas de arranque com diâmetro de 48 mm foram coladas aos provetes usando resina epoxídica, conforme Figura 39 e detalhe da Figura 40.



**Figura 39 - Representação da preparação do ensaio de arrancamento "pull-off".**

Fonte: Autoria própria.



**Figura 40 - Detalhamento do ensaio "pull-off".**

Fonte: Autoria própria.

O arrancamento da pastilha foi realizado com o equipamento DY-216 produzido pela empresa Proceq, apresentado na Figura 27. Após a realização do ensaio foi necessário caracterizar o tipo de rotura que ocorreu em cada um dos casos para poder validar os resultados obtidos, a rotura pode ser adesiva ou coesiva, conforme explicado no item 3.2.

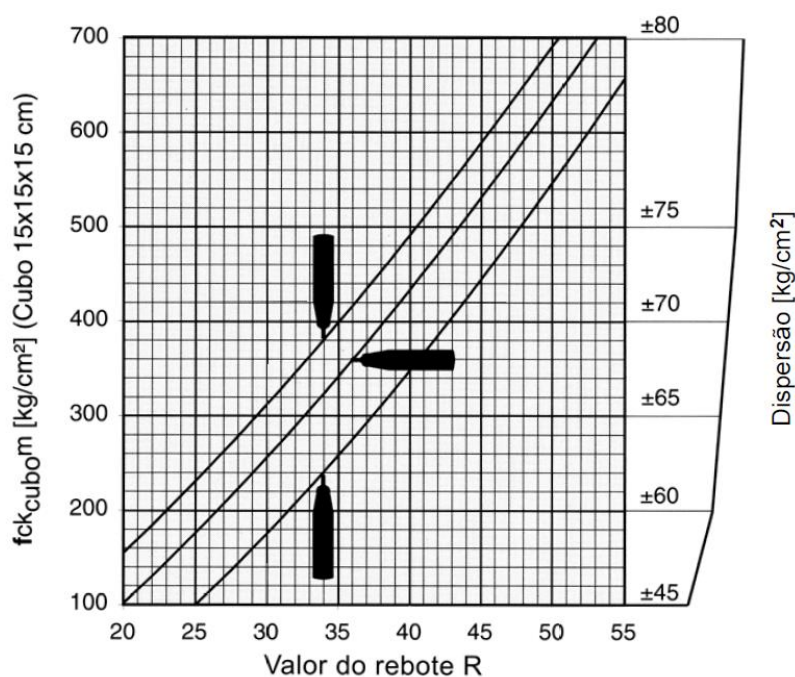
A preparação para o ensaio “pull-off” nos provetes prismáticos foi realizada na face oposta da qual foram realizados os ensaios com o equipamento ultrassónico, para que essa preparação, que ocorreu na idade de 88 dias, não influenciasse nos ensaios de ultrassom, que ocorreram na idade de 90 dias. O arrancamento da pastilha desenvolveu-se após o corte dos provetes prismáticos, conforme Figura 32.

### 5.3.4. Ensaio do esclerómetro

O ensaio com o esclerómetro de Schmidt foi realizado nos trechos cortados dos provetes prismáticos, conforme Figura 32, na mesma face em que foram realizados os ensaios de ultrassom, uma vez que o ensaio de ultrassom não causou danos à superfície de teste e o ensaio “pull-off” causou pequenos danos à superfície ensaiada.

O ensaio foi realizado na idade de 90 dias como equipamento sempre na vertical. Foram realizadas 3 medições para cada trecho cortado dos provetes prismáticos, sendo 9 medições por prisma e 27 medições ao total.

O equipamento utilizado foi o martelo de teste de betão modelo NR da empresa Proceq, conforme Figura 28. Este equipamento apresenta no manual técnico um gráfico que permite estimar o valor da resistência à compressão do provete a partir do valor do ressalto, referente a provetes cúbicos com idade superior a 56 dias, ver Figura 41.



**Figura 41 - Curva de conversão do ensaio do esclerómetro considerando o ângulo da realização do ensaio.**

Fonte: Proceq SA [50].

### 5.3.5. Ensaio de compressão

Os ensaios à compressão foram realizados conforme a NP EN 12390-4 [56] utilizando a máquina de compressão da empresa Matest apresentada na Figura 29. Todos

os provetes e trechos de provetes, exceto a parte descartada dos prismas após o corte, foram ensaiados à compressão.

Os dezoito provetes de betão simples foram ensaiados na idade de 28 dias após os ensaios com o ultrassom. Os trechos dos provetes prismáticos foram ensaiados na idade de 90 dias, após os três ensaios não-destrutivos realizados no mesmo dia. A face na qual foi realizada o ensaio de “pull-off”, dos trechos dos prismas, não ficaram em contato com nenhum dos dois discos da máquina de compressão.

Por fim, os provetes de betão armado foram igualmente ensaiados, posicionados na máquina de compressão de forma que os varões de aço ficassem paralelos aos discos do equipamento.

## 6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Após o trabalho experimental descrito pretende-se no presente capítulo fazer uma análise exaustiva dos resultados obtidos cujo objetivo principal se baseia na compreensão da potencialidade dos ensaios com o aparelho ultrassônico.

### 6.1. Provetes cúbicos de betão simples

Os dezoito provetes cúbicos de betão simples (Cn-T1, Cn-T2 e Cn-T3) foram ensaiados à compressão aos 28 dias de idade e igualmente ensaiados com o equipamento de ultrassons, conforme representado na Figura 33, nas idades de 3, 7, 14, 21 e 28 dias. Foram feitas medições respetivamente, no topo, na base e no centro, e os valores obtidos aos 28 dias estão apresentados na Tabela 8. Após as medições de velocidade de pulso, o aparelho foi colocado no modo de medir distância e as três medições foram testadas em diversos pontos dos provetes para definir a medição que seria mais representativa.

**Tabela 8 - Medições provetes cúbicos na idade de 28 dias e valores mais representativos.**

Provete	Velocidade de pulso (m/s)		
	Medição 01	Medição 02	Medição 03
C1-T1	2098	<b>2139</b>	<b>2139</b>
C2-T1	<b>2098</b>	2069	<b>2098</b>
C3-T1	2098	<b>2116</b>	<b>2116</b>
C4-T1	2139	<b>2116</b>	<b>2116</b>
C5-T1	<b>2083</b>	2069	<b>2083</b>
C6-T1	<b>2083</b>	2069	<b>2083</b>
C1-T2	2041	<b>2055</b>	2041
C2-T2	2041	2041	<b>2055</b>
C3-T2	2055	2055	<b>2069</b>
C4-T2	<b>2083</b>	<b>2083</b>	<b>2083</b>
C5-T2	2019	2015	<b>2028</b>
C6-T2	<b>2055</b>	2083	2069
C1-T3	2027	<b>2013</b>	<b>2013</b>
C2-T3	2027	2041	<b>2055</b>
C3-T3	<b>2041</b>	2055	<b>2041</b>
C4-T3	2027	2027	<b>2041</b>
C5-T3	2000	<b>2027</b>	2013
C6-T3	2013	<b>2000</b>	2013

Fonte: Autoria própria.

Os valores a negrito na Tabela 8, são os valores que no modo de medição de distância retornou um maior número de vezes o valor correto de 150 mm.

É interessante observar que em quinze dos dezoito provetes a medição mais representativa foi a realizada no centro, e em apenas nove provetes o valor mais significativo se repetiu em mais de um ponto de medição.

Os valores em negrito foram utilizados para a estimativa do módulo de elasticidade e da resistência à compressão dos provetes, conforme Tabela 10. Primeiramente foi utilizada a Equação 21 para a partir da velocidade de pulso,  $V_{echo}$ , encontrada pelo aparelho ultrassônico PL-200PE, conforme a Figura 26, fosse possível definir uma velocidade de pulso de compressão equivalente.

Os resultados obtidos pela Equação 21 foram aplicados na Equação 10 e o resultado foi dividido por 1,05, estimando assim o módulo de elasticidade de cada provete. A resistência à compressão característica,  $f_{ck}$ , de cada provete foi calculada por três diferentes métodos. O primeiro método através da Equação 23 reproduzida do Eurocódigo 2 (EC2) de 2000 [43].

$$E_{cm} = 9,5 \cdot (f_{ck} + 8)^{1/3} \quad (23)$$

Na equação anterior,  $E_{cm}$  é o valor do módulo de elasticidade expresso em GPa e  $f_{ck}$  é o valor da resistência característica do betão expressa em MPa.

O segundo método foi pela Equação 12 reproduzida do Eurocódigo 2 atualmente em vigor [44] e o terceiro método foi pela Equação 17 reproduzida da NBR 6118:2007 [45].

Com os valores de  $f_{ck}$ , resistência característica para provete cilíndricos, calculados para os três métodos diferentes, os valores de  $f_{ck,cube}$ , resistência característica para provetes cúbicos, foram definidos a partir de interpolação numérica considerando o quadro 3.1 do Eurocódigo 2 [44] conforme Tabela 9.

**Tabela 9 - Trecho do quadro 3.1 do Eurocódigo 2.**

Classe	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55
$f_{ck}$ (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55

Fonte: Adaptado do Eurocódigo 2 [44].

**Tabela 10 - Módulo de elasticidade e resistência à compressão dos provetes cúbicos estimados pela velocidade de pulso ultrassônico, resistência à compressão pelo ensaio destrutivo e respetivos erros.**

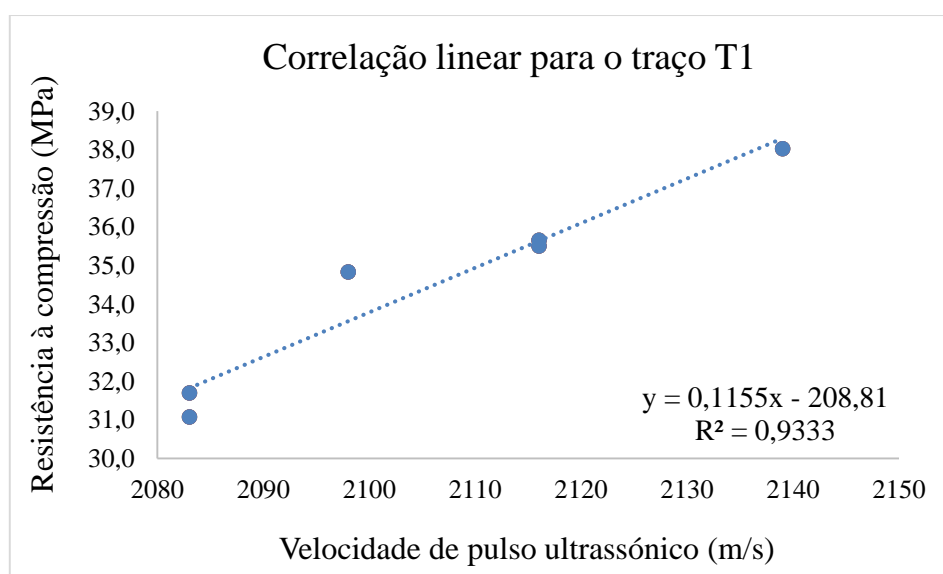
Provete	Velocidad	Velocidade	$E_{cm}$ (GPa)	Resistência pelo		Resistência pelo		Resistência pela		Resistência	Erro EC2 (2000)	Erro EC2 (2010)	Erro NBR
	e de	de pulso de		EC2 (2000)	EC2 (2010)	NBR (MPa)	ensaio à	compressão (MPa)					
	pulso,	compressão,		(MPa)	(MPa)		compressão						
$V_{echo}$ (m/s)	$V$ (m/s)	$f_{ck}$	$f_{ck,cube}$	$f_{ck}$	$f_{ck,cube}$	$f_{ck}$	$f_{ck,cube}$	(MPa)					
C1-T1	2139	4022	33,3	35,0	45,0	31,7	39,8	27,3	33,2	38,0	18,33%	4,63%	-12,56%
C2-T1	2098	3945	32,0	30,3	37,4	26,9	32,7	24,7	29,7	34,8	7,35%	-6,12%	-14,77%
C3-T1	2116	3979	32,6	32,3	40,7	29,0	35,6	25,8	31,2	35,5	14,56%	0,19%	-12,25%
C4-T1	2116	3979	32,6	32,3	40,7	29,0	35,6	25,8	31,2	35,7	14,07%	-0,24%	-12,61%
C5-T1	2083	3917	31,6	28,7	35,1	25,3	30,3	23,8	28,8	31,7	10,86%	-4,40%	-9,24%
C6-T1	2083	3917	31,6	28,7	35,1	25,3	30,3	23,8	28,8	31,1	13,07%	-2,49%	-7,43%
C1-T2	2055	3864	30,7	25,8	31,1	22,4	27,4	22,1	27,1	27,5	13,24%	-0,24%	-1,46%
C2-T2	2055	3864	30,7	25,8	31,1	22,4	27,4	22,1	27,1	27,8	11,85%	-1,46%	-2,66%
C3-T2	2069	3891	31,1	27,2	33,1	23,8	28,8	22,9	27,9	28,1	17,91%	2,72%	-0,55%
C4-T2	2083	3917	31,6	28,7	35,1	25,3	30,3	23,8	28,8	29,0	21,02%	4,36%	-0,92%
C5-T2	2028	3813	29,9	23,2	28,2	19,9	24,8	20,5	25,5	25,6	10,48%	-2,85%	-0,05%
C6-T2	2055	3864	30,7	25,8	31,1	22,4	27,4	22,1	27,1	28,0	11,33%	-1,92%	-3,12%
C1-T3	2013	3785	29,5	21,9	26,9	18,5	23,1	19,7	24,6	22,9	17,12%	0,87%	7,36%
C2-T3	2055	3864	30,7	25,8	31,1	22,4	27,4	22,1	27,1	25,7	21,12%	6,71%	5,40%
C3-T3	2041	3838	30,3	24,4	29,4	21,1	26,1	21,3	26,3	24,3	21,23%	7,32%	8,18%
C4-T3	2041	3838	30,3	24,4	29,4	21,1	26,1	21,3	26,3	24,6	19,95%	6,19%	7,03%
C5-T3	2027	3812	29,9	23,1	28,1	19,8	24,7	20,5	25,5	23,3	20,91%	6,17%	9,51%
C6-T3	2000	3761	29,1	20,7	25,7	17,4	21,7	19,0	23,7	22,0	16,84%	-1,28%	7,83%

Fonte: Autoria própria.

Pode observar-se na Tabela 10 que o Eurocódigo 2 [44] atualmente em vigor apresentou o menor erro de estimativa da resistência à compressão, com erros variando de -6,12% a 7,32%, o erro médio calculado a partir dos módulos foi de 3,34% e o coeficiente de variação dos erros foi de 71,03%. A Norma Brasileira NBR 6118:2007 [45] apresentou o erro intermediário entre os três métodos testados, variando de -14,77% a 9,51%, o erro médio calculado a partir dos módulos foi de 6,83% e o coeficiente de variação dos erros foi de 15,38%, é interessante observar que em quatro provetes, C3-T2, C4-T2, C5-T2, C2-T3 o erro da estimativa pela Norma Brasileira foi o menor em módulo.

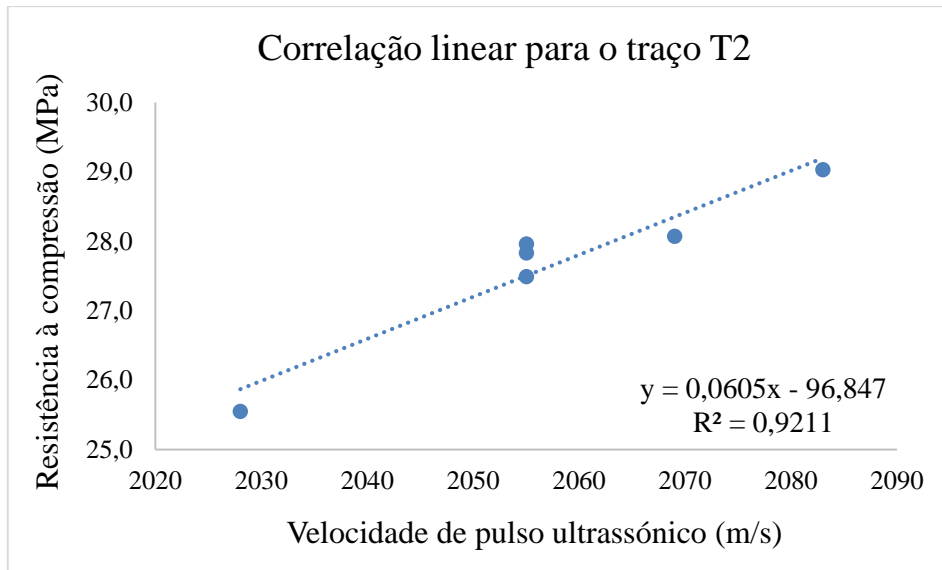
A estimativa da resistência à compressão pelo Eurocódigo de 2000 [43] apresentou o maior erro entre os métodos testados, com valores variando de 7,35% a 21,93%, o erro médio calculado a partir dos módulos foi de 15,62% e o coeficiente de variação dos erros foi de 26,97%. Diferente dos outros dois métodos, utilizando a Equação 23 reproduzida do Eurocódigo de 2000, todos os erros foram positivos. Em apenas um provete, C2-T1, a estimativa feita por esta equação foi mais precisa que pela Norma Brasileira e não houve nenhum caso em que teve mais precisão que o Eurocódigo de 2010.

Para prosseguir o estudo foram geradas correlações lineares, com o auxílio do software Excel, apenas com a velocidade de pulso ultrassônico medida pelo aparelho Pundit PL-200PE e a resistência à compressão obtida pelo ensaio destrutivo, conforme item 3.4. O Gráfico 1 apresenta a reta, e a sua respectiva equação, para o traço T1, o Gráfico 2 para o traço T2 e o Gráfico 3 para o traço T3.



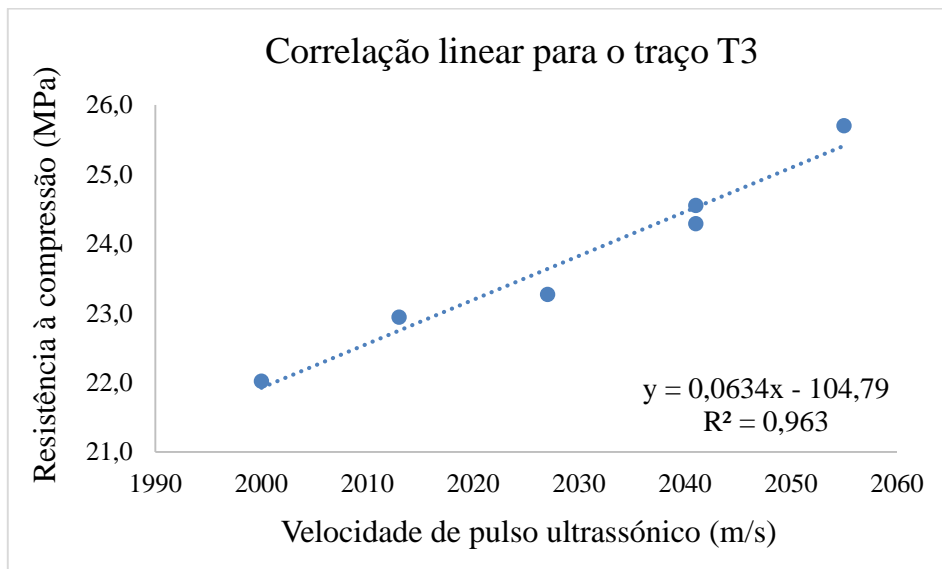
**Gráfico 1 - Correlação linear para o traço T1.**

Fonte: Autoria própria.



**Gráfico 2 - Correlação linear para o traço T2.**

Fonte: Autoria própria.



**Gráfico 3 - Correlação linear para o traço T3.**

Fonte: Autoria própria.

Observa-se, pela análise das retas, que foi possível estabelecer uma relação entre a velocidade de pulso ultrassônico aferido em ensaio e a resistência à compressão do betão, com um grau de confiança superior a 92%, através de um ajuste linear.

É importante ressaltar que para atingir um grau de confiança mais elevado, é necessário estabelecer as retas de correlação para cada traço e lote de betão separados. Os três gráficos, e suas respectivas equações, apresentam equações distintas para cada grupo de provetes.

Como dito anteriormente, os provetes cúbicos de betão simples foram ensaiados pelo método do ultrassom nas idades de 3, 7, 14 e 21 dias, além da idade de 28 dias. Os ensaios ocorreram conforme Figura 33 e os valores também foram verificados pelo método de medição de distância, de forma que foi definida o valor da velocidade de pulso característica para cada idade mencionada em todos os dezoito provetes.

Através das velocidades de pulso ultrassónico foram gerados gráficos de ganhos de resistência para todos os provetes cúbicos de betão simples. Os dados foram tratados como apresentado anteriormente para a idade de 28 dias. Primeiramente foi utilizada a Equação 21 para encontrar a velocidade de pulso de compressão equivalente para cada valor definido como característico de cada provete em cada idade.

Para a estimativa do módulo de elasticidade foi utilizada a Equação 10 a partir do valor obtido pela Equação 21 e o resultado foi dividido por 1,05. Para efeitos comparativos, a resistência à compressão,  $f_{ck}$ , foi calculado por dois métodos, pela Equação 12 reproduzida do Eurocódigo 2 [44] atualmente em vigor e pela Equação 17 reproduzida da NBR 6118:2007 [45]. Com os valores de  $f_{ck}$  calculados, os valores de  $f_{ck,cube}$  foram encontrados através de interpolação numérica utilizando o trecho do quadro 3.1 do Eurocódigo 2 [44] conforme Tabela 9. Após os ensaios de compressão, conhecendo a resistência característica à compressão de cada provete, foi realizado também o gráfico ideal do ganho de resistência a partir de retroanálise utilizando a Equação 14.

A Tabela 11 apresenta os valores do ensaio de ultrassom e os valores calculados do módulo de elasticidade e resistência à compressão para os provetes cúbicos para as idades de 3 e 7 dias. A Tabela 12 apresenta os valores para as idades de 14 e 21 dias.

Na Tabela 10 é possível observar os valores para a idade de 28 dias, assim como a resistência à compressão de cada provete encontrada pelo ensaio destrutivo, este último utilizado para a retroanálise.

Os Gráficos 3 a 21 apresentam a evolução da resistência estimada através do módulo de elasticidade, obtido pelos resultados do ensaio do ultrassom, utilizando as equações do Eurocódigo 2 [44] (Equação 12, pág. 32) e da Norma Brasileira NBR 6118 [45] (Equação 17, pág. 34), bem como a evolução da resistência pela retroanálise após o ensaio à compressão, para cada um dos dezoito provetes cúbicos de betão simples.

**Tabela 11 - Módulo de elasticidade e resistência à compressão dos provetes cúbicos estimados pela velocidade de pulso ultrassônico para as idades de 3 e 7 dias.**

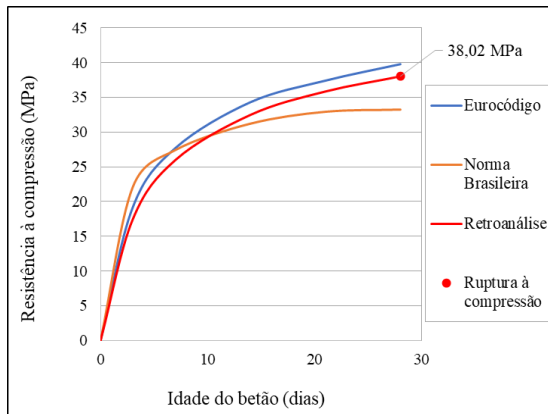
Provete	Idade de 3 dias					Idade de 7 dias				
	Velocidade de pulso, $V_{echo}$ (m/s)	Velocidade de pulso de compressão, $V$ (m/s)	$E_{cm}$ (GPa)	$f_{ck,cube}$ pelo EC2 (2010) (MPa)	$f_{ck,cube}$ pela NBR (MPa)	Velocidade de pulso, $V_{echo}$ (m/s)	Velocidade de pulso de compressão, $V$ (m/s)	$E_{cm}$ (GPa)	$f_{ck,cube}$ pelo EC2 (2010) (MPa)	$f_{ck,cube}$ pela NBR (MPa)
C1-T1	1911	3713	28,4	19,1	22,1	2013	3860	30,6	27,7	27,4
C2-T1	1899	3690	28,0	17,9	21,3	1987	3810	29,9	24,6	25,5
C3-T1	1875	3643	27,3	15,7	19,7	1987	3810	29,9	24,6	25,5
C4-T1	1899	3690	28,0	17,9	21,3	2000	3835	30,2	26,1	26,5
C5-T1	1852	3598	26,6	13,6	18,3	1948	3735	28,7	20,3	22,8
C6-T1	1863	3620	27,0	14,6	19,0	1948	3735	28,7	20,3	22,8
C1-T2	1852	3598	26,6	13,6	18,3	1948	3735	28,7	20,3	22,8
C2-T2	1852	3598	26,6	13,6	18,3	1935	3710	28,3	19,0	22,0
C3-T2	1852	3598	26,6	13,6	18,3	1948	3735	28,7	20,3	22,8
C4-T2	1875	3643	27,3	15,7	19,7	1974	3785	29,5	23,1	24,6
C5-T2	1835	3565	26,1	12,2	17,3	1923	3687	28,0	17,8	21,2
C6-T2	1843	3581	26,4	12,9	17,7	1923	3687	28,0	17,8	21,2
C1-T3	1818	3532	25,7	10,9	16,3	1923	3687	28,0	17,8	21,2
C2-T3	1852	3598	26,6	13,6	18,3	1948	3735	28,7	20,3	22,8
C3-T3	1840	3575	26,3	12,6	17,6	1923	3687	28,0	17,8	21,2
C4-T3	1840	3575	26,3	12,6	17,6	1935	3710	28,3	19,0	22,0
C5-T3	1829	3554	26,0	11,8	16,9	1911	3664	27,6	16,7	20,4
C6-T3	1807	3511	25,4	10,1	15,6	1899	3641	27,3	15,6	19,6

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 12 - Módulo de elasticidade e resistência à compressão dos provetes cúbicos estimados pela velocidade de pulso ultrassónico para as idades de 14 e 21 dias.**

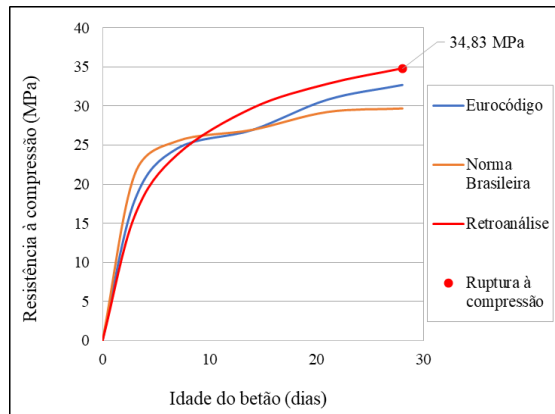
Provete	Idade de 14 dias					Idade de 21 dias				
	Velocidade de pulso, $V_{echo}$ (m/s)	Velocidade de pulso de compressão, $V$ (m/s)	$E_{cm}$ (GPa)	$f_{ck,cube}$ pelo EC2 (2010) (MPa)	$f_{ck,cube}$ pela NBR (MPa)	Velocidade de pulso, $V_{echo}$ (m/s)	Velocidade de pulso de compressão, $V$ (m/s)	$E_{cm}$ (GPa)	$f_{ck,cube}$ pelo EC2 (2010) (MPa)	$f_{ck,cube}$ pela NBR (MPa)
C1-T1	2083	3954	32,2	34,3	31,2	2116	3994	32,8	37,4	32,9
C2-T1	2027	3848	30,5	26,9	27,0	2069	3905	31,4	30,8	29,2
C3-T1	2055	3901	31,3	30,5	29,0	2083	3932	31,8	32,7	30,3
C4-T1	2069	3927	31,7	32,4	30,1	2098	3960	32,3	34,8	31,5
C5-T1	2013	3821	30,0	25,3	26,0	2055	3879	31,0	29,0	28,2
C6-T1	2020	3834	30,2	26,1	26,5	2055	3879	31,0	29,0	28,2
C1-T2	2013	3821	30,0	25,3	26,0	2027	3826	30,1	25,6	26,1
C2-T2	2000	3796	29,6	23,8	25,0	2027	3826	30,1	25,6	26,1
C3-T2	2013	3821	30,0	25,3	26,0	2055	3879	31,0	29,0	28,2
C4-T2	2027	3848	30,5	26,9	27,0	2055	3879	31,0	29,0	28,2
C5-T2	1987	3772	29,3	22,3	24,1	2000	3775	29,3	22,6	24,3
C6-T2	2000	3796	29,6	23,8	25,0	2027	3826	30,1	25,6	26,1
C1-T3	1961	3722	28,5	19,6	22,4	2000	3775	29,3	22,6	24,3
C2-T3	2000	3796	29,6	23,8	25,0	2027	3826	30,1	25,6	26,1
C3-T3	1987	3772	29,3	22,3	24,1	2013	3800	29,7	24,0	25,2
C4-T3	1987	3772	29,3	22,3	24,1	2027	3826	30,1	25,6	26,1
C5-T3	1974	3747	28,9	21,0	23,2	2000	3775	29,3	22,6	24,3
C6-T3	1948	3698	28,1	18,3	21,5	1987	3751	28,9	21,2	23,4

Fonte: Autoria própria



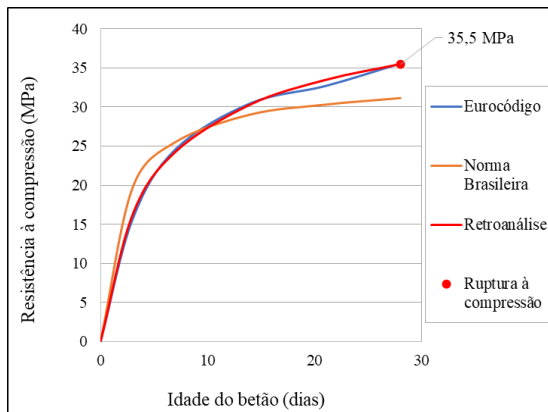
**Gráfico 4 - Evolução da resistência do provete C1-T1.**

Fonte: Autoria própria.



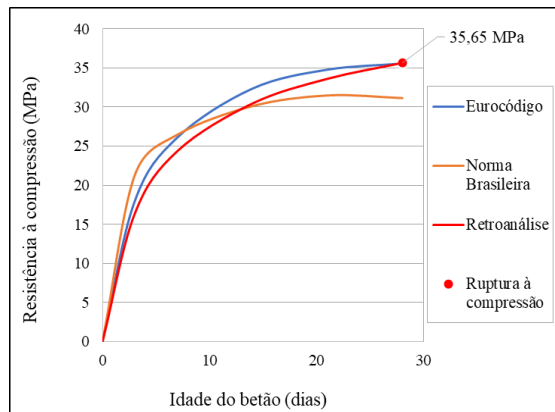
**Gráfico 5 - Evolução da resistência do provete C2-T1.**

Fonte: Autoria própria.



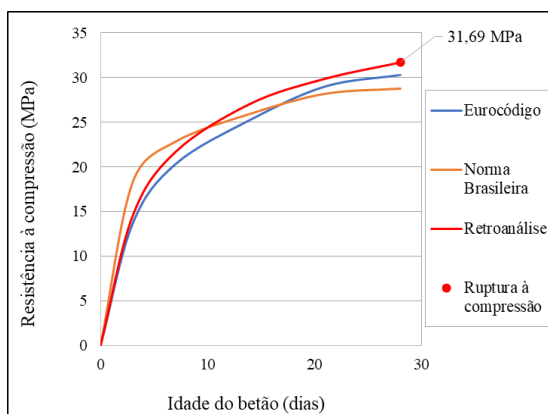
**Gráfico 6 - Evolução da resistência do provete C3-T1.**

Fonte: Autoria própria.



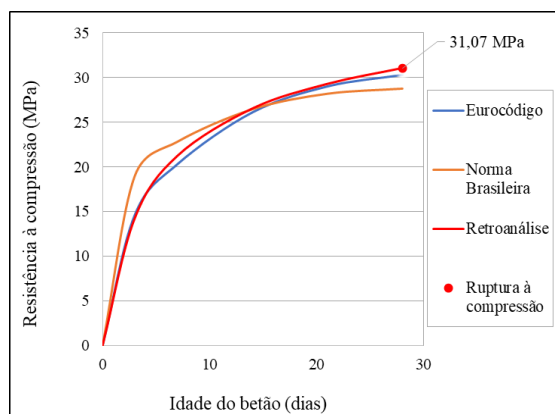
**Gráfico 7 - Evolução da resistência do provete C4-T1.**

Fonte: Autoria própria.



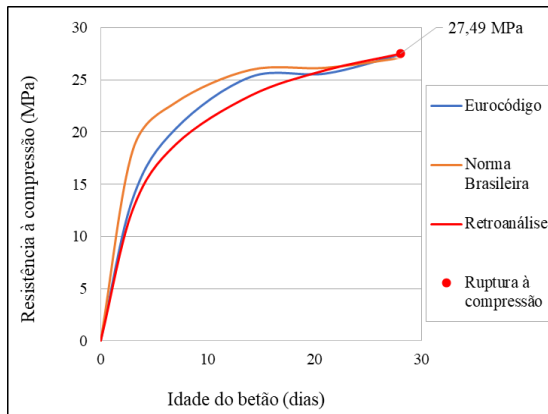
**Gráfico 8 - Evolução da resistência do provete C5-T1.**

Fonte: Autoria própria.



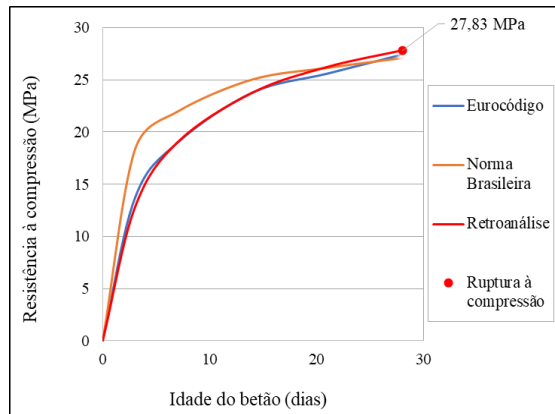
**Gráfico 9 - Evolução da resistência do provete C6-T1.**

Fonte: Autoria própria.



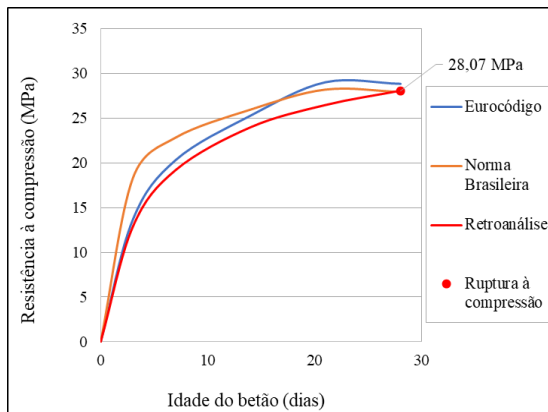
**Gráfico 10 - Evolução da resistência do provete C1-T2.**

Fonte: Autoria própria.



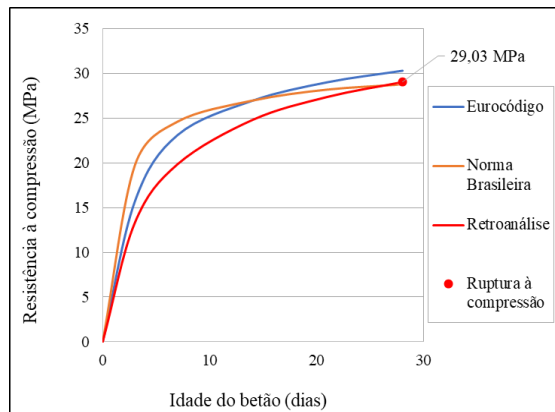
**Gráfico 11 - Evolução da resistência do provete C2-T2.**

Fonte: Autoria própria.



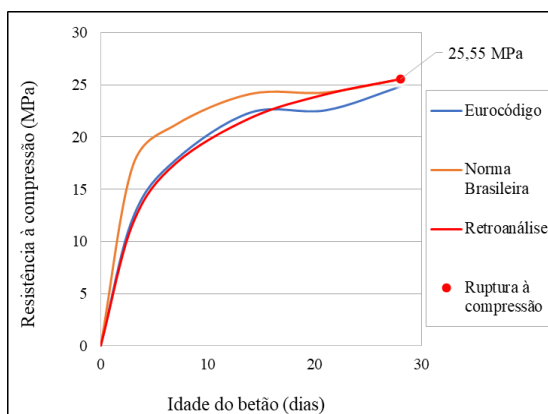
**Gráfico 12 - Evolução da resistência do provete C3-T2.**

Fonte: Autoria própria.



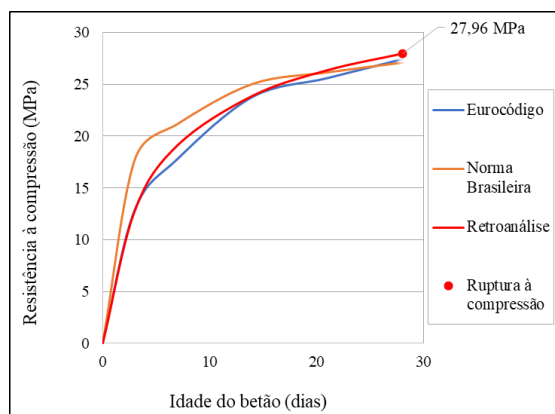
**Gráfico 13 - Evolução da resistência do provete C4-T2.**

Fonte: Autoria própria.



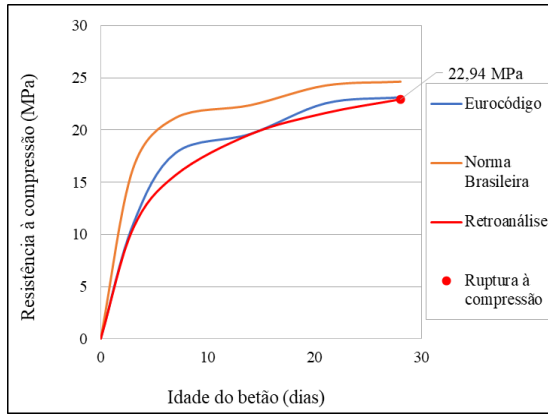
**Gráfico 14 - Evolução da resistência do provete C5-T2.**

Fonte: Autoria própria.



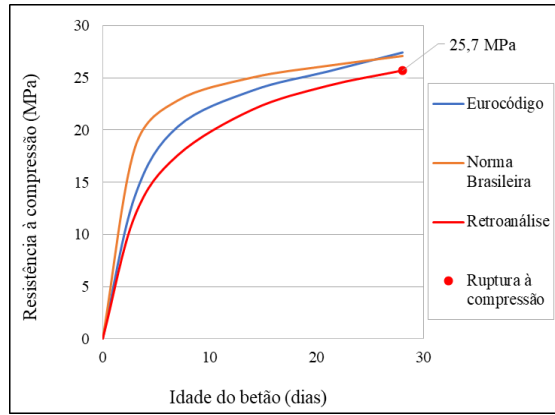
**Gráfico 15 - Evolução da resistência do provete C6-T2.**

Fonte: Autoria própria.



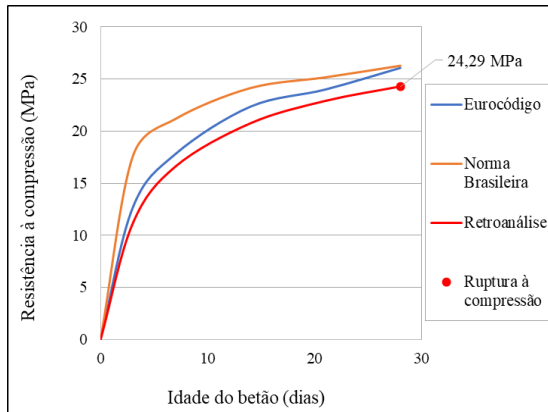
**Gráfico 16 - Evolução da resistência do provete C1-T3.**

Fonte: Autoria própria.



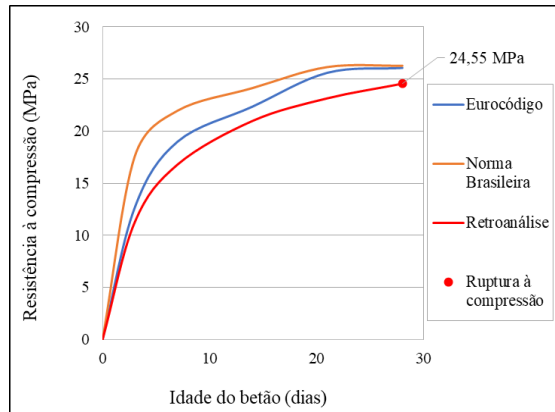
**Gráfico 17 - Evolução da resistência do provete C2-T3.**

Fonte: Autoria própria.



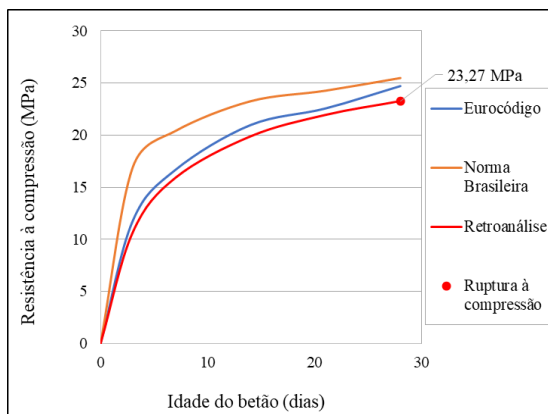
**Gráfico 18 - Evolução da resistência do provete C3-T3.**

Fonte: Autoria própria.



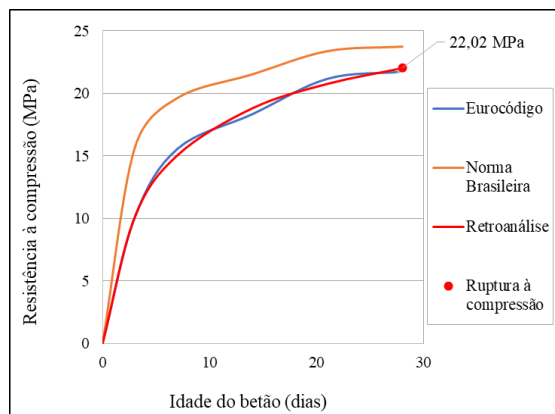
**Gráfico 19 - Evolução da resistência do provete C4-T3.**

Fonte: Autoria própria.



**Gráfico 20 - Evolução da resistência do provete C5-T3.**

Fonte: Autoria própria.



**Gráfico 21 - Evolução da resistência do provete C6-T3.**

Fonte: Autoria própria.

É possível observar nos Gráficos 3 a 21 que o comportamento do ganho de resistência calculado a partir dos ensaios de ultrassom foram bastante similares ao comportamento que seria o ideal, considerando a retroanálise realizada a partir do valor obtido pelo ensaio de ruptura à compressão.

Os gráficos mostram que a Equação 21 provou-se adequada para possibilitar a utilização dos valores medidos pelo ultrassom tipo scanner na aplicação da Equação 10, especialmente quando a resistência à compressão foi estimada, a partir do módulo de elasticidade, pela Equação 12 reproduzida do Eurocódigo 2 atualmente em vigor (2010).

## 6.2. Provetes prismáticos de betão simples

O primeiro ensaio realizado com os provetes prismáticos foi a verificação rápida de uniformidade, conforme Figura 34. Primeiro foi realizada uma medição da velocidade de pulso no centro de uma das maiores faces do provete, posteriormente a velocidade encontrada foi configurada no aparelho ultrassónico no modo de medição de distância e a verificação foi realizada em uma das menores faces do provete. O valor que o aparelho deveria retornar, no caso de um provete uniforme, seria de 550 mm.

A Tabela 13 apresenta as velocidades de pulso ultrassónico medidos no centro de cada provete prismático e os valores retornados na verificação utilizando o modo de medição de distância.

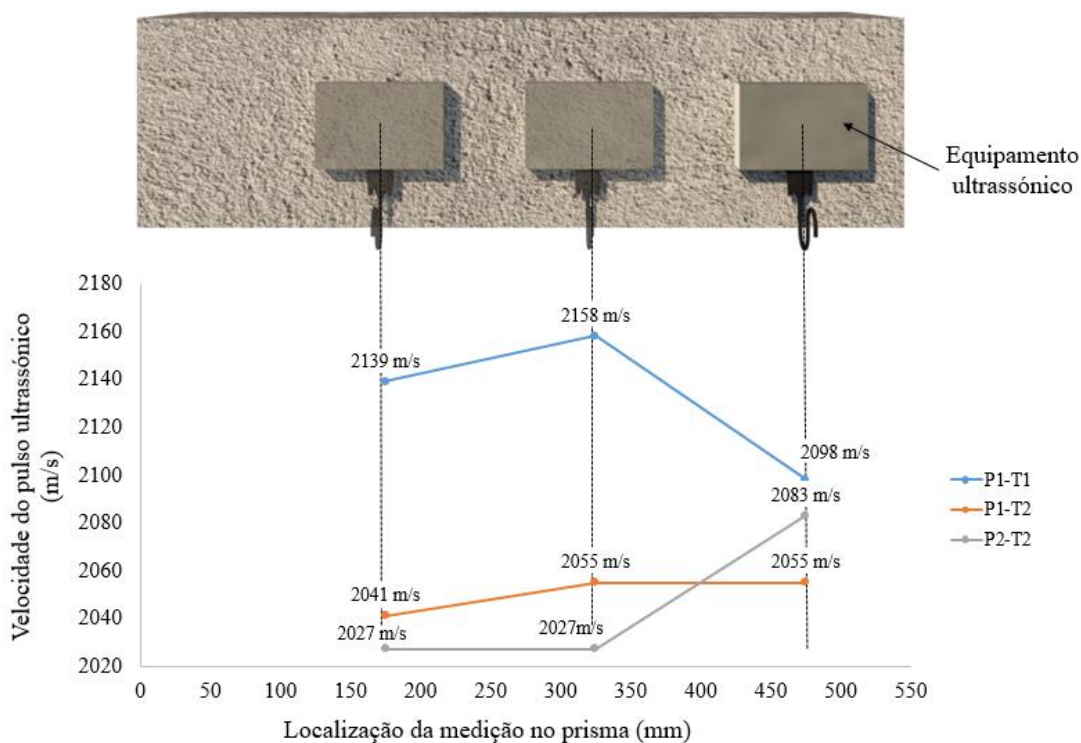
**Tabela 13 - Resultados da verificação rápida da uniformidade dos provetes prismáticos.**

<b>Provete</b>	<b>Velocidade de pulso ultrassónico no centro (m/s)</b>	<b>Valor retornado no modo de medição de distância (mm)</b>
P1-T1	2143	533
P1-T2	2055	549
P2-T2	2027	511

Fonte: Autoria própria.

Com base nos resultados da verificação rápida espera-se que o prisma P1-T2 apresente uma boa uniformidade, o prisma P1-T1 uma uniformidade moderada e o prisma P2-T2 uma baixa uniformidade.

Após a verificação rápida de uniformidade, foram realizadas medições das velocidades de pulso no centro de onde ocorreriam os cortes nos prismas, conforme Figura 35. A Figura 42 apresenta de forma esquemática e gráfica os resultados obtidos para os três provetes.



**Figura 42 - Representação esquemática e gráfica do ensaio de uniformidade pelo método do ultrassom nos provetes prismáticos.**

Fonte: Autoria própria.

Os resultados apresentados na Figura 42 reforçam o inicialmente suposto com os resultados da verificação rápida de uniformidade apresentados na Tabela 12.

Após os provetes prismáticos serem cortados em cubos de 15 cm de aresta, o ensaio de ultrassom foi realizado novamente, dessa vez conforme a Figura 33, em cada um dos novos provetes. Os trechos cortados dos prismas foram nomeados da esquerda para direita, sendo a parte descartada localizada no extremo esquerdo.

A Tabela 14 apresenta os resultados dos ensaios com aparelho ultrassônico após o corte, assim como a estimativa da velocidade de pulso de compressão equivalente pela Equação 22, o módulo de elasticidade calculado pela Equação 10, cujo resultado foi dividido por 1,05, a resistência à compressão calculada pela Equação 12 reproduzida do Eurocódigo 2 [44], a resistência à compressão obtida em ensaio destrutivo e respectivos erros. Os ensaios ocorreram na idade de 90 dias.

**Tabela 14 - Resistência à compressão dos trechos dos provetes prismáticos estimada pela velocidade de pulso ultrassônico, resistência à compressão pelo ensaio destrutivo e respectivos erros.**

Provete	Velocidade de pulso $V_{echo}$ (m/s)	Velocidade de pulso de compressão $V$ (m/s)	$E_{cm}$ (GPa)	Resistência pelo EC2 (2010) (MPa)		Resistência no ensaio à compressão (MPa)	Erro
				$f_{ck}$	$f_{ck,cube}$		
				P1-T1.1	2139		
P1-T1.2	2158	4058	33,9	34,1	43,6	42,2	3,39%
P1-T1.3	2116	3979	32,6	29,0	35,6	36,3	-2,02%
P1-T2.1	2041	3838	30,3	21,1	26,1	26,7	-2,46%
P1-T2.2	2055	3864	30,7	22,4	27,4	27,4	0,25%
P1-T2.3	2055	3864	30,7	22,4	27,4	27,3	0,55%
P2-T2.1	2027	3811	29,9	19,8	24,7	25,2	-2,14%
P2-T2.2	2013	3785	29,5	18,5	23,1	23,2	-0,33%
P2-T2.3	2083	3917	31,6	25,3	30,4	33,0	-7,80%

Fonte: Autoria própria.

Os erros das estimativas da resistência à compressão, pelo método do ultrassom, nos trechos cortados dos provetes prismáticos foram entre -7,80% e 3,39%, apresentando uma boa precisão. É interessante observar que em dois trechos P1-T1.3 e P2-T2.2 as velocidades de pulso, medidas em ensaio antes do corte, mudaram depois da realização do corte dos provetes.

Conforme hipótese levantada após os ensaios de uniformidade, foi possível confirmar pelo ensaio destrutivo de compressão, exposto na Tabela 14, que o prisma P1-T2 era uma peça que apresentava boa uniformidade, o prisma P1-T1 apresentava uma uniformidade moderada e o prisma P2-T2 uma baixa uniformidade.

Para efeitos comparativos foram realizados nos trechos dos prismas ensaios de arrancamento “pull-off” e ensaio de dureza superficial. A Tabela 15 apresenta os resultados obtidos pelo ensaio de arrancamento, a estimativa da resistência à compressão foi feita através da Equação 2. Os resultados do ensaio do esclerômetro, dureza superficial, serão apresentados na Tabela 16.

**Tabela 15 - Resistência à compressão dos trechos do provetes prismáticos estimada pelo ensaio “pull-off”, resistência à compressão pelo ensaio destrutivo e respetivos erros.**

<b>Provete</b>	<b>Resistência à tração “pull-off” (MPa)</b>	<b>Tipo de rotura</b>	<b>Parecer</b>	<b><math>f_{ck,cube}</math> (MPa)</b>	<b>Resistência no ensaio à compressão (MPa)</b>	<b>Erro</b>
P1-T1.1	2,46	Coesiva	Válido	50,5	39,5	27,97%
P1-T1.2	2,69	Coesiva	Válido	57,8	42,2	36,90%
P1-T1.3	0,85	Adesiva	Inválido	Inválido	36,3	Inválido
P1-T2.1	1,76	Coesiva	Válido	30,6	26,8	14,43%
P1-T2.2	1,91	Coesiva	Válido	34,6	27,4	26,38%
P1-T2.3	1,9	Coesiva	Válido	34,3	27,3	25,76%
P2-T2.1	1,71	Coesiva	Válido	29,3	25,2	16,01%
P2-T2.2	1,34	Adesiva	Inválido	Inválido	23,2	Inválido
P2-T2.3	2,11	Coesiva	Válido	40,1	33,0	21,69%

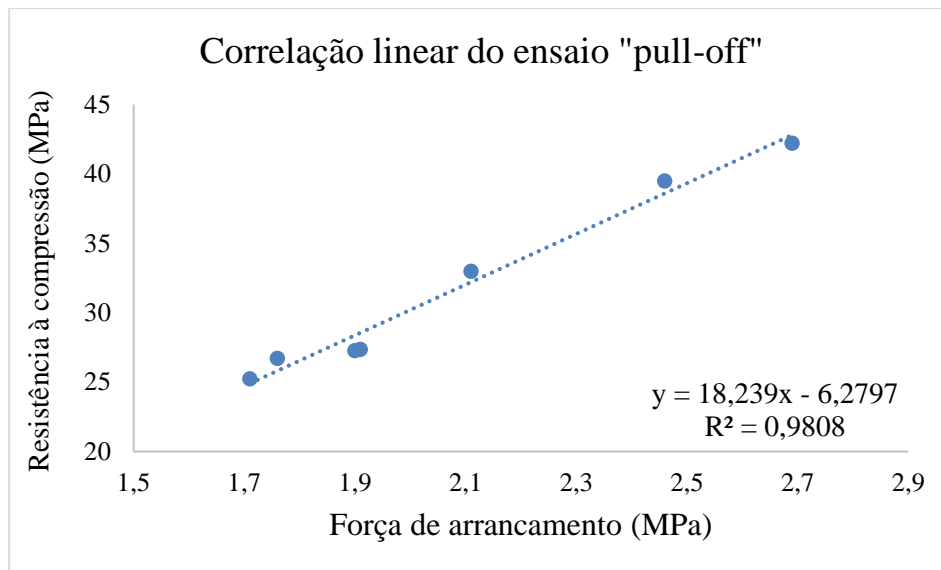
Fonte: Autoria própria.

O método do arrancamento “pull-off” apresentou erros compreendidos entre 16,01% e 36,90% na estimativa da resistência à compressão, utilizando a Equação 2. Os erros foram muito elevados, a resistência à compressão estimada distou em demasia do resultado obtido pelo ensaio destrutivo. É interessante observar que todos os erros foram positivos.

Dois trechos ensaiados, o P1-T1.3 e o P2-T2.2 apresentaram uma rotura adesiva, ou seja, a ruptura foi pela resina epoxídica e não pelo betão, por tanto os resultados desses dois provetes foram considerados inválidos para análise.

Para prosseguir a análise foi gerada a correlação linear, com auxílio do software Excel, entre a força de arrancamento obtida no ensaio “pull-off” e a resistência à compressão obtida no ensaio destrutivo, conforme item 3.4.

O Gráfico 22 apresenta a correlação linear, e a sua respetiva equação, obtida pelos resultados do ensaio de arrancamento.



**Gráfico 22 - Correlação linear do ensaio "pull-off".**

Fonte: Autoria própria.

Observa-se, pela análise da reta, que foi possível estabelecer uma relação entre a força de arrancamento e a resistência à compressão do betão com um grau de confiança superior a 98%, através de um ajuste linear.

A discrepância observada entre o grau de confiabilidade obtido na correlação linear e os elevados erros apresentados na Tabela 14, leva a crer que imprecisão dos resultados possam ser devido à Equação 2 utilizada nos cálculos.

Após a realização dos ensaios de “pull-off”, foram realizados os ensaios do esclerómetro na face oposta à face onde se desenvolveu o ensaio de arrancamento, para que os pequenos danos que foram gerados não influenciassem os resultados do ensaio de dureza superficial.

É importante ressaltar que os ensaios do esclerómetro desenvolveram-se após os o corte dos prismas, ou seja, o ensaio foi realizado em provetes cúbicos de dimensões 15 cm × 15 cm × 15 cm, e todas as medições foram realizadas com o aparelho no sentido vertical de cima para baixo.

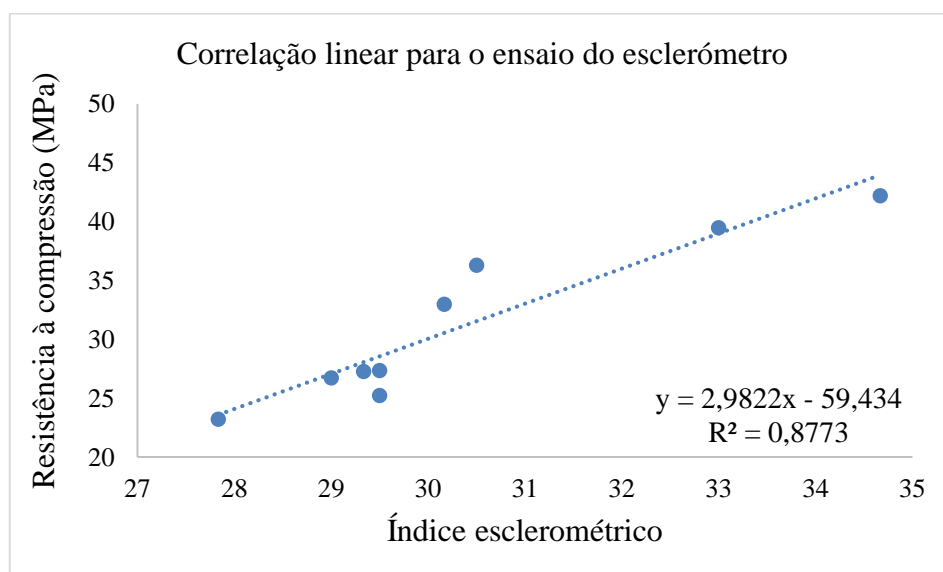
Conforme dito anteriormente, a Tabela 15 apresenta os resultados obtidos pelo método de dureza superficial, ou ensaio do esclerómetro, com o valor das três medições realizadas em cada trecho e a média dessas medidas, valor que foi utilizado para a estimativa da resistência à compressão dos provetes utilizando a curva de conversão representada na Figura 41.

**Tabela 16 - Resistência à compressão dos trechos do provetes prismáticos estimada pelo ensaio do esclerómetro, resistência à compressão pelo ensaio destrutivo e respetivos erros.**

Provete	Medição 01	Medição 02	Medição 03	Média	$f_{ck,cube}$ (MPa)	Resistência	
						do ensaio à compressão (MPa)	Erro
P1-T1.1	33	32	34	33,0	36,0	39,5	-8,81%
P1-T1.2	31	38	35	34,7	39,5	42,2	-6,40%
P1-T1.3	30,5	31	30	30,5	32,0	36,3	-11,82%
P1-T2.1	30	29	28	29,0	30,0	26,7	12,28%
P1-T2.2	29	29	30,5	29,5	31,0	27,4	13,35%
P1-T2.3	30,5	29	28,5	29,3	30,5	27,3	11,84%
P2-T2.1	29	29	30,5	29,5	31,0	25,2	22,82%
P2-T2.2	27	28,5	28	27,8	27,0	23,2	16,33%
P2-T2.3	30	30	30,5	30,2	31,5	33,0	-4,49%

Fonte: Autoria própria.

O método do esclerómetro apresentou erros entre -8,81% e 22,88% na estimativa da resistência à compressão, utilizando a curva da Figura 41. Com exceção do erro apresentado pelo provete P2-T2.1 os demais erros foram aceitáveis e dentro da margem esperada para este método de ensaio. O Gráfico 23 apresenta a correlação linear dos resultados do ensaio do esclerómetro, incluindo-se a equação de aproximação.



**Gráfico 23 - Correlação linear do ensaio do esclerómetro.**

Fonte: Autoria própria.

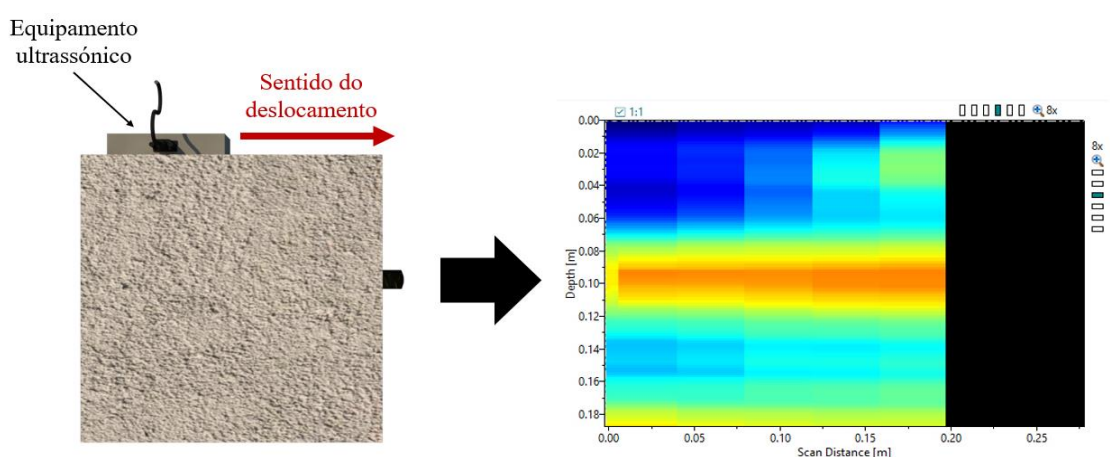
Observa-se, pela análise da reta, que através de um ajuste linear, foi possível estabelecer uma relação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão do betão com um grau de confiança superior a 87%.

### 6.3. Provetes cúbicos de betão armado

Os provetes de betão armado foram ensaiados com o modo de medição B-Scan conforme apresentado no item 4.4.3. Como explicado anteriormente, nesse tipo de medição é necessário definir a velocidade do pulso ultrassónico e o ganho para gerar a imagem transversal.

Após inúmeros ensaios com o provete BA1 foram encontrados parâmetros com os quais foi possível obter uma imagem próxima da realidade, conforme demonstrado na Figura 36. Com ajuda do software MATLAB foi calculada a área de aço a partir da imagem gerada, com código disponível no Anexo 3. O provete BA1 apresenta apenas um varão de aço central de diâmetro 16 mm. Os primeiros resultados com o MATLAB indicaram um varão de 16,36 mm de diâmetro, resultado bem próximo da realidade.

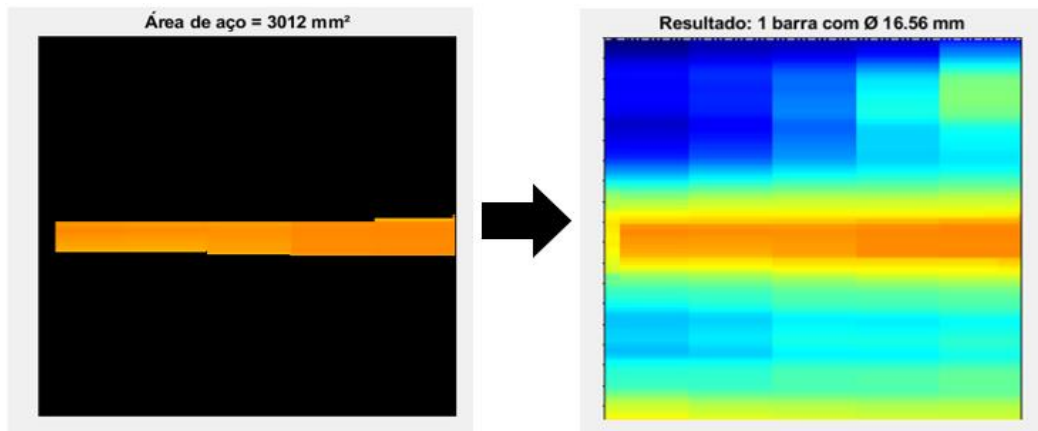
Após definir a velocidade de pulso e os demais parâmetros para o modo de medição B-Scan que foi possível identificar o aço, essas configurações foram testadas realizando outra medição no provete BA1, com o provete posicionado conforme a Figura 43.



**Figura 43 - B-Scan do provete BA1.**

Fonte: Autoria própria.

A imagem transversal gerada foi analisada com o software MATLAB, de forma que foi possível estimar a área do aço e a bitola do varão, conforme Figura 44.

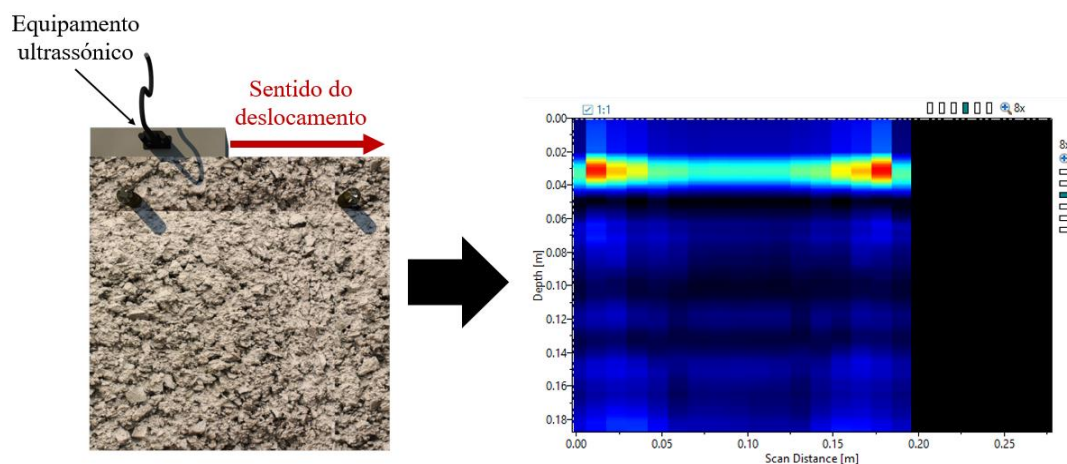


**Figura 44 - Resultado de análise realizada com o software MATLAB para o B-Scan do provete BA1.**

Fonte: Autoria própria.

É possível observar na Figura 44 que a estimativa da área de aço e da bitola do varão apresentaram uma boa precisão e resultados similares aos obtidos anteriormente, conforme Figura 37.

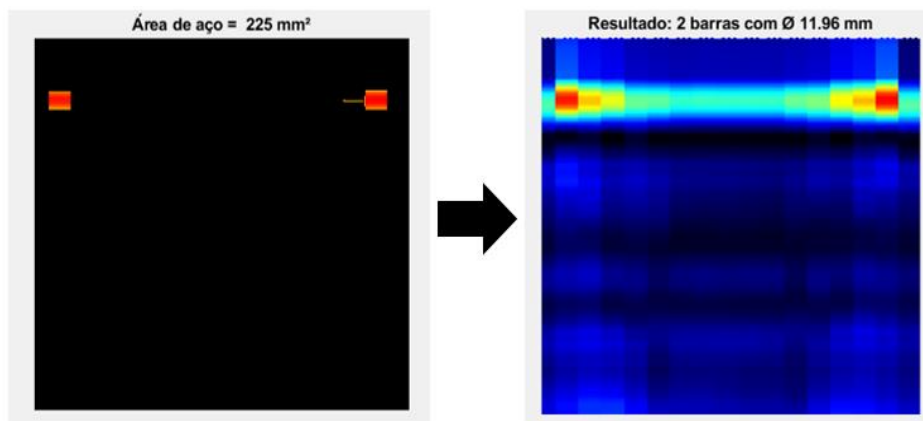
Como os demais provetes de betão armados foram produzidos a partir de um mesmo betão de mesmo lote, os parâmetros utilizados no provete BA1 foram reproduzidos nos provetes BA2 e BA3. A forma como o ensaio foi realizado e a imagem transversal gerada para o provete BA2, estão indicados conforme Figura 45.



**Figura 45 - B-Scan do provete BA2.**

Fonte: Autoria própria.

Assim como foi feito com o provete BA1, a imagem transversal gerada foi analisada com o software MATLAB, de forma que foi possível estimar a área do aço e a bitola do varão, conforme Figura 46.

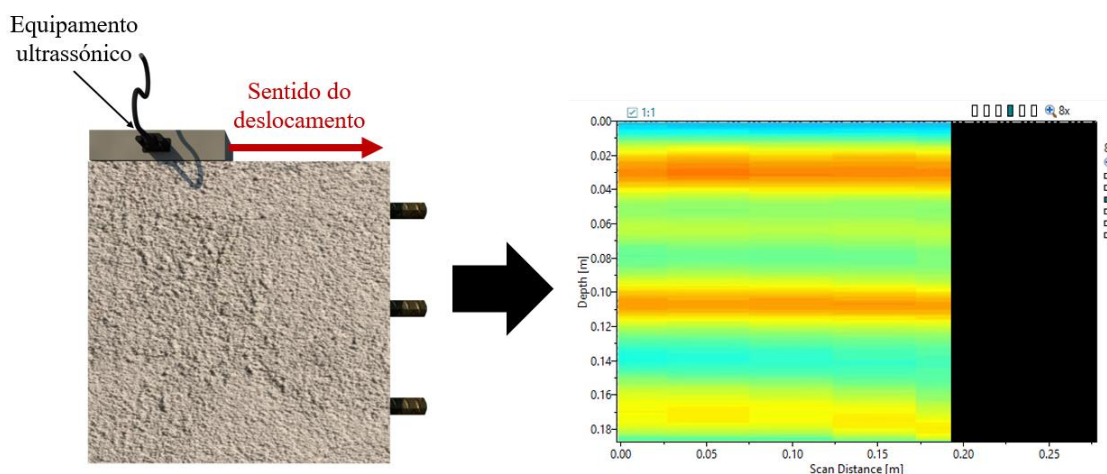


**Figura 46 - Resultado de análise realizada com o software MATLAB para o B-Scan do provete BA2.**

Fonte: Autoria própria.

O provete BA2 apresenta 2 varões de aço com diâmetros 10 mm, conforme mostra a Figura 31. Apesar da imagem transversal gerada apresentar bastante semelhança com a realidade, a estimativa dos diâmetros dos varões de aço foi menos precisa que no provete BA1.

O ensaio no provete BA3 foi realizado de forma a testar a capacidade de visualizar varões de aço paralelos e em sequência, como se mostra na Figura 47.

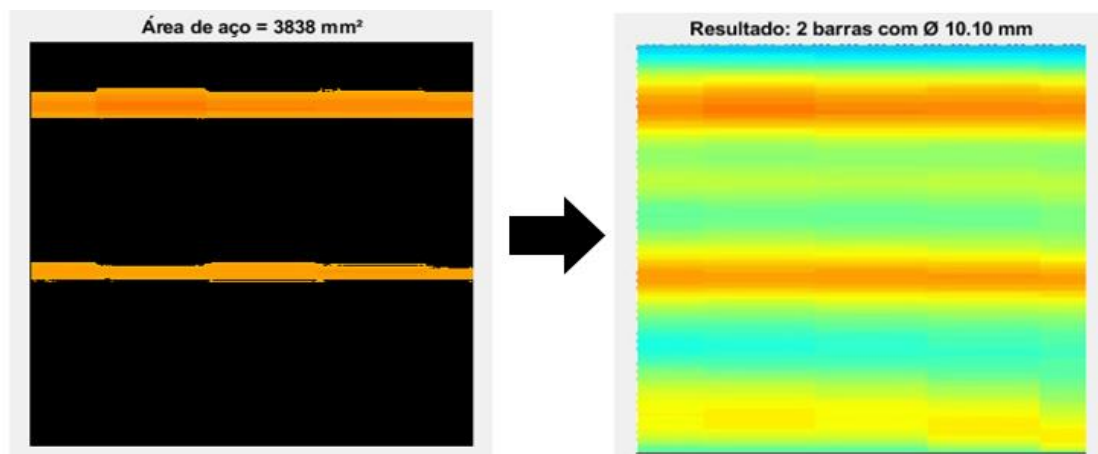


**Figura 47 - B-Scan do provete BA3.**

Fonte: Autoria própria.

É possível observar na Figura 47 que o varão mais próximo do ultrassom ficou bem definido, o central já perdeu um pouco de nitidez e o mais afastado do aparelho ultrassônico praticamente não ficou visível.

Assim como foi feito para os provetes anteriores, a imagem transversal gerada foi analisada com o software MATLAB, com o objetivo de estimar a área do aço e a bitola do varão, conforme Figura 48.

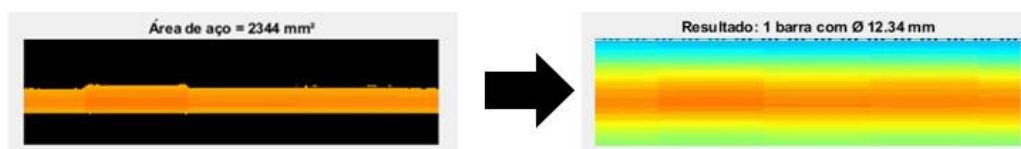


**Figura 48 - Resultado de análise realizada com o software MATLAB para o B-Scan do provete BA3.**

Fonte: Autoria própria.

É possível observar na Figura 48 que o varão inferior não chegou a ser detetado pelo código utilizado no software MATLAB. O erro apresentado no resultado também foi maior que na medição realizada para o provete BA1, uma vez que o provete BA3 possui 3 varões de aço com diâmetro de 12,50 mm, conforme Figura 31, e o resultado obtido em análise foi de 2 varões com diâmetro de 10,10 mm.

Como o varão superior apresentou uma boa nitidez, a imagem foi cortada e analisada com o auxílio do software MATLAB uma segunda vez, porém apenas até a profundidade de 50 mm, conforme a Figura 49.



**Figura 49 - Segunda análise do B-Scan do provete BA3.**

Fonte: Autoria própria.

Analisando isoladamente o varão superior, e mais próximo ao aparelho ultrassônico, a área de aço e o diâmetro estimados foram bem próximos aos valores reais.

Por fim, os provetes de betão armado foram ensaiados para a velocidade de pulso ultrassônico, conforme Figura 33, e posteriormente submetidos ao ensaio à compressão, cujos valores foram corrigidos, devido a presença de varões de aço, utilizando a Equação 24 adaptada da BS 6089:1981 [57] para a aplicação em provetes cúbicos.

$$f_{ck,cube} = f_{ck,cube (ensaio)} \cdot \alpha \quad (24)$$

Na equação anterior,  $f_{ck,cube}$  é o valor da resistência considerada expressa em MPa,  $f_{ck,cube (ensaio)}$  é o valor da resistência obtida pelo ensaio à compressão expressa em MPa e  $\alpha$  é definido pela Equação 25 adaptada da BS 6089:1981 [57] para a aplicação em provetes cúbicos.

$$\alpha = 1 + 1,5 \cdot \left( \frac{\sum(\phi_R \cdot d)}{h \cdot L} \right) \quad (25)$$

Na equação anterior,  $\phi_R$  é o diâmetro do varão em mm,  $d$  é a distância do eixo do varão até a face superior do provete,  $h$  é a altura do provete em mm e  $L$  é a dimensão da aresta superior em mm.

Os resultados da estimativa da resistência à compressão para esses provetes, assim como o valor de ruptura obtida pelo ensaio destrutivo podem ser visualizados na Tabela 16.

**Tabela 17 - Resistência à compressão dos provetes de betão armado estimada pela velocidade de pulso ultrassônico, obtida pelo ensaio destrutivo e respetivos erros.**

Provete	Velocidade de pulso $V_{echo}$ (m/s)	Velocidade de pulso de compressão $V$ (m/s)	$E_{cm}$ (GPa)	Resistência pelo EC2 (2010) (MPa)		Resistência ensaio à compressão (MPa)	Erro
				$f_{ck}$	$f_{ck,cube}$		
BA1	2143	4030	33,4	32,2	40,6	38,9	4,31%
BA2	2116	3979	32,6	29,0	35,6	35,0	1,47%
BA3	2158	4058	33,9	34,1	43,6	39,3	11,08%

Fonte: Autoria própria.

Os erros para os provetes de betão armado, em relação à estimativa da resistência à compressão, foram entre 1,47% e 11,08%. O provete que apresentou o maior erro foi aquele que também possuía um maior número de varões de aço, podendo indicar uma possível influência do aço na velocidade de pulso ultrassónico medida nos ensaios.

#### 6.4. Provetes cilíndricos de calda de injeção

Os provetes cilíndricos de calda de injeção (PCn) foram ensaiados para a velocidade de pulso ultrassónico, conforme Figura 38, e posteriormente foram submetidos ao ensaio de compressão. Ambos os ensaios ocorreram da idade de 28 dias e os resultados podem ser observados na Tabela 18.

**Tabela 18 - Velocidade de pulso e resistência à compressão dos provetes cilíndricos.**

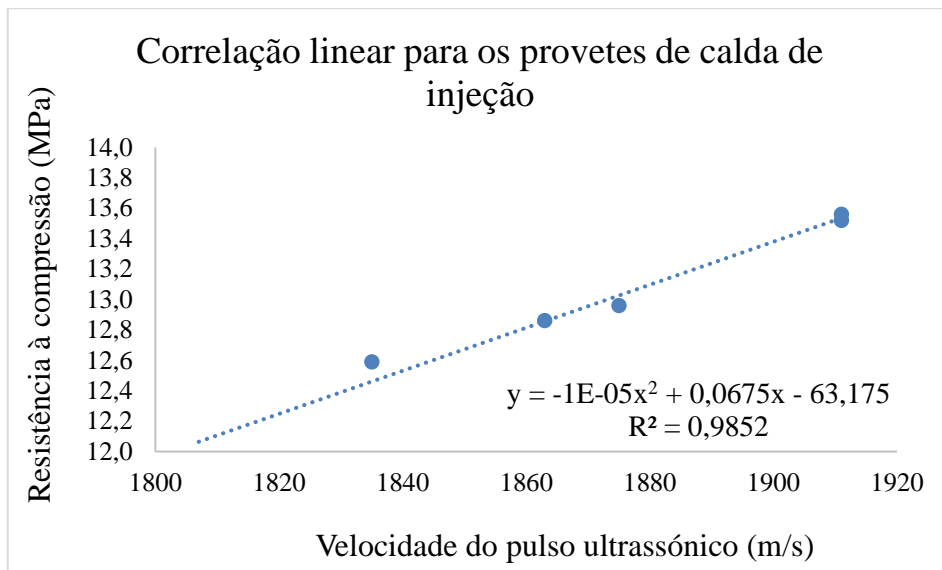
Provete	Velocidade de pulso	Resistência ensaio à
	$V_{echo}$ (m/s)	compressão (MPa)
PC1	1835	12,6
PC2	1807	12,0
PC3	1911	13,5
PC4	1911	13,6
PC5	1863	12,9
PC6	1875	13,0

Fonte: Autoria própria.

As velocidades de pulso apresentadas na Tabela 18 foram as velocidades que retornaram o valor da distância mais próximo de 300 mm (altura do provete), quando verificadas por este modo de medição. Em média foram realizadas 5 medições de velocidade de pulso em cada provete até conseguir estabelecer aquela que seria mais representativa.

Para prosseguir a análise foi gerada uma correlação linear, com auxílio do software Excel, entre a velocidade de pulso ultrassónico e a resistência à compressão obtida no ensaio destrutivo dos provetes de calda de injeção.

O Gráfico 23 apresenta a curva de correlação, e a sua respetiva equação, obtida pelos resultados expostos na Tabela 18.



**Gráfico 24 - Correlação linear do ensaio de ultrassom para os provetes de calda de injeção.**

Fonte: Autoria própria.

Observa-se, pela análise da reta, que através de um ajuste linear, foi possível estabelecer uma relação entre a velocidade de pulso e a resistência à compressão dos provetes de calda de injeção com um grau de confiança superior a 98%.

É importante indicar que para a calda de injeção não é possível estimar a resistência à compressão pela velocidade de pulso ultrassônico através de equações, sendo correlação linear o único recurso para relacionar esses dois valores.

## 7. CONCLUSÕES

Os objetivos propostos neste trabalho foram alcançados. Estudou-se a potencialidade de um equipamento ultrassônico moderno do tipo scanner na caracterização mecânica de elementos de betão e betão armado. O aparelho utilizado trabalha com ondas de corte, diferentemente dos aparelhos convencionais que trabalham com ondas de compressão.

Com a velocidade das ondas de compressão já era possível estimar o módulo de elasticidade e a resistência à compressão do betão. O principal foco desse estudo foi viabilizar o uso da velocidade de pulso de corte, medida pelo aparelho tipo scanner, para tais estimativas, tomando como princípio que esse tipo de aparelho poderia fornecer resultados mais precisos.

Através da aplicação das Equações 21 e 22, desenvolvidas e propostas neste estudo, em conjunto com outras já existentes, foi possível estimar com boa precisão as características mecânicas dos provetes de betão ensaiados. Porém, é importante aludir que foram trabalhados um total de trinta provetes, e embora os resultados sejam conclusivos, essa ainda pode ser considerada uma amostragem reduzida.

Considerando a capacidade do aparelho utilizado de gerar imagens transversais dos provetes sob estudo, esse recurso foi testado na potencialidade de detetar varões internos ao betão, e inclusive estimar seus respectivos diâmetros.

O método do ultrassom mostrou-se eficaz na caracterização mecânica de elementos de betão ao que diz respeito a estimativa do módulo de elasticidade e na estimativa da resistência à compressão. A deteção de varões de aço mostrou-se possível, porém há a necessidade de minuciosa calibração utilizando um provete constituído de betão semelhante aquele que será ensaiado com este propósito.

O ensaio com aparelho ultrassônico, quando realizado de forma minuciosa e sistemática, revelou-se um método não-destrutivo muito vantajoso, inclusive quando comparado a outros métodos, como o “pull-off” e o método do esclerómetro também utilizados neste trabalho, tanto pela precisão apresentada como ao fato de não gerar dano algum a superfície ensaiada. Por fim, foi possível evidenciar que o método do ultrassom utilizado tem potencial para aplicações em outros materiais construtivos além do betão, conforme mostraram os ensaios realizados com os provetes de calda de injeção.

## **7.1. Sugestões para trabalhos futuros**

Esta dissertação foi desenvolvida em tempo limitado e o potencial máximo do método não foi de fato alcançado. Todos os ensaios foram realizados em laboratório com alto nível de controlo dos materiais, da cura e do desenvolvimento dos provetes.

Como trabalhos futuros recomenda-se vivamente a aplicação “*in situ*” dos ensaios aqui desenvolvidos, correlacionado os resultados com provetes de controlo ensaiados em laboratório.

Também é recomendada a realização de ensaios mais numerosos, com traços e lotes de betões mais diversificados, ampliando a quantidade de resultados e possibilitando um tratamento estatístico que possibilite um melhor entendimento sobre toda a potencialidade e limitações do aparelho ultrassónico utilizado.

Por fim, recomenda-se ainda a elaboração de estudos que alarguem o uso do presente equipamento a diferentes materiais de construção e elementos construtivos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. C. Stanley, Highlights in the History of Concrete, Cement and Concrete Association, 1982.
- [2] F. Margarido e M. C. Gonçalves, Ciência e Engenharia dos Materiais de Construção, 1ª ed., Lisboa: IST Press, 2012.
- [3] C. A. Ferreira, Betão – A idade da Descoberta, Lisboa: Passado Presente, 1989.
- [4] M. H. C. Botelho, Concreto armado, eu te amo, São Paulo: Blucher, 2006.
- [5] C. C. Ribeiro, J. D. Silva Pinto e T. Starling, Materiais de Construção Civil, 2ª ed., Belo Horizonte: UFMG, 2006.
- [6] M. R. Fortes, *Controle Tecnológico e Controle de Qualidade – Um Alerta Sobre a sua Importância*, São Paulo: Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2004.
- [7] T. Telisak, Carraquilha and D. W. R. Fowler, Early age strength of concrete: a comparison of several nondestructive teste methods, Texas: Center for Transportation Research, 1991.
- [8] A. Garcia, J. A. SPIM e C. A. Santos, Ensaaios dos Materiais, Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- [9] A. C. J. Evangelista, Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos, Rio de Janeiro: Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002.
- [10] C. G. Carette and V. M. Malhotra, In Situ Tests : Variability and Strength Prediction of Concrete at Early Ages, Detroit: American Concrete Institute, 1984.
- [11] L. C. P. da Silva Filho, A. Lorenzi, J. L. Campagnolo, A. J. Strieder, U. C. d. M. Quinino e L. F. Caetano, Estudos de caso sobre avaliação de estruturas de concreto através da utilização de ensaios não destrutivos, Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, 2011.
- [12] J. H. Bungey, S. G. Millard and M. G. Grantham, *Testing of Concrete in Structures*, 4ª ed., Nova York: Taylor & Francis, 2006.
- [13] D.-H. Kim, Composite Structures for Civil and Architectural Engineering, Londres: E & FN Spon, 1995.
- [14] J. S. Damtoft and D. Hefort, "Concrete binders, mineral additions and chemical admixtures: state of the art and challenges for the 21st century," in *Modern concrete materials: binders, additions and admixtures*, Londres, Thomas Telford, 1999, pp. 01-16.

- [15] P. B. Fusco, *Tecnologia do Concreto Estrutural*, São Paulo: PINI, 2008.
- [16] A. M. Neville e J. J. Brooks, *Tecnologia do Concreto*, 2ª ed., bookman, 2010.
- [17] P. J. P. da Cunha, *Conformidade da Resistência à Compressão do Betão*, Braga: Dissertação (Doutoramento em Engenharia Civil) - Universidade do Minho, 2011.
- [18] Instituto Português da Qualidade (IPQ), *Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimento correntes*, Caparica: Norma Portuguesa NP EN 197-1, 2001.
- [19] M. F. S. Alhadas, *Estudo da influência do agregado graúdo de diferentes origens mineralógicas nas propriedades mecânicas do concreto*, Belo Horizonte: Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.
- [20] A. M. Neville, *Propriedades do Concreto*, 5ª ed., Bookman, 2016.
- [21] P. K. Metha e P. J. M. Monteiro, *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*, 3ª ed., São Paulo: IBRACON, 2008.
- [22] Instituto Português da Qualidade (IPQ), *Água de amassadura para betão. Especificações para a amostragem, ensaio e avaliação da aptidão da água, incluindo água recuperada nos processos da indústria de betão, para o fabrico de betão*, Caparica: Norma Portuguesa NP EN 1008, 2004.
- [23] M. J. A. R. d. S. Coutinho, *Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da cofragem*, Porto: FEUP, 2005.
- [24] Instituto Português de Qualidade (IPQ), *Betão. Parte 1: Especificações, desempenho, produção e conformidade*, Caparica: Norma Portuguesa NP EN 206-1, 2007.
- [25] International Atomic Energy Agency, *Non-destructive testing for plant life assessment*, Vienna, 2005.
- [26] C. M. C. P. Sampaio, *Caracterização do betão através de técnicas não-destrutivas*, Porto: Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Porto, 2010.
- [27] V. M. Malhotra, "Surface hardness methods," em *Handbook on non-destructive testing of concrete*, Ottawa, CRC Press, 1991, pp. 17-31.
- [28] G. D. Henderson, P. A. M. Basheer e A. E. Long, "Pull-Off test and permeation tests," em *Handbook on non-destructive testing of concrete*, Belfast, CRC Press, 1991, pp. 155-166.
- [29] British Standards Institution, *Recommendations for near to surface test methods for strength*, Londres: BS 1881: Part 207, 1992.

- [30] A. E. Long e A. Murray, “The Pull-off partially destructive test for concrete,” *In Situ/Nondestructive Testing of Concrete*, pp. 321-352, 1984.
- [31] N. J. Carino, “Pullout Test,” em *Handbook on non-destructive testing of concrete*, Gaithersburg, CRC Press, 1991, pp. 51-90.
- [32] N. M. d. S. Mendes, *Avaliação do ensaio de pull-out na estimativa da resistência à compressão do betão em idades jovens*, Lisboa: Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- [33] Instituto Português da Qualidade (IPQ), *Ensaaios do betão nas estruturas. Parte 3: Determinação da força de arranque*, Caparica: Norma Portuguesa NP EN 12504-3, 2007.
- [34] International Atomic Energy Agency, *Guidebook on non-destructive testing of concrete structures*, Vienna: IAEA, 2002.
- [35] Instituto Português da Qualidade (IPQ), *Avaliação da resistência à compressão do betão nas estruturas e em produtos prefabricados*, Caparica: Norma Portuguesa NP EN 13791, 2008.
- [36] ACI, American Concrete Institute, *In place methods for determination of strength of concrete*, Detroit: 228 - 1R - 89, 1989.
- [37] L. C. Meneghetti, *Avaliação da resistência à compressão de concretos nas primeiras idades através do ultra-som*, Florianópolis: Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.
- [38] T. R. Naik e V. M. Malhotra, “The ultrasonic pulse velocity method,” em *Handbook on non-destructive testing of concrete*, 2ª ed., Boston, CRC Press, 1991, pp. 169-188.
- [39] V. J. Ferrari e I. J. Padaratz, “Aplicação de ondas ultra-sônicas na detecção das primeiras fissuras em vigas de concreto armado e na avaliação da resistência à compressão,” *Acta Scientiarum Technology*, v. 25, no. 2, pp. 185-191, 2003.
- [40] Associação Brasileira de Normas Técnicas, *Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica*, Rio de Janeiro: ABNT - NBR 8802, 2013.
- [41] M. A. P. Irrigaray, *Estimativa da resistência do concreto à compressão por meio da velocidade de pulsos ultrassônicos na pasta do concreto*, Florianópolis: Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.
- [42] P. C. d. A. Maia, L. V. Waked e M. F. Prellwitz, “Estimate of Elastic Modulus of Continuous Flight Auger Concrete,” *Geotecnia*, pp. 27-40, Novembro 2019.

- [43] Instituto Português de Qualidade (IPQ), *Eurocódigo 2 - Projeto de estruturas de betão*, Caprica: Norma Portuguesa NP EN 1992-1-1, 2000.
- [44] Instituto Português de Qualidade (IPQ), *Eurocódigo 2 - Projeto de estruturas de betão*, Caprica: Norma Portuguesa NP EN 1992-1-1, 2010.
- [45] Associação Brasileira de Normas Técnicas, *Projeto de estruturas de concreto - Procedimento*, Rio de Janeiro: ABNT - NBR 6118, 2007.
- [46] K. Komlos, S. Popovics, T. Nürnbergerová, B. Babál e J. S. Popovics, “Ultrasonic pulse velocity test of Concrete properties as specified in various standards,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 18, 10 Junho 1996.
- [47] N. V. Mahure, G. K. Vijh, P. Sharma, N. Sivakumar e M. Ratnam, “Correlation between Pulse Velocity and Compressive Strength of Concrete,” *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, vol. 4, pp. 871-874, Outubro 2011.
- [48] T. Lee e J. Lee, “Setting time and compressive strength prediction model of concrete by nondestructive ultrasonic pulse velocity testing at early age,” *Construction and Building Materials*, vol. 252.
- [49] A. Medeiros, *Aplicação do ultra-som na estimativa da profundidade de fendas superficiais e na avaliação da eficácia de injeções em elementos de concreto armado*, Florianópolis: Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.
- [50] Proceq SA, *Pundit manual*, Schwerzenbach: Swiss Solutions, 2017.
- [51] M. Schickert, M. Krause e W. Müller, “Ultrasonic imaging of concrete elements using reconstruction by synthetic aperture focusing technique,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, pp. 235-246, Maio 2003.
- [52] R. M. L. G. Resende, *Avaliação dos efeitos da danificação e da acustoelasticidade sobre a velocidade de pulso ultrassônico em corpos de prova de concreto submetidos a compressão uniaxial*, São Carlos: Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, 2018.
- [53] Instituto Português de Qualidade (IPQ), *Ensaios das propriedades geométricas dos agregados; Parte 1: Análise granulométrica; Método da peneiração*, Caprica: Norma Portuguesa NP EN 933-1, 2014.
- [54] Instituto Português de Qualidade (IPQ), *Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados; Parte 2: Métodos para a determinação da resistência à fragmentação*, Caprica: Norma Portuguesa NP EN 1097-2, 2011.
- [55] Matest S.p.A., “Section C - Concrete,” em *Material testing solutions*, Treviolo, Matest, 2008, pp. 109-240.

[56] Instituto Português de Qualidade (IPQ), *Ensaaios do betão endurecido*, Caprica: Norma Portuguesa NP EN 12390, 2003.

[57] British Standards Institution, *Assessment of concrete strength in existing structures*, Londres: BS 6089:1981, 1981.

## **ANEXOS**

# ANEXO 1 – FICHA TÉCNICA CIMENTO CEM II/ B-L 32,5 N

## MAESTRO CEM II/B-L 32,5N CIMENTO PORTLAND DE CALCÁRIO

### Locais de Produção

Fábrica Secil-Outão  
Fábrica Cibra-Pataias  
Fábrica Maceira-Liz

### Embalagem

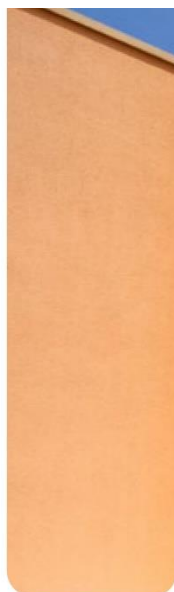
Granel  
Sacos de 40kg e de 25kg

### Certificação

Cimento certificado segundo a NP EN 197-1.

Certificados de Regularidade do Desempenho e Declarações de Desempenho

0856-CPR-0130 (Secil-Outão), 0856-CPR-0131 (Maceira-Liz) e 0856-CPR-0132 (Cibra-Pataias)



<b>Composição do Produto (Núcleo Cimento)</b>	65% a 79% Clínquer Portland 21% a 35% Calcário 0% a 5% Outros Constituintes
<b>Principais Características</b>	Cimento de cor cinzenta, com menor calor de hidratação e melhor trabalhabilidade que um cimento CEM I da mesma classe de resistência. Desenvolvimento mais lento de resistências (menor resistência inicial). Resistências finais dentro dos valores da classe indicada (resistências aos 28 dias).
<b>Principais Aplicações</b>	O Cimento Portland de Calcário CEM II/B-L 32,5N é o cimento mais utilizado nas obras de construção civil. A sua excelente trabalhabilidade e baixo calor de hidratação tornam-no especialmente adaptado a todos os trabalhos correntes da construção. O cimento CEM II/B-L 32,5N é principalmente utilizado em: <ul style="list-style-type: none"><li>• argamassas e betão não armado para enchimentos e regularização;</li><li>• betão estrutural, pronto ou fabricado em obra de média resistência;</li><li>• argamassas de assentamento, reboco e reparação;</li><li>• fundações diretas e indiretas em ambientes moderadamente agressivos;</li><li>• estabilização de solos e solo-cimento;</li><li>• prefabricação de blocos, tubos, manilhas e outros artefactos à base de cimento;</li><li>• prefabricação ligeira em regime de baixa rotatividade de moldes.</li></ul>
<b>Advertências Específicas</b>	Este cimento melhora a trabalhabilidade de betões e argamassas e permite uma redução da dosagem de água de amassadura. Porém, o correto desenvolvimento de resistências é sensível ao processo de cura pelo qual deverão ser tomadas precauções para evitar a dissecação de peças betonadas muito expostas ao sol e ao vento (possível fendilhação). Não se recomenda a utilização deste cimento em tempo muito frio, sem que se tomem medidas adequadas.
<b>Informação de Segurança</b>	O manuseamento do cimento em pó pode causar irritação dos olhos e vias respiratórias. Quando misturado com água pode ainda causar sensibilização da pele. Aconselha-se o uso de máscara anti-poeiras, de óculos para proteção dos olhos e luvas e fato de trabalho para proteção das mãos e pele. Para informação detalhada consulte a Ficha de Dados de Segurança.



#### CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado (1)
Teor de Sulfatos (em SO <sub>3</sub> )	NP EN 196-2	≤ 3,5%
Teor de Cloretos	NP EN 196-2	≤ 0,10%

(1) As percentagens são referentes à massa de cimento.

#### CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

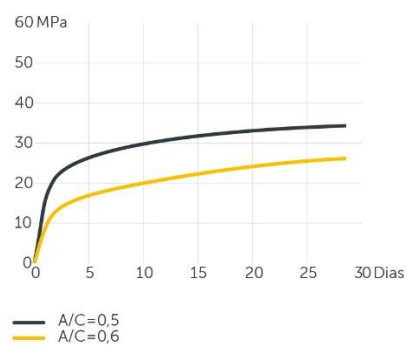
Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado
Princípio de Presa	NP EN 196-3	≥ 75 min
Expansibilidade	NP EN 196-3	≤ 10 mm

#### CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

##### Resistência à Compressão (MPa)

Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência	NP EN 196-1
2 dias	7 dias	28 dias	
-	≥ 16	≥ 32,5 e ≤ 52,5	

##### Valores médios indicativos da resistência à compressão de betão fabricado com 350 kg/m<sup>3</sup> de cimento CEM II/B-L 32,5N



**Direção Executiva Portugal Cimentos**  
Av. Eng.º Duarte Pacheco  
19, 7º, 1070-100 Lisboa

Tel - 217927100

**Direção Nacional de Vendas**  
Tel - 217 927 100

**Vendas Norte**  
Tel - 226 078 410

**Vendas Centro**  
Tel - 244 779 500

**Vendas Sul**  
Tel - 212 198 280

**Vendas Técnicas**  
Tel - 212 198 280

**Cimento Branco**  
Tel - 244 779 500

## ANEXO 2 – GRANULOMETRIA E PROPRIEDADE MECÂNICAS BRITA 8/14



**IPB** INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA  
Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Laboratório de Materiais de Construção (LMC)  
Campus de Sta. Apolónia  
5300-253 Bragança  
Telef.: 273 303 173 Fax: 273 313 051  
hmorais@ipb.pt

### ANÁLISE GRANULOMÉTRICA: MÉTODO DE PENEIRAÇÃO

Norma de Referência: NP EN 933-1

**CLIENTE:** LMC - ESTiG - IPB

**ENDEREÇO:** Bragança

**MATERIAL:** Agregado

**REF.ª CLIENTE:** Brita 8/14

**ORIGEM:** Granito

**LOCAL DE COLHEITA:** Jeremias de Macedo (Pedreira de Sortes)

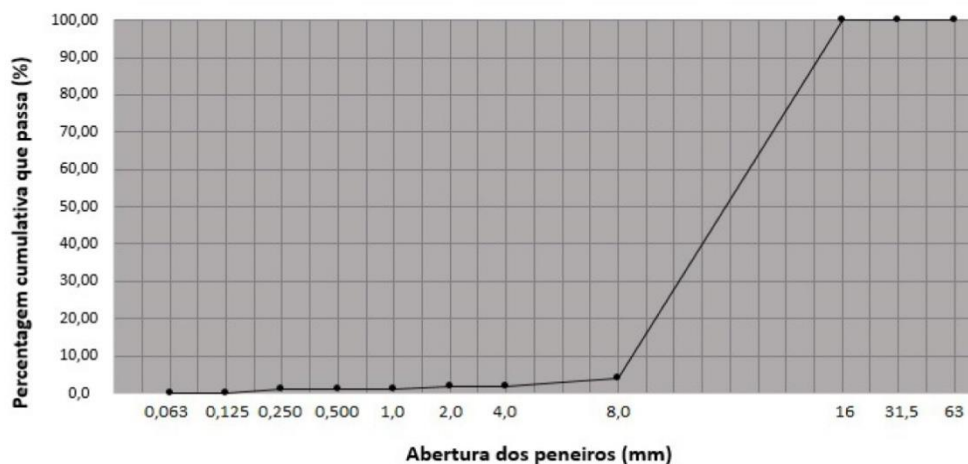
**DATA DA COLHEITA:**

**DATA DO ENSAIO:** 14/11/2016

**PROCEDIMENTO USADO:** LAVAGEM E PENEIRAÇÃO

Massa seca total da amostra: (kg)		<b>M<sub>1</sub>=</b>	<b>2058,10</b>
Massa seca após a lavagem: (kg)		<b>M<sub>2</sub>=</b>	<b>2056,50</b>
Massa seca dos finos removidos por lavagem: (kg)		<b>M<sub>1</sub> - M<sub>2</sub> =</b>	<b>1,60</b>
Série de base + Série 2		Material retido	
Dimensão das aberturas do	Massa (R <sub>i</sub> )	Percentagem	Percentagem cumulativa do
(mm)	(kg)	(%)	
63,0	-	-	-
-	-	-	-
40,0	-	-	-
31,5	-	-	-
-	-	-	-
20,0	-	-	-
16,0	-	-	100
14,0	56,70	2,75	97
12,5	321,00	15,60	82
-	-	-	-
10,0	1214,70	59,02	23
8,0	380,80	18,50	4
6,3	27,40	1,33	3
-	-	-	-
4,0	16,10	0,78	2
2,0	8,60	0,42	2
1,0	6,20	0,30	1
0,500	7,30	0,35	1
0,250	7,70	0,37	1
0,125	5,00	0,24	0
0,063	4,00	0,19	0,1
<b>Material restante no fundo: P</b>	1,00		
<b>TOTAL (S<sub>r</sub>i +P)</b>	<b>2056,50</b>		
<b>Percentagem de finos (f) que passa o peneiro de 63 mm:</b>			<b>0,1</b>
<b>Obs.:</b> Os resultados das massas são apresentados em gramas, por se tratar de uma amostra pequena.			
O Técnico		A Técnica Supervisor	

#### Análise Granulométrica – Brita 8/14



#### ENSAIOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS DOS AGREGADOS

##### PARTE 2: MÉTODOS PARA A DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FRAGMENTAÇÃO (MÉTODO DE LOS ANGELES)

Norma de Referência: NP EM 1097-2:2011-pt

#### Ensaio efetuado sobre a fração granulométrica 8/14 mm

Massa da amostra para ensaio: M (g) 5000,1

Massa retida no peneiro de 1,6 mm m (g) 3560,5

Coefficiente de Los Angeles (LA)  $LA = (500 - m) / 5028,8$

**LA (%) = 28,8**

### ANEXO 3 – CÓDIGO DO MATLAB PARA IDENTIFICAÇÃO DOS VARÕES DE AÇO

```
close all;
clear all;
clc;

J=imread(uigetfile);
figure; imshow(J);
[I, rect] = imcrop(J);
figure, imshow(I);

figure;
subplot(1,2,1);
imshow(J); title('Imagem original');

subplot(1,2,2);
imshow(I); title('Imagem a ser analisada');

prompt = 'Qual a altura da imagem em mm?\n\nResposta: ';
h = input(prompt);
prompt = '\nQual o comprimento da imagem em mm?\n\nResposta: ';
l = input(prompt);
area_total = h*l;
fprintf('\nÁrea total da imagem = %4.0f mm²', area_total);

Ir = I(:, :, 1);
Ig = I(:, :, 2);
Ib = I(:, :, 3);

figure;
subplot(2, 2, 1); %cria uma imagem com 4 espaços (duas linhas e duas
colunas e insere a imagem no primeiro quadrante
imshow(I); title('Original');

subplot(2, 2, 2);
imshow(Ir); title('Red');

subplot(2, 2, 3);
imshow(Ig); title('Green');

subplot(2, 2, 4);
imshow(Ib); title('Blue');

[r, c, b] = size(I);

P_aco=0;
Ix = zeros(r, c);
for i=1:r
    for j=1:c
        if Ir(i, j) > 240 && Ig(i, j) < 180
            Ix(i, j) = 1;
            P_aco = P_aco+1;
        end
    end
end
end
```

```

figure; imshow(Ix); title(['Área correspondente ao aço']);

Ixx = zeros(r, c, b);

for i = 1:r
    for j = 1:c
        if Ix(i, j) > 0
            Ixx(i, j, :) = I(i, j, :);
        end
    end
end
Ixx = uint8(Ixx);

porcentagem_aco = P_aco/(r*c);
area_de_aco = porcentagem_aco*area_total;

resultado = sprintf('%4.0f', area_de_aco);
figure; imshow(Ixx); title(['Área de aço = ', resultado, ' mm²']);

fprintf('\n\nÁrea de aço = %4.0f mm² \n\n', area_de_aco);

prompt = 'Quantas barras há na imagem?\n\nResposta: ';
n_barras = input(prompt);
text_n_barras = sprintf('%1.0f', n_barras);

prompt = '\n\nQual o sentido das barras na imagem?\n\n1-Transversais
2-Longitudinais 3-Sagitais\n\nResposta: ';
resposta_barras = input(prompt);

if resposta_barras == 1;
    prompt = '\n\nDeseja inserir valor de cobrimento?\n\n1-Sim 2-
Não\n\nResposta: ';
    resposta_cobrimento = input(prompt);
    if resposta_cobrimento == 1;
        imshow(Ixx); title('Cobrimento');
        O = imdistline;
        pause;
        l_barras = c - distance;
        l_barras_2 = l * l_barras;
        l_barras_3 = l_barras_2/c;
        area_p_aco = area_de_aco/n_barras;
        bitola_barras = area_p_aco/l_barras_3;
        resultado_bitola = sprintf('%2.2f', bitola_barras);
        if n_barras == 1
            figure; imshow(I); title(['Resultado: 1 barra com Ø ',
resultado_bitola, ' mm']);
        else
            figure; imshow(I); title(['Resultado: ', text_n_barras, '
barras com Ø ', resultado_bitola, ' mm']);
        end
    else
        area_p_aco = area_de_aco/n_barras;
        bitola_barras = area_p_aco/l;
        resultado_bitola = sprintf('%2.2f', bitola_barras);
        if n_barras == 1

```

```

        figure; imshow(I); title(['Resultado: 1 barra com Ø ',
resultado_bitola, ' mm']);
    else
        figure; imshow(I); title(['Resultado: ', text_n_barras, '
barras com Ø ', resultado_bitola, ' mm']);
    end
end
elseif resposta_barras == 2;
    prompt = '\n\nDeseja inserir valor de cobrimento?\n\n1-Sim 2-
Não\n\nResposta: ';
    resposta_cobrimento = input(prompt);
    if resposta_cobrimento == 1;
        imshow(Ixx); title('Cobrimento');
        O = imdistline;
        pause;
        l_barras = r - distance;
        l_barras_2 = h * l_barras;
        l_barras_3 = l_barras_2/r;
        area_p_aco = area_de_aco/n_barras;
        bitola_barras = area_p_aco/l_barras_3;
        resultado_bitola = sprintf('%2.2f', bitola_barras);
        if n_barras == 1
            figure; imshow(I); title(['Resultado: 1 barra com Ø ',
resultado_bitola, ' mm']);
        else
            figure; imshow(I); title(['Resultado: ', text_n_barras, '
barras com Ø ', resultado_bitola, ' mm']);
        end
    else
        area_p_aco = area_de_aco/n_barras;
        bitola_barras = area_p_aco/l;
        resultado_bitola = sprintf('%2.2f', bitola_barras);
        if n_barras == 1
            figure; imshow(I); title(['Resultado: 1 barra com Ø ',
resultado_bitola, ' mm']);
        else
            figure; imshow(I); title(['Resultado: ', text_n_barras, '
barras com Ø ', resultado_bitola, ' mm']);
        end
    end
end

else
    area_p_aco = area_de_aco/n_barras;
    raio_bitola_barras = sqrt(area_p_aco/pi);
    bitola_barras = raio_bitola_barras*2;
    resultado_bitola = sprintf('%2.2f', bitola_barras);
    if n_barras == 1
        figure; imshow(I); title(['Resultado: 1 barra com Ø ',
resultado_bitola, ' mm']);
    else
        figure; imshow(I); title(['Resultado: ', text_n_barras, '
barras com Ø ', resultado_bitola, ' mm']);
    end
end

fprintf('\n\nResultados:\n');
fprintf('\nÁrea total da imagem = %4.0f mm²', area_total);
fprintf('\nÁrea de aço = %4.0f mm²', area_de_aco);
fprintf('\nNúmero de barras = %1.0f un.', n_barras);
fprintf('\nÁrea por barra de aço = %4.0f mm²', area_p_aco);
fprintf('\nBitola dos aços = %2.2f mm\n\n', bitola_barras);

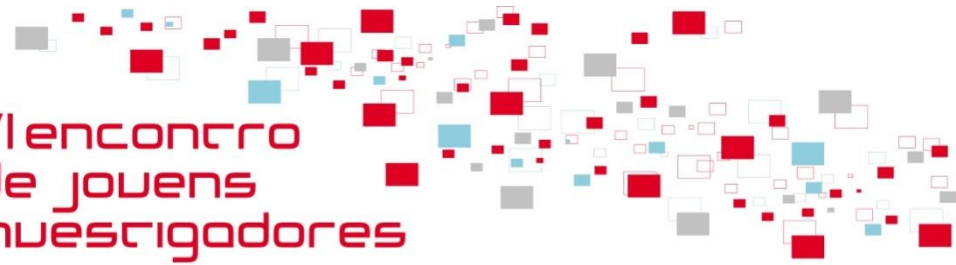
```

## ANEXO 4 – CERTIFICADO DE PARTICIPAÇÃO EM SEMINÁRIO



VI Encontro  
de jovens  
investigadores

5 de dezembro de 2019



### *Certificado de comunicação*

Certifica-se que **Marco Abreu Filho** apresentou no **VI Encontro de Jovens Investigadores**, que decorreu em Bragança, Portugal, no dia 5 de dezembro de 2019, a comunicação oral intitulada **A utilização de equipamento ultra-sónico na caracterização mecânica de elementos em betão armado**, tendo como autores:

Marco Abreu Filho, Eduarda Luso and Carlos Moreno

Bragança, 5 de dezembro de 2019

*A Comissão de Organização,*

*Orlando Rodrigues*

*Presidente do Instituto Politécnico de Bragança*