



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Civil



Capela Real do Palácio Nacional de Sintra: Estudo em Elementos de Madeira

VÂNIA SOFIA SIMÕES BAPTISTA
(Licenciada)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil –
Ramo Edificações

Orientadora:

Doutora Maria Dulce e Silva Franco Henriques

Júri:

Presidente: Doutor Filipe Manuel Vaz Pinto Almeida Vasques (ISEL)

Vogais:

Doutora Paula Raquel Pires da Cunha Lamego (ISEL)

Doutora Maria Dulce e Silva Franco Henriques (ISEL)

Dezembro de 2018

RESUMO

A Parques de Sintra – Monte da Lua é uma entidade responsável pela gestão e manutenção de monumentos e espaços naturais de Sintra e Queluz. Esta entidade propôs ao Departamento de Engenharia Civil do ISEL fazer um estudo sobre o estado de conservação de alguns elementos de madeira da tribuna da Capela Real do Palácio Nacional de Sintra.

A Capela Real faz parte de um monumento de elevada importância para a história e cultura de Portugal. Construída com robustas paredes de alvenaria e tendo em madeira toda a estrutura horizontal, bem como a estrutura de cobertura.

O presente estudo pretende detetar anomalias não visíveis e analisar o estado estrutural de um pavimento na zona da tribuna.

Para a realização do presente estudo, foi necessário proceder uma intensa revisão bibliográfica acerca de diversos aspetos relacionados com a madeira como material utilizado na construção, a sua durabilidade, que anomalias se esperam encontrar, como elaborar o seu diagnóstico, efetuar uma avaliação de segurança global e conhecer métodos de preservação de estruturas de madeira.

O estudo aos elementos de madeira *in situ* foi levado a cabo por uma inspeção visual e pela aplicação de ensaios não destrutivos e semi-destrutivos. Mediu-se o teor de humidade, a resistência à perfuração e à penetração. Com base na literatura científica e nos dados obtidos estimaram-se propriedades físicas e mecânicas. Também foi possível estimar propriedades de resistência com base em normas de classificação visual. Em Portugal, a NP 4305:1995 classifica uma peça de Pinho bravo português para estruturas, quanto à sua qualidade para Estruturas (E), ou Especial para Estruturas (EE). A BS 4978:2007 é a norma britânica que também classifica visualmente peças de madeiras resinosas, atribuindo as classes GS (General Structural) e SS (Special Structural). Esta classificação baseia-se na inspeção visual e definição dos seus defeitos (nós, inclinação do fio, taxa de crescimento, fendas, descaio, empenos, bolsas de resina e a existência de degradação por agentes biológicos).

Com os resultados obtidos, e alguns cálculos de verificação estrutural, de acordo com o Eurocódigo 5, conseguiram-se obter informações importantes. Verificou-se a existência de degradação por térmitas subterrâneas e por fungos nos montantes da parede da capela, e degradação por caruncho grande e fungos de podridão nas vigas do pavimento da tribuna. Neste último local, também se chegou à conclusão que é aconselhável limitar o número de visitantes simultâneos à tribuna.

Palavras-Chave: inspeção, diagnóstico, estruturas de madeira, conservação, monumentos

ABSTRACT

The Parques de Sintra – Monte da Lua is an entity responsible for the management and maintenance of monuments and natural spaces of Sintra and Queluz. It was proposed to the Engineer Civil Department of ISEL to make a study about the state of conservation of some wooden elements of the Royal Chapel of Palácio Nacional de Sintra.

The Royal Chapel is part of a monument with high importance to the Portuguese history and culture. It was built with strong masonry walls and with all horizontal structure made in wood, as well as the roof structure. This study claims to detect anomalies not visible and analyze the pavement structure of the tribune.

To elaborate this study, it was necessary to proceed an intensive bibliographic review about some aspects in relation to wood as a material used in construction, its durability, what pathologies were expected to find, how to make the diagnosis, do a global safety evaluation and know methods of preservation in wood structures.

The work was carried out in situ by visual inspection and by non-destructive and semi-destructive tests. Water content measurements, resistance drillings and penetration drillings were made. Physical-mechanical properties of the timber members were estimated based on the in situ measurements and the scientific literature.

It was possible to achieve resistance properties based in norms of visual classifications. In Portugal, the NP 4305:1995 classify a piece regarding their quality for Structures (E - Estruturas) or Special for Structures (EE – Especial para Estruturas). The BS 4978:2007, the British norm, visually classifies a piece as GS (General Structural) and SS (Special Structural). These classifications are based on a visual inspections and definition of his defects (knots, grain deviation, rate of growth, checks, gems, bent, resin ducts and biological agents).

From the results obtained and structural verification calculus within the Eurocode 5, several important information was taken. It was verified the existence of damage by subterranean termites and fungi on the walls of the chapel, and degradation by woodworms and rot fungi on the floor. Here, it was also concluded that it is advisable to limit the number of visitors to the tribune.

Keywords: inspection, diagnosis, wooden structures, conservation, monument

AGRADECIMENTOS

O primeiro agradecimento a ser feito será à minha orientadora, a Doutora Maria Dulce Franco Henriques que desde logo aceitou guiar-me e orientar-me naquilo que seria, a princípio, um estudo sobre as estacas pombalinas. Infelizmente não se conseguiu fazer o estudo, mas isso levou à enorme oportunidade de desenvolver o presente estudo no Palácio Nacional de Sintra. Agradeço por todos ensinamentos passados, pela ajuda nas inspeções, por sempre se mostrar disponível nas dúvidas que foram surgindo e por acreditar em mim.

Esta oportunidade não teria sido possível sem o contacto do Dr. Carlos Marques e do Eng. Daniel Silva da Parques de Sintra – Monte da Lua, a quem eu devo agradecer, não só pelo convite, mas também pela documentação fornecida, a permissão das visitas e toda a logística necessária para proceder às inspeções, como iluminação e acessos ao local. Devo agradecer também aos simpáticos funcionários do Palácio Nacional de Sintra que sempre me auxiliaram com o que precisava.

Agradeço também à NCREP, a consultora que realizou uma inspeção na capela, no decorrer do presente estudo, e que gentilmente cedeu fotografias e o levantamento geométrico da capela.

Ao Rafael que tanto me ajudou, não só com a sua paciência, apoio e motivação, mas também pela ajuda nas inspeções, visitas ao palácio e na formatação do documento word. Agradeço também pelas estacas pombalinas que foi buscar em obra e levou sozinho para as instalações do ISEL enquanto eu estava em Erasmus.

Agradeço também à minha amiga, ex-colega de turma e ex-colega de trabalho, Ester pela ajuda no levantamento e inspeção nas vigas da tribuna.

Embora não faça parte deste estudo, não posso deixar de agradecer também ao Arqueólogo Cristóvão Fonseca que me autorizou a levar estacas encontradas nas escavações para o parque subterrâneo do Campo das Cebolas, e ao Arqueólogo Artur Rocha do Banco de Portugal que não só cedeu algumas estacas pombalinas, encontradas durante a reabilitação da antiga igreja de S. Julião, como também se disponibilizou para fornecer documentação e registos fotográficos.

Um enorme agradecimento aos meus pais e irmãs que são as pessoas mais importantes da minha vida, a quem eu devo a pessoa que sou e tudo o que tenho hoje.

Por fim agradeço também aos meus amigos pelo apoio moral ao longo deste percurso; Margarida, Inês, André, João Tiago e Daniel.

De modo geral devo também agradecer a todos os que passaram na minha vida neste percurso académico, porque “Aqueles que passam por nós, não vão sós, não nos deixam sós. Deixam um pouco de si, levam um pouco de nós.” - Antoine de Saint-Exupéry.

*“Nessun effetto è in natura senza cagione:
Intendi la ragione e non ti bisognerà l’esperienza”*

Leonardo Da Vinci

ÍNDICE GERAL

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO.....	2
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	2
2.	O PALÁCIO NACIONAL DE SINTRA - ENQUADRAMENTO HISTÓRICO	4
2.1	A CAPELA REAL	6
2.2	A ESTRUTURA DA CAPELA REAL	8
3.	A MADEIRA COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO	13
3.1	CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA	14
3.1.1	ANISOTROPIA.....	14
3.1.2	TEOR EM ÁGUA.....	15
3.1.3	MASSA VOLÚMICA.....	17
3.1.4	DUREZA	18
3.1.5	DEFEITOS DA MADEIRA	18
3.2	DURABILIDADE.....	22
3.2.1	FATORES DE DEGRADAÇÃO DA MADEIRA.....	22
3.2.1.1	Fatores Físicos.....	22
3.2.1.2	Fatores Químicos.....	24
3.2.1.3	Fatores Biológicos.....	24
3.2.2	DURABILIDADE NATURAL	26
3.2.3	CLASSES DE RISCO	27
3.2.4	TÉCNICAS DE REABILITAÇÃO.....	28
3.3	VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA	30
3.3.1	ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS.....	33
3.3.1.1	Flexão Simples	33
3.3.1.2	Corte.....	36
3.3.2	ESTADOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO	37
3.3.2.1	Deformação por Fluência	37
3.3.3	VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA AO FOGO	39
3.4	TÉCNICAS E METODOLOGIAS DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO.....	42
3.4.1	FASES DA INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO.....	43
3.4.1.1	Inspeção Visual	43
3.4.1.2	Meios Auxiliares de Diagnóstico	44
3.4.1.3	Tratamento dos Resultados	45
4.	INSPEÇÃO NA CAPELA REAL	47
4.1	APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	47

4.2	INSPEÇÃO DO REVESTIMENTO DAS PAREDES E TETO	48
4.2.1	PAINEL SUL	50
4.2.1.1	Teor em água e ambiente interior no local em estudo.....	50
4.2.1.2	Resistência à perfuração.....	52
4.2.2	PAINEL NORTE.....	59
4.2.2.1	Teor em água e ambiente interior no local em estudo.....	59
4.2.2.2	Resistência à perfuração.....	61
4.2.3	CONCLUSÃO	66
4.3	INSPEÇÃO DAS VIGAS DO PAVIMENTO DA TRIBUNA.....	66
4.3.1	INSPEÇÃO VISUAL	67
4.3.2	MEDIÇÕES COM OS MEIOS AUXILIARES DE DIAGNÓSTICO	69
4.3.3	CONCLUSÃO	77
5.	CLASSIFICAÇÃO VISUAL	79
5.1	CLASSIFICAÇÃO VISUAL SEGUNDO A NORMA PORTUGUESA NP 4305:1995	79
5.2	CLASSIFICAÇÃO VISUAL SEGUNDO A NORMA BRITÂNICA BS 4978:2007.....	84
5.3	CONCLUSÃO	89
6.	VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA DAS VIGAS DA TRIBUNA	92
6.1	VERIFICAÇÃO AOS ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS	93
6.2	VERIFICAÇÃO AOS ESTADOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO.....	95
6.3	VERIFICAÇÃO AO FOGO.....	96
6.4	CONCLUSÃO	98
7.	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	100
7.1	CONCLUSÕES.....	100
7.2	ESTUDOS FUTUROS.....	103
	LISTA DE REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho do Palácio de Sintra do Livro das Fortalezas de Duarte de Armas (1509) (Correia, 1993).....	5
Figura 2 - Capela Real - vista para o altar-mor	7
Figura 3 - Detalhe da pintura das paredes (“Resumo Introdução Hstórica Capela Palatina,” n.d.)	7
Figura 4 - Planta da Capela Real.....	8
Figura 5 - Estrutura da cobertura: a) asna; b) pormenor da cobertura pelo exterior – (NCREP, 2018)	8
Figura 6 - Alçado da Asna existente na zona da tribuna – NCREP	9
Figura 7 - Teto da Capela, representado n’O Paço de Cintra de 1903, sobreposto com a foto do local (“Resumo Introdução Histórica Capela Palatina,” s.d.)	10
Figura 8 - Corte da Capela da zona em Estudo (NCREP, 2018).....	10
Figura 9 - Pormenor do apoio das vigas de madeira do piso 1 na viga metálica	11
Figura 10 - Suporte do Pavimento do piso 1 da Tribuna.....	11
Figura 11 - Secção de um tronco de uma árvore resinosa.....	14
Figura 12 - Resistência do pinho bravo às principais solicitações mecânicas.	15
Figura 13 - Teor de água de equilíbrio da madeira de Pinho bravo em função das condições higrotérmicas ambientais (LNEC, 1997c).....	16
Figura 14 - Direções tangencial, radial e longitudinal e respetivos coeficientes de retração em termos relativos (valores médios para o Pinho Bravo) (LNEC, 1997c).....	17
Figura 15 - Grupo de nós e projeção dos mesmos na secção (NP 4305: 1995)	19
Figura 16 - Projeção dos nós na secção, mostrando a área total e a área marginal (a/4) (NP 4305: 1995)	19
Figura 17 - Medição do descaio (NP 4305: 1995)	21
Figura 18 - Medição dos Empenos (LNEC, 1997b).....	21
Figura 19 - Fatores de Degradação da Madeira	22
Figura 20 - Imagem de estrutura metálica e de madeira após incêndio (autor desconhecido)....	23
Figura 21 - Ataque de podridão castanha e podridão branca (Coleman, 2003)	25
Figura 22 - Tipos de empalme em zonas de apoio com: a) chapas metálicas; b) madeira; c) substituição parcial por madeira sã; d) epoxi e barras de reforço (Arriaga; et al, 2002).....	30
Figura 23 - Planta da Capela Real (NCREP, 2018)	47
Figura 24 - Painel Sul, localização dos painéis vertical e diagonal.....	48
Figura 25 - Parede Sul com evidência de a) Lixo e detritos acumulados entre o revestimento b) Degradação dos montantes.....	49
Figura 26 - Meios auxiliares de diagnóstico	50
Figura 27 - Esquema da localização dos montantes.....	50
Figura 28 - Corte do montante 6 com representação da degradação encontrada	57
Figura 29 -Corte do montante 7 com representação da degradação encontrada	58
Figura 30 - Registo do exterior do Palácio Nacional de Sintra 27/03/2018.....	59
Figura 31 - Localização dos montantes no painel Norte	60
Figura 32 - Medição do teor em água com humidímetro de agulhas	61
Figura 33 - Realização do ensaio com o resistógrafo.....	62
Figura 34 - Registo do exterior do Palácio Nacional de Sintra 28/06/2018.....	67
Figura 35 - Vigas da Tribuna	67
Figura 36 - Pormenor do travamento com elemento na diagonal	68
Figura 37 - Material utilizado na inspeção às vigas da tribuna	69
Figura 38 - Execução de ensaio com resistógrafo na viga V1	71

Nota: Todas as figuras ou fotografias com autoria não identificada são da responsabilidade da autora da presente dissertação.

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Características de durabilidade natural e de impregnabilidade da madeira de Pinheiro Bravo (LNEC, 1997b).....	27
Tabela 2 - Situações gerais de serviço e classes de risco (LNEC, 1997a)	27
Tabela 3 - Classes de duração das ações (EN 1995:2004) adaptado.....	31
Tabela 4 - Categorias de Utilização (NP EN 1991:2009)	32
Tabela 5 - Sobrecargas em pavimentos, varandas e escadas de edifícios (NP EN 1991:2009) ..	32
Tabela 6 - Valores de k_{mod} (EN 1995:2004)	35
Tabela 7 - Coeficientes parciais γ_M recomendados para as propriedades dos materiais (EN 1995:2004).....	36
Tabela 8 - Valores de k_{def} (EN 1995:2004)	39
Tabela 9 - Exemplos de valores limites para as flechas de vigas (EN 1995:2004).....	39
Tabela 10 - Valores de k_{fi}	40
Tabela 11 - Taxa de carbonização da madeira	42
Tabela 12 - Teor em água medido com Humidímetro de contacto e de agulhas no painel Sul .	51
Tabela 13 – Relação entre o teor de água de equilíbrio da madeira de Pinho bravo e as condições higrotérmicas ambientais em edifícios (Henriques, 2011)	52
Tabela 14 - Medidas Resistográficas do Montante 3	55
Tabela 15 - Medida Resistográfica do montante 6.....	56
Tabela 16 - Medida Resistográfica do montante 7.....	59
Tabela 17 - Valores de teor em água medidos com Humidímetro de contacto e de agulhas no painel vertical Norte.....	60
Tabela 18 - Valores de teor em água com Humidímetro de contacto e de agulhas no painel diagonal Norte.....	61
Tabela 19 - Medidas Resistográficas dos montantes do painel Norte.....	66
Tabela 20 - Levantamento geométrico das vigas da tribuna	68
Tabela 21 - Teores em água dos ensaios com o Humidímetro e profundidade de penetração com o Pylodin na viga V1	70
Tabela 22 - Teores em água dos ensaios com o Humidímetro e profundidade de penetração com o Pylodin nas vigas V2, V3 e V4	70
Tabela 23 - Teores em água dos ensaios com o Humidímetro e profundidade de penetração com o Pylodin nas vigas V5, V6 e V7	71
Tabela 24 - Medidas Resistográficas da Viga V1	73
Tabela 25 - Medidas Resistográficas da viga V4.....	74
Tabela 26 - Medidas Resistográficas da viga V6.....	75
Tabela 27 - Medidas resistográficas da viga V7	76
Tabela 28 - Classificação Visual (LNEC, 1997b).....	80
Tabela 29 - Cálculos para o parâmetro Nós segundo a NP 4305:1995	81
Tabela 30 - Cálculos para a inclinação do fio segundo a NP4305:1995	81
Tabela 31 - Cálculos para o parâmetro fenda segundo a NP4305:1995.....	82
Tabela 32 - Cálculos para o parâmetro Descaio segundo a NP4304:1995.....	83
Tabela 33 - Atribuição de Classe de Qualidade às vigas em estudo segundo a NP4305:1995 ...	84
Tabela 34 - Limites para a classificação visual segundo a BS 4978:2007.....	86
Tabela 35 - Cálculos para o parâmetro nós segundo a BS 4978:2007	87
Tabela 36 - Cálculos para o parâmetro inclinação do fio segundo a BS 4978:2007.....	87
Tabela 37 - Cálculos para o parâmetro fendas segundo a BS 4978:2007	88
Tabela 38 - Cálculos para o parâmetro descaio segundo a BS 4978:2007.....	88
Tabela 39 - Classificação final das vigas segundo a BS 4978:2007	89
Tabela 40 - Classificação das vigas tendo em conta que se trata de uma estrutura em serviço segundo a NP 4302:2005 para Pinho bravo e a BS 4978:2007 para Casquinha	90

Tabela 41 - Valores característicos da Classe de Resistência C24 e C16 (EN 338:2003)	91
Tabela 42 - Massa Volúmica das Vigas	92
Tabela 43 - Apresentação dos cálculos para as combinações	93
Tabela 44 - Cálculos da Verificação da Resistência à Flexão.....	94
Tabela 45 - Cálculos da Verificação da resistência ao corte	94
Tabela 46 - Cálculos da Verificação da Resistência à Flexão diminuindo a sobrecarga	95
Tabela 47 - Cálculos da Verificação da resistência ao corte diminuindo a sobrecarga.....	95
Tabela 48 - Apresentação dos Cálculos para a Verificação à Deformação por Fluência.....	96
Tabela 49 - Apresentação dos cálculos para a verificação da resistência à flexão simples após incêndio	97
Tabela 50 - Apresentação dos cálculos para a verificação da resistência ao corte após incêndio	98

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Perfil Resistográfico R69.....	53
Gráfico 2 - Perfil Resistográfico R71.....	53
Gráfico 3 - Perfil Resistográfico R75.....	54
Gráfico 4 - Perfil Resistográfico R78.....	54
Gráfico 5- Perfil Resistográfico R89.....	55
Gráfico 6 - Perfil Resistográfico R90.....	56
Gráfico 7 - Perfil Resistográfico 93	56
Gráfico 8 - Perfil Resistográfico R94.....	57
Gráfico 9 - Perfil Resistográfico R99.....	58
Gráfico 10 - Perfil Resistográfico R102.....	62
Gráfico 11 - Perfil Resistográfico R141.....	62
Gráfico 12 - Perfil Resistográfico R104.....	63
Gráfico 13 - Perfil Resistográfico R131.....	63
Gráfico 14 - Perfil Resistográfico R105.....	64
Gráfico 15 - Perfil Resistográfico R107.....	64
Gráfico 16 - Perfil Resistográfico R109.....	64
Gráfico 17 - Perfil Resistográfico R113.....	65
Gráfico 18 - Perfil Resistográfico R114.....	65
Gráfico 19 - Perfil Resistográfico R155.....	72
Gráfico 20 - Perfil resistográfico R158.....	72
Gráfico 21 - Perfil Resistográfico R176.....	73
Gráfico 22 - Perfil Resistográfico R172.....	74
Gráfico 23 - Perfil Resistográfico R182.....	75
Gráfico 24 - Perfil Resistográfico R162.....	76
Gráfico 25 - Perfil Resistográfico R165.....	76

1. INTRODUÇÃO

A Parques de Sintra – Monte da Lua, S.A. é uma entidade criada em 2010, responsável pela gestão de alguns monumentos e espaços naturais situados em Sintra e Queluz. Esta gestão implica a exploração, manutenção, conservação e divulgação desses espaços para fins turístico-culturais. Neste momento, a Parques de Sintra é responsável pelos seguintes espaços: Parque e Palácio da Pena, Abegoaria da Quinta da Pena, Jardins e Chalet da Condessa D'Edla, Palácio Nacional de Sintra, Palácio Nacional de Queluz, Escola Portuguesa de Arte Equestre, Parque e Palácio de Monserrate, Quintinha de Monserrate, Castelo dos Mouros, Convento dos Capuchos e Vila Sasseti.

No âmbito dos trabalhos de requalificação e conservação do Palácio Nacional de Sintra, a Parques de Sintra – Monte da Lua, S.A. considerou ser necessárias algumas verificações quanto ao estado de conservação e segurança de alguns elementos estruturais em madeira da Capela Real. Foi, então, proposto ao Departamento de Engenharia Civil do ISEL fazer um estudo no revestimento da parede e das vigas da tribuna. Deste modo, o presente trabalho pretende dar uma resposta à Parques de Sintra com um estudo sobre o grau de conservação do revestimento das paredes em madeira e respectivos montantes, bem como das vigas da tribuna da Capela Real.

Nos últimos anos, tem-se vindo a observar uma crescente preocupação na reabilitação de edifícios e monumentos históricos, algo que pode ser impulsionado com o ambiente que se vive atualmente, em que o país apresenta uma boa imagem a nível internacional, estando as cidades de Lisboa e Porto mencionadas como destinos turísticos de referência.

A madeira é um dos materiais que fazem parte da essência de monumentos antigos, como o Palácio Nacional de Sintra. A madeira foi um material amplamente utilizado até meados do século XX, tendo vindo a cair em desuso com o surgimento e otimismo no desempenho do betão armado. Porém, e após a criação de normas para cálculo estrutural de estruturas de madeira, como o Eurocódigo 5, nos anos 90, a imagem da madeira como material de construção começou a mudar. (Cruz, H et.al.; 2000)

Pode-se afirmar que a madeira é o único material de construção 100% sustentável, pois é proveniente de uma fonte de regeneração contínua, a floresta, e, adotando-se regras para a sua utilização e reflorestação garante-se a sua renovação, não comprometendo a falta deste material em gerações futuras. A energia despendida na sua laboração e baixa massa volúmica contribuem para um reduzido consumo de energia, quando comparada com os outros materiais estruturais. Além de mais, os desperdícios resultantes da sua laboração são totalmente aproveitáveis, quer na fabricação de derivados da madeira, quer na produção de biomassa, entre outros. (Henriques, D.; 2018)

Reabilitar monumentos requer uma atenção redobrada tanto nas opções do tipo de inspeção a fazer, como nas técnicas de reabilitação a aplicar. No artigo 1º da Carta de Veneza vem definida uma noção de monumento histórico: “... engloba a criação arquitectónica isolada, bem como o sítio, rural ou urbano, que constitua testemunho de uma civilização particular, de uma evolução significativa ou de um acontecimento histórico.”. Refere ainda, no artigo 8º que “O monumento é inseparável da História, da qual é testemunho, e também do meio onde está inserido.”(Gazzola, et al 1964). Estas definições devem estar sempre presentes quando se pretende executar uma intervenção de inspeção, como a que se seguirá.

Muito do património histórico e cultural de Portugal, tem como material estrutural a madeira. A madeira é um material de grande variabilidade natural, com um comportamento anisotrópico, higroscópico e muito suscetível de degradação por agentes biológicos.

A inspeção e avaliação de estruturas de madeira em serviço requer conhecimentos e experiência, tanto por parte de engenheiros e arquitetos, como de profissionais, como os carpinteiros, para que os resultados de uma intervenção sejam mais eficazes. (Cruz, H.; 2011)

É muito importante que num trabalho de inspeção de um edifício se compreenda o funcionamento da estrutura, e logo na primeira visita de inspeção, deve-se procurar por anomalias e identificar elementos e/ou secções críticas. Devem ser criadas condições de acesso à estrutura ou elementos a intervir, e recolher o máximo de informação possível sobre o edifício (construção, alterações, ocupação, reparações e tratamentos). Numa fase posterior devem ser procurados indícios de má conservação, deformações excessivas, zonas com humedificação frequente, entradas de águas e zonas pouco ventiladas. Estas serão as zonas que, muito provavelmente serão alvo de anomalias. Após esta identificação, passa-se a um reconhecimento do tipo de patologia existente e recorre-se a meios auxiliares de diagnóstico, não só para melhor identificar o impacto desse ataque no elemento estrutural, mas também para o caracterizar física e mecanicamente. (Cruz, H.; 2011)

Com esta caracterização, estudos mais aprofundados, podem ser elaborados e utilizados para se decidir que opções tomar quanto à sua reabilitação. Está já reconhecido que a conservação da madeira em edifícios é essencial para a manutenção da autenticidade e integridade do património cultural, por isso estas intervenções devem ser elaboradas respeitando os valores estéticos e histórico dos edifícios, bem como a sua integridade física.

1.1 OBJETIVO

Pretende-se com o presente trabalho estudar elementos de madeira da Capela Real do Palácio Nacional de Sinta, aplicando métodos de inspeção semi-destrutivos e/ou não destrutivos. Engloba a avaliação do estado de conservação do revestimento de paredes da capela, bem como a verificação estrutural das vigas de suporte da tribuna na capela.

Esta estrutura é de madeira e para se poder avaliá-la da melhor forma é necessário compreender o que é a madeira como um material de construção, utilizada desde há muitos séculos pelo Homem. Compreender a sua estrutura anatómica e estudar as suas propriedades físicas e mecânicas, ajudarão a entender o seu comportamento perante ações exercidas sobre esta.

De forma a conseguir efetuar a inspeção que se propõe, será importante estudar os tipos de anomalias que habitualmente surgem em estruturas de madeira, bem como os seus possíveis tratamentos. As metodologias de inspeção serão também descritas, referindo os instrumentos a utilizar.

Ir-se-á colocar em prática as metodologias e técnicas de inspeção, e posteriormente, fazer uma análise dos dados de forma a obter, não só uma caracterização do estado de conservação da madeira no local, mas também conseguir valores e classes para prosseguir com uma verificação de segurança estrutural de acordo com as normas portuguesas e europeias em vigor.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente Trabalho Final de Mestrado será organizado de acordo com o descrito em seguida.

O presente capítulo, o primeiro é a Introdução, onde se define o âmbito do trabalho, o seu enquadramento, os objetivos, e por fim a organização do trabalho.

O Capítulo 2 referir-se-á à descrição do Palácio Nacional de Sintra, dando a conhecer a sua origem, as etapas de construção e estilos arquitetónicos encontrados, bem como a caracterização pormenorizada da Capela Real e da sua estrutura.

No Capítulo 3 apresentar-se-á o conhecimento adquirido sobre as principais características da madeira como material de construção, as suas propriedades físicas e mecânicas, assim como os respetivos fatores de degradação. Aqui constam os tipos de anomalias que se espera encontrar numa estrutura de madeira num monumento antigo. Também será feita uma breve apresentação de metodologias de preservação e conservação da madeira. No final deste capítulo serão apresentados os cálculos a realizar para a verificação de segurança de estruturas de madeira. Também aqui serão estudadas técnicas de inspeção visual e de diagnóstico, onde serão descritos os meios auxiliares de diagnóstico que se irão utilizar.

O Capítulo 4 irá incidir sobre todo o processo de inspeção visual, aplicação das metodologias de diagnóstico, com os respetivos meios auxiliares, o tratamento de dados e apresentação desses resultados. Esta inspeção será elaborada em parte da cobertura, ao qual se teve acesso pelo segundo piso da tribuna, e nas vigas de suporte ao pavimento do primeiro piso. O desenvolvimento do trabalho apresentado neste capítulo terá em conta o estudado nos capítulos anteriores.

Após a inspeção visual às vigas da tribuna, o Capítulo 5 corresponderá à classificação visual tendo em conta os dados recolhidos. Esta classificação será feita de acordo com uma norma portuguesa e uma norma britânica.

O Capítulo 6 estabelece a continuidade do anterior, no qual, com resultados obtidos, far-se-á a verificação estrutural às vigas da tribuna.

Por fim, o último capítulo, o Capítulo 7, será dedicado às conclusões e considerações finais.

2. O PALÁCIO NACIONAL DE SINTRA - ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

O Palácio Nacional de Sintra, tal como o conhecemos hoje é produto de várias intervenções ao longo de mais de 800 anos da História de Portugal. A primeira vez que é referida a existência deste palácio remonta ao século X, quando um geógrafo árabe afirma a existência de dois castelos na vila de Sintra, um será o Castelo dos Mouros e o segundo que fica no Chão de Oliva, nome dado à zona onde fica o Palácio Nacional de Sintra (Alcaparra, M. C.; Martins, Ana O.; Esteves, 2017).

O referido geógrafo, chamado de Al-Bacr em Correia (1993) e em Franco (1987), é mencionado por estes autores, como pertencendo à família dos príncipes de Huelva e Saltes. Al-Bacr descreve assim, Sintra “é uma das vilas que dependem de Lisboa (...) nas proximidades do mar. (...) O seu clima é são e os habitantes vivem longo tempo. Tem dois castelos que são de extrema solidez.” (apud FRANCO, 1987, p. 19).

Em 1147, com a conquista de Lisboa aos mouros, D. Afonso Henriques expulsa a maioria dos mouros desta região, e em 1154 é dada a Carta de Foral à vila de Sintra (Correia, 1993). Mas só no reinado de D. Afonso III [1248 - 1279], aquando da conquista do Algarve em 1249, se expulsaram os muçulmanos de Portugal dando fim ao poder político islâmico, mas permanecendo as influências a nível artístico e arquitetónico (Franco, 1987). Pensa-se que foi no reinado de D. Dinis [1279 - 1325] que se efetuaram as primeiras intervenções. Esta assunção é feita a partir de um documento escrito por D. Dinis em 1281, onde lembra aos moradores de Colares a obrigação de renovarem e restaurarem as suas casas, tal como este faria na “mea palacia de oliva” (Correia, 1993).

É no início da segunda dinastia, a de Aviz, com ordens do rei D. João I [1385 - 1433], que a maior parte da construção do palácio se dá. A esta época dá-se o nome de época joanina. Inicialmente o rei D. João I não mostra grande interesse no palácio. Pensa-se que foi D. Filipa de Lencastre que o incentivou a fazer as obras no palácio, por apreciar a zona de Sintra que a fazia lembrar do seu país, a Grã-Bertanha (Franco, 1987). Francisco da Fonseca Benevide, escreve em 1878, o seguinte: “Em Cintra tece D. Filippa por vezes a sua côrte. Ao passo que no velho palácio, restaurado e augmentado por seu esposo, se reuniam os fidalgos, os nobres e o clero, em galantes e pacíficos entretenimentos, ahi se pensava tambem nos grandes projectos que o rei e seus filhos tinham em mente; ahi se combinaram, se fizeram e discutiram planos, cuja execução devia mais tarde elevar ao seu alto e brilhante destino o nome portuguez.” (apud FRANCO, 1987).

Fazem parte da época joanina a construção da cozinha, com as duas grandes e típicas chaminés, com bases ortogonais e divididas por uma larga ogiva, que nos remete para um estilo gótico (Almeida, 1980). O teto da cozinha é formado por estas duas chaminés, com uma altura de 33 m, e que vai estreitando, aparecendo a luz solar dentro da cozinha através delas. Faz também parte das construções joaninas, a Sala dos Cisnes, a Sala das Pegas, a Sala das Sereias, alguns quartos de dormir, a Casa de Meca e a Capela Real, esta já pensada anteriormente por D. Dinis e, a pedido da Rainha Santa Isabel, em honra do Divino Espirito Santo (Correia, 1993). Em todas estas salas se vislumbra o estilo gótico e mudéjar, característico da época joanina. O estilo gótico caracteriza-se pela existência dos arcos quebrados, ou ogivas e que em Portugal dura entre os séculos XII a XVI. Numa fase mais tardia, este estilo começa a denominar-se por “estilo manuelino” devido aos ornamentos e elementos ligados ao mar e aos descobrimentos, bem como a representação da Cruz de Cristo, (emblemas reais de D. Manuel I, impulsionador dos descobrimentos), e a esfera armilar. O estilo mudéjar caracteriza-se pela presença de uma variedade infinita de figuras geométricas e estrelados, formando simetrias complexas (Almeida, 1980).

A dinastia de Aviz consegue desfrutar deste Paço, como residência de Verão, devido ao clima fresco e às águas límpidas em abundância, bem como para caçadas pela serra (Correia, 1993).

Mais tarde, é o rei D. Manuel I [1495 - 1521] que ordena a construção de mais dependências, sendo uma delas, a ala direita da fachada principal, a Torre dos Brasões (Figura 1), onde anteriormente ficava a Casa de Meca (Correia, 1993). Aqui impera o estilo manuelino, nas janelas da fachada principal da ala direita, com os ornamentos característicos do próprio estilo, e na porta de entrada para a Sala dos Brasões. É também mandada construir uma escada em caracol, com inspiração italiana, que dá acesso à Sala dos Archeiros. O Paço de Sintra conjuga assim, harmoniosamente os estilos gótico-mourisco, o manuelino e o italianizante (Correia, 1993).

No que se refere à construção, é feita uma descrição, pelo abade Castro e Souza, em 1838, que refere o seguinte: “Todo elle é construído de boa cantaria, e de uma solidez, e firmeza que parece affrontar os seculos. As suas fachadas, colunas, arcos, capitéis, e bases, são guarnecidos de um numero immenso de engraçados ornatos, esculpturas, e baixos relevos; (...). Architectura sublime e magestosa, colossal, não monótona e compassada, mas rica de variedade; não silenciosa e muda, mas animada e viva, fazendo fallar as pedras, que os nossos antepassados souberam tão felizmente imitar, e conservar até ao glorioso reinado d’El Rei D. Manoel.” (Castro, 2005).

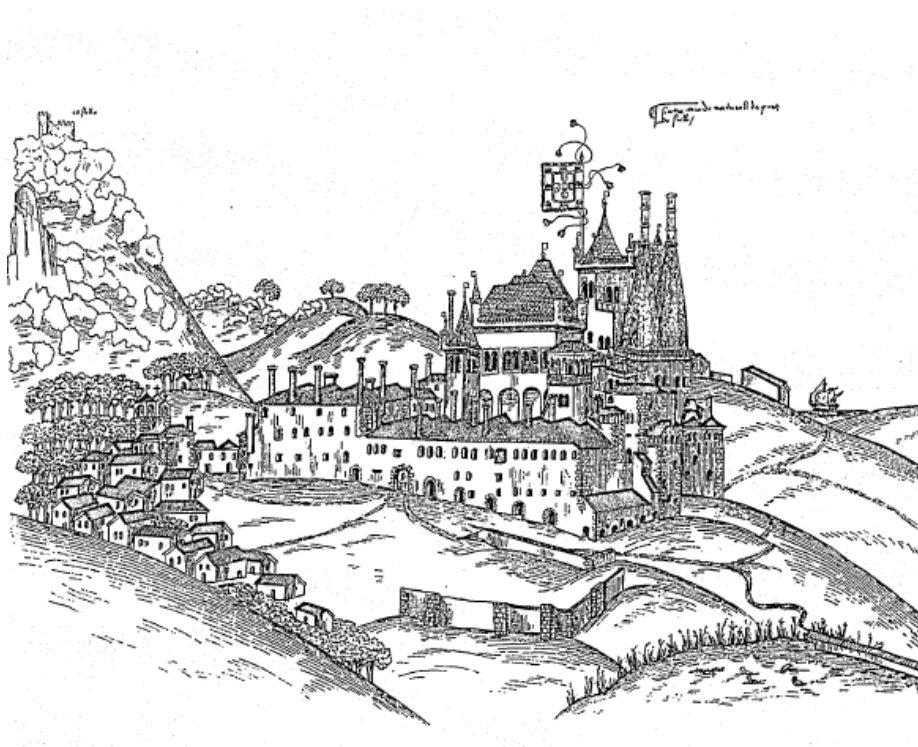


Figura 1 - Desenho do Palácio de Sintra do Livro das Fortalezas de Duarte de Armas (1509) (Correia, 1993)

O Palácio Nacional de Sintra é testemunha da História Portuguesa, tendo alguns dos acontecimentos mais importantes passado por este edifício. Foi aqui que se decidiu, em 1415 a expedição a Ceuta, e onde se deu a primeira leitura dos *Lusíadas* ao rei D. Sebastião I [1557-1578]. Foi na Sala das Colunas onde nasceu e morreu D. Afonso V [1438 - 1481], a Janeiro de 1432 e em Agosto de 1481, respetivamente. D. Manuel I aqui fazia grandes festas, e foi em 1499 que o navegador Nicolau Coelho lhe trouxe a notícia da descoberta da Índia por Vasco da Gama, e em 1500 a notícia de que Pedro Álvares Cabral tinha descoberto as terras de Vera Cruz que tantas riquezas trouxeram a Portugal. No reinado de D. João III [1521 - 1557], o palácio perde importância, permanecendo completamente abandonado durante a dinastia Filipina. Entre os anos 1674 a 1683, D. Afonso VI [1656 - 1683] aqui esteve feito prisioneiro até à sua morte, por

conspirar contra o seu irmão, D. Pedro II [1683 - 1706], que lhe tomou o reino e a esposa. Apenas no reinado de D. Maria II [1826 - 1853], o palácio voltou a ter uma nova vida, pois o seu marido D. Fernando, adorava a serra de Sintra e foi um dos maiores impulsionadores da construção do Palácio da Pena, no lugar do antigo Mosteiro da Pena. Estes reis fixaram-se no Paço para acompanhar as obras (Almeida, 1980; Franco, 1987).

É importante referir que o Palácio Nacional de Sintra, sofreu bastante com o terramoto de 1 de Novembro de 1755, tendo sido restaurado por Carlos Mardel, e tendo sido também alvo de grandes obras ordenadas pela rainha D. Maria I [1777 - 1816], entre 1784 e 1787 (Correia, 1993).

O Palácio torna-se novamente residência de Verão, pelo rei D. Luis I [1861 - 1889] e a sua esposa, D. Maria Pia de Saboia, aqui recebem e homenageiam, em 1885, Capelo e Ivens, exploradores africanos. Também o rei D. Carlos I [1889 - 1908] e a sua mulher a rainha D. Amélia aqui passavam os verões. A última moradora deste palácio foi D. Maria Pia, que deixou o palácio a 5 de Outubro de 1910 a caminho do exílio (Almeida, 1980; Franco, 1987; Correia, 1993).

2.1 A CAPELA REAL

O objeto de estudo, a Capela Real, foi mandada erguer durante o reinado de D. Dinis [1279 - 1325], no mesmo local onde se pensa ter existido uma mesquita Árabe, e cujo pavimento cerâmico, ainda hoje existente, contém vestígios dessa mesma mesquita. (Sabugosa, 1903). Este tapete é considerado pelo Conde de Sabugosa, uma evidência da origem árabe deste palácio, afirmando ser “a obra de arte mais antiga que existe no monumento”. O pavimento cerâmico é composto por tijoleiras e ao centro o referido tapete cerâmico, composto por desenhos geométricos de várias cores, revelando o estilo mudéjar, como se observa na Figura 2 (Silva, 2002).

O Espírito Santo ficou o padroeiro desta capela, sendo representado nas paredes desta por pombas brancas em voo, e que levam no bico um ramo de oliveira, pintadas sobre losangos com um fundo bordeaux.

O teto, também representativo do estilo mudéjar e árabe, - influência arquitetónica e construtiva que ficou presente durante vários séculos na Península Ibérica – integrado no conjunto de tetos de alfarge ou de “trabalho de laço” existentes em Portugal continental e na ilha da Madeira, como mostra a mesma figura. É todo feito em madeira, sendo suportado por uma estrutura também de madeira. Este terá sido mandado construir pelo rei D. Afonso V [1438 - 1481] estando o seu brasão representado junto ao altar-mor (Silva, 2002)



Figura 2 - Capela Real - vista para o altar-mor

Ao longo dos anos de existência da capela, foram várias as intervenções e alterações aqui elaboradas. Após o terramoto de 1755, uma das alterações feitas foi a pintura das paredes em branco e assim se manteve até 1936, ano em que no contexto de ações desenvolvidas pela Direcção-Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais, se fez uma reconstituição das pinturas originais. Junto ao altar-mor pode-se observar marcas da pintura original do século XV, a Figura 3 mostra um detalhe em que do lado esquerdo está a pintura de reconstituição, mais recente, e do lado direito a pintura original recuperada. (“Resumo Introdução Histórica Capela Palatina,” s.d.)



Figura 3 - Detalhe da pintura das paredes (“Resumo Introdução Hstórica Capela Palatina,” n.d.)

De referir que as janelas existentes, com vão em pedra em ogiva e com vitral, denotam o estilo gótico da construção. As duas janelas junto ao altar-mor, são já de estilo manuelino. (“Resumo Introdução Hstórica Capela Palatina,” s.d.)

A Capela Real do Palácio Nacional de Sintra, para além de ser um local de culto religioso, é um espaço de altíssima importância para a história de Portugal e para a arquitetura portuguesa. Uma herança portuguesa onde se reúnem os estilos gótico, mudéjar e manuelino, combinados de forma perfeita.

2.2 A ESTRUTURA DA CAPELA REAL

Como referido anteriormente, a construção da Capela Real, data de entre os reinados de D. Dinis I e de D. João I, portanto entre os séculos XVIII e XV, existindo sempre algumas alterações no decorrer dos anos.

A Capela Real é constituída por fundações e paredes de alvenaria de pedra regular, bem alinhada e aparelhada, tal como era exigido em construções desta magnitude e importância. A capela, à semelhança do que são outras construções eclesíásticas, tem uma planta em forma de cruz (Figura 4).

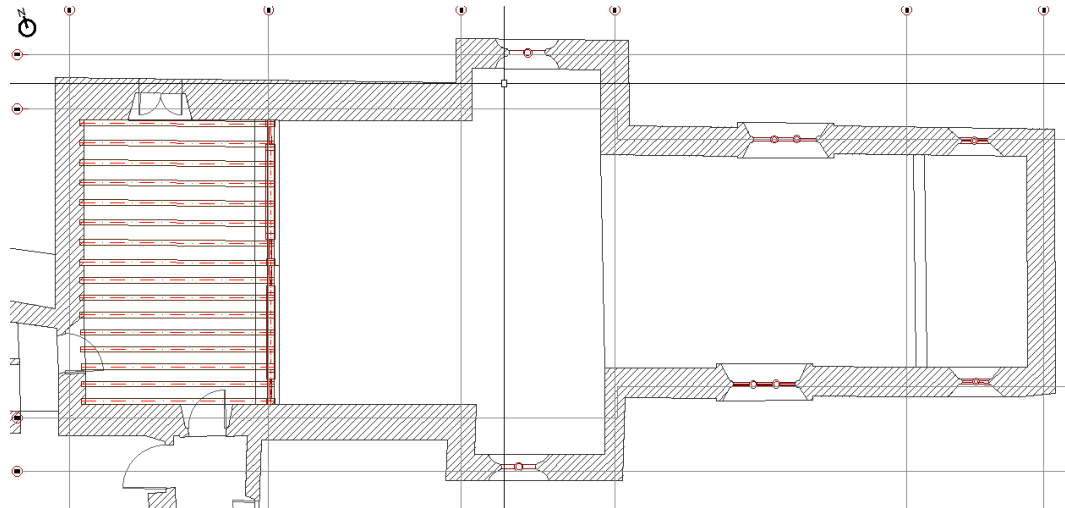


Figura 4 - Planta da Capela Real

A cobertura é de três águas, com dois rincões na zona da capela-mor, na zona mais a Oeste. Do lado oposto a capela é contígua com outra parte do palácio. A sua estrutura de suporte, bem como a de suporte ao revestimento do teto de alfarge é de madeira, cuja estrutura principal é composta por asnas de secções roladas. Sobre estas, estão apoiadas tábuas de madeira que por sua vez dão apoio a ripas de pequena secção onde são colocadas as telhas cerâmicas. Nas figuras seguintes pode-se observar as asnas e o pormenor construtivo das telhas apoiadas sobre as ripas. A Figura 5 a) mostra as asnas de madeira de secção rolada e as tábuas que apoiam sobre estas, na Figura 5 b) pode-se denotar o pormenor construtivo das ripas apoiadas sobre as tábuas e as telhas cerâmicas sobre estas últimas.



Figura 5 - Estrutura da cobertura: a) asna; b) pormenor da cobertura pelo exterior – (NCREP, 2018)

Teve-se acesso ao levantamento estrutural da Capela Real, realizado pela NCREP, no decorrer deste mesmo estudo, o qual demonstrou o tipo de asna existente. Estas asna é, tal como muitas das asnas existentes em igrejas e monumentos em Portugal, constituída por linhas, pernas e pendurais. (Branco, Santos, & Cruz, 2008)

Como se pode observar na Figura 6, esta é constituída por duas linhas, uma inferior de maior comprimento, e a superior menor, duas pernas diagonais, com entrega na parede de alvenaria de pedra, e dois pendurais que ligam as pernas à linha superior e inferior. Quanto à espécie da madeira, devido à data da construção, esta pode ser de Pinho bravo, Castanho ou Eucalipto, (Lourenço & Branco, 2014) ou ainda Casquinha e Pitespaine (Dias, Cruz, Machado, Custódio, & Palma, 2009) pois seriam as espécies mais usadas nesta altura e para este tipo de elemento construtivo

Em termos de comportamento estrutural, as duas pernas que apoiam na parede de alvenaria funcionam à compressão, sendo que as paredes absorvem os esforços verticais das pernas e as duas linhas absorvem os esforços horizontais, funcionando à tração. Os pendurais, por seu turno, têm a função de ligação das pernas às linhas, contudo podem acabar por introduzir esforços de flexão e de corte a estas últimas. (Branco et al., 2008)

Quanto às ligações, nestas asnas, são sobretudo feitas por pregagens, inclusive a ligação do revestimento do teto de alforjes à estrutura. Também são realizadas por meio de samblagens ou entalhes. O contraventamento é assegurado pelas madres, localizadas ao nível das pernas das asnas.

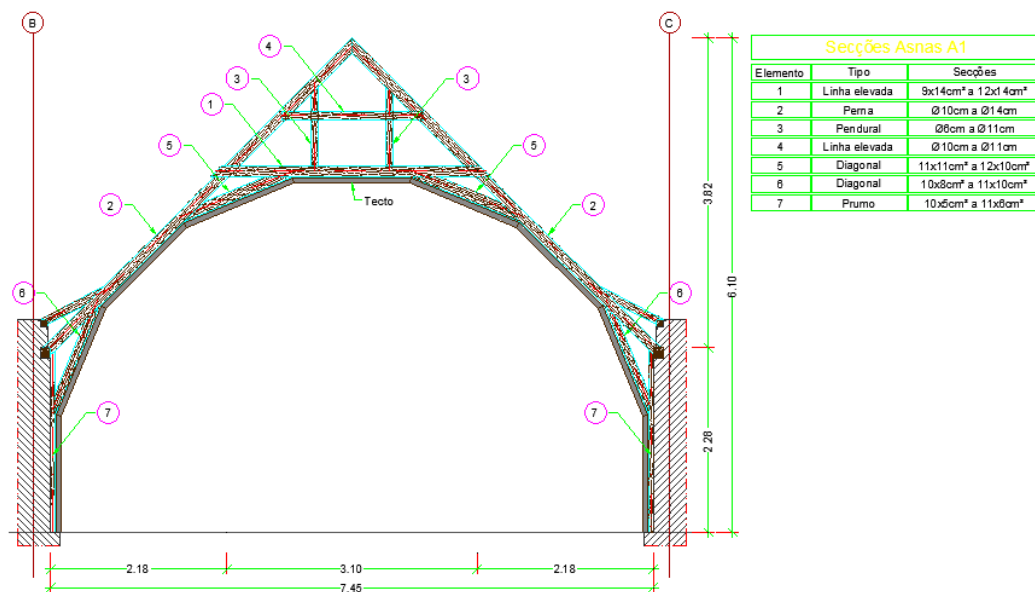


Figura 6 - Alçada da Asna existente na zona da tribuna – NCREP

O teto da Capela, de estilo mudéjar, ou também denominado de teto de alforjes, apresenta uma decoração de laços bastante elaborados, tal como mostra a Figura 7, aplicados nos painéis de madeira, que escondem o vigeamento da estrutura de suporte da cobertura e do próprio teto. Quanto à sua forma, armação a sete panos, é constituído por sete planos dispostos continuamente, formando uma falsa abóbada de berço. A estrutura de suporte da cobertura é composta por asnas, feitas com armações de *par y nudillo* mudéjares. (Martins, 2008)

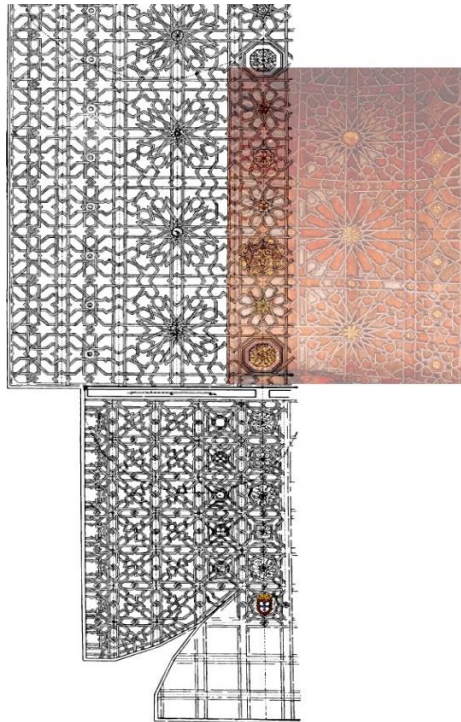


Figura 7 - Teto da Capela, representado n' 'O Paço de Cintra de 1903, sobreposto com a foto do local ("Resumo Introdução Histórica Capela Palatina," s.d.)

No interior, e na zona da tribuna existem três pisos: o piso térreo onde se desenvolve toda a capela e onde existe o tapete de mosaicos de origem árabe; o piso intermédio, por onde os turistas passam para contemplar a capela; e um segundo piso, ao qual o acesso é reservado. A estrutura destes pisos é toda em madeira, inclusive a parte frontal da tribuna. No caso dos pavimentos, o piso 1 e o piso térreo são cobertos por tijoleira cerâmica, e o piso 2 é coberto com tábuas de madeira. Entre o piso da capela e o primeiro piso da tribuna existe uma coluna a meio vão para suporte da respetiva tribuna, como se pode observar na Figura 8, resultado da inspeção da NCREP.

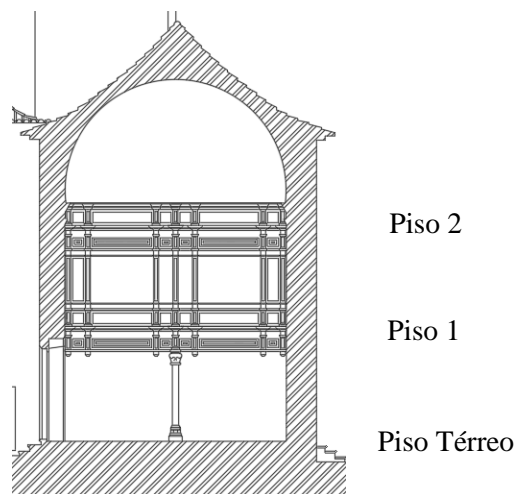


Figura 8 - Corte da Capela da zona em Estudo (NCREP, 2018)

Os pavimentos dos pisos da tribuna são constituídos por vigas de madeira. Conseguiu-se aceder às vigas de suporte do piso 1, que se supõe serem de casquinha, pelo seu aspeto e por ser, também, uma das espécies mais utilizadas em edifícios de maior importância e na época desta construção.

Estas apoiam na parede de alvenaria no lado nascente, e do lado poente apoiam numa viga metálica de perfil IPE200, ou semelhante, que apoia na coluna central, tal como mostra a Figura 9. Esta viga metálica surgiu muito após a construção original, tal como era executado em intervenções de reabilitação e melhoramento a partir do século XIX (Dias et al., 2009).



Figura 9 - Pormenor do apoio das vigas de madeira do piso 1 na viga metálica

Estas vigas estão afastadas umas das outras, cerca de 46 centímetros entre eixos. Por cima destas vigas apoiam duas camadas de tábuas de madeira, dispostas em direções ortogonais, e posteriormente estão assentes os mosaicos cerâmicos de revestimento. Entre as vigas existem outros elementos de madeira, denominados por tarugos, com secção de 8x15 cm, dispostos em linha, e espaçadas entre si cerca de 45 centímetros, tal como as vigas Figura 10,. Estes tarugos tinham como função impedir o bambeamento das vigas do pavimento, mobilizar a capacidade de distribuição das cargas e reduzir vibrações. Por norma o espaçamento entre tarugos que se executava na altura era entre 1,5 e 2,0 metros. No caso do pavimento em estudo estes estão espaçados de cerca de 45 centímetros, o que revela um maior cuidado na sua execução. Também o facto de estas estarem perfeitamente ajustadas, alinhadas entre si e pregadas às vigas aumenta a sua eficiência.



Figura 10 - Suporte do Pavimento do piso 1 da Tribuna

No anexo A do presente trabalho podem-se observar o levantamento geométrico elaborado da estrutura de suporte ao pavimento da tribuna, supondo que a distancia entre tarugos se mantém, mesmo na zona não acessível.

3. A MADEIRA COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

A madeira é um material de origem biológica, produzido pela árvore (Cruz, H.; Nunes, L., 2005). Pode-se afirmar que a madeira é o único material estrutural utilizado na construção que é renovável, se se assumir um compromisso de sustentabilidade. A parte que se utiliza para a construção da madeira vem do tronco e as suas propriedades físico-mecânicas variam com a espécie da árvore, com a idade da árvore aquando do corte e com as condições de crescimento.

As árvores podem diferenciar-se em dois grupos, as Resinosas e as Folhosas. As árvores Resinosas apresentam uma estrutura anatómica simples, tendo como principais elementos celulares os traqueídeos (fibras), que estão encarregues de suportar a árvore e pelo transporte de seiva bruta à copa, e as células de parênquima com a função principal de armazenamento de substâncias de reserva. Têm como características, folhas em agulha e crescimento rápido. Como exemplo de árvores Resinosas existem o pinheiro, o abeto e o cedro, em Portugal era geralmente utilizado em estruturas o Pinho bravo, a Casquinha e o Pitespaine. Já as árvores Folhosas são de folha caduca achatada e larga e têm arranjos anatómicos mais complexos, sendo as funções de suporte e de transporte asseguradas por diferentes tipos de células. São exemplos de árvores Folhosas o carvalho, o castanheiro, o eucalipto entre outras espécies tropicais utilizadas na construção (Henriques, 2011; Cruz, H.; Nunes, L., 2005; Dias, Cruz, Machado, Custódio, & Palma, 2009). Porém, uma identificação da espécie empregue num edifício antigo, ou mais recente, só é pode ser realizada após a análise em laboratório. Sem isso apenas se pode fazer suposições, de acordo com a cor, a forma dos seus veios e a época de construção.

Numa secção transversal de um tronco de madeira, pode-se identificar as várias camadas que constituem o lenho. O crescimento do tronco, em diâmetro, é devido à produção de novas células, lenho para o interior e casca e entrecasco para o exterior. O crescimento de lenho faz-se de uma forma muito lenta durante os meses de Outono e Inverno, sendo muitas vezes quase inexistente (o cambio vascular está inativo). Por outro lado, durante os meses de Primavera e Verão o crescimento de lenho acelera, reinicia-se a diferenciação celular, em resposta a estímulos hormonais nas extremidades do tronco e ramificações. O aumento da temperatura é um fator estimulante para o início da divisão celular. (Carvalho, 1996) Esta variação de ritmo de crescimento provoca alterações das propriedades do lenho, sendo o lenho de Outono mais escuro e mais denso que o lenho de Primavera. Assim é possível contabilizar os anos que uma árvore tem, contando o número de anéis de Outono existentes na secção.

É também possível identificar na estrutura do tronco, a medula, o cerne e o borne, como se observa na Figura 11. O cerne é a zona central começando-se a formar quando as células do borne morrem. Esta transformação dá-se, dependendo das árvores, entre os 5 e os 30 anos de vida da árvore. O borne é a zona mais externa do tronco, tem uma cor mais clara que o cerne e é responsável pela condução de água e seiva no interior da árvore (Henriques, 2011; Cruz, H.; Nunes, L., 2005).

Outra característica da madeira é a sua variabilidade. As suas propriedades variam bastante consoante a espécie de árvore, a sua origem geográfica, as condições climáticas, natureza do solo e disponibilidade de água. Deste modo pode-se definir a variabilidade da madeira segundo determinadas características. Aqui irá se explicar a anisotropia, o teor em água, a massa volúmica, a dureza e os defeitos das peças de madeira.



Figura 11 - Secção de um tronco de uma árvore resinosa

3.1 CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA

3.1.1 ANISOTROPIA

A madeira é um material anisotrópico, isto é, as suas propriedades físicas e mecânicas são diferentes consoante a direção do corte. Podem-se distinguir três direções diferentes numa peça de madeira, a direção longitudinal que é ao longo do fio, a direção radial que é a que atravessa o tronco, da medula ao exterior, e a direção tangencial, tangente aos anéis de crescimento (Cruz, H.; Nunes, 2005; Carvalho, 1996).

Como exemplo da diferença de comportamento da madeira refere-se a resistência mecânica da madeira que varia consoante a direção e o sentido de aplicação da força. A resistência a um esforço na direção longitudinal, paralela às fibras, é maior em tração do que em compressão pois, em tração as fibras unem-se, aumentando a sua resistência. Por outro lado, no que se refere a um esforço na direção perpendicular às fibras, a resistência é maior à compressão do que à tração.

Carvalho, 1996 apresenta o gráfico representado na Figura 12, que faz uma comparação da resistência do pinho bravo a solicitações mecânicas entre as direções axiais (paralelas às fibras) e transversais (perpendicular às fibras).

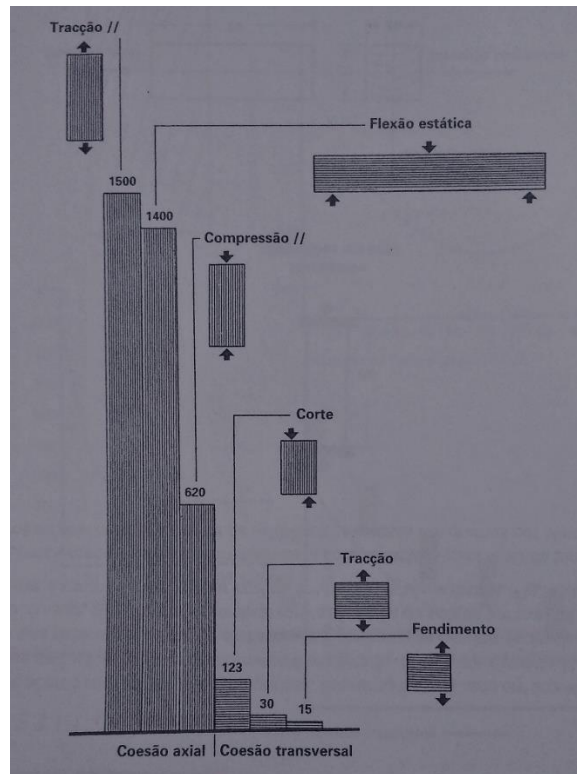


Figura 12 - Resistência do pinho bravo às principais solicitações mecânicas.

Valores característicos expressos em kg. cm^{-2} , exceto para o fendimento, em kg. cm^{-1} (Carvalho, 1996)

Pela observação da Figura 12, verifica-se que a madeira limpa de defeitos apresenta uma resistência elevada à flexão, compressão e tração paralela às fibras, mas apresenta uma resistência baixa ao corte, à compressão e à tração perpendicular às fibras.

3.1.2 TEOR EM ÁGUA

O teor em água é a massa de água existente num provete de madeira, relativamente ao seu peso seco. É definido em percentagem, pela expressão (1) (NP 614:1973):

$$H(\%) = \frac{\text{peso húmido} - \text{peso seco}}{\text{peso seco}} \cdot 100 \quad (1)$$

Pode-se determinar o teor em água em laboratório, com provetes que secam em estufa e usando a expressão supra assinalada. Porém, nas inspeções utilizam-se aparelhos apropriados para fazer uma leitura mais expedita, como os humidímetros de agulhas e de contacto.

A madeira é um material higroscópico, ou seja, o seu teor em água varia em função da temperatura e da humidade relativa do ar do local onde se encontra. Isto significa que a madeira está sempre a perder e a absorver água, o que pode provocar fendas e empenos. Em estruturas novas procura-se empregar a madeira com um teor de água próximo do equilíbrio com as condições de serviço, a fim de minimizar os defeitos da madeira (LNEC, 1997c).

A Figura 13 apresenta valores para o teor em água de equilíbrio da madeira de Pinho bravo em função da temperatura e da humidade relativa do ar. Esta figura está presente na ficha M9 do LNEC (1997).

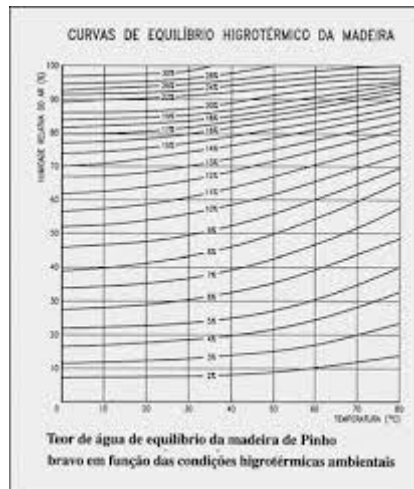


Figura 13 - Teor de água de equilíbrio da madeira de Pinho bravo em função das condições higrotérmicas ambientais (LNEC, 1997c)

A água é uma componente indissociável da madeira, e esta pode-se encontrar no lenho de três formas: - água de constituição, água de saturação e água livre. A água livre existe nos espaços celulares e intercelulares e cujas ligações com a substância lenhosa das paredes celulares são extremamente frágeis. Deste modo, após o abate de uma árvore esta começa rapidamente a perder água livre, secando sem uma variação de dimensão visível. A certo ponto a água de saturação (retida pelas membranas higroscópicas das células) começa também a evaporar, e é aqui que se inicia uma redução de volume das paredes celulares. Assim que toda a água livre sair chega-se ao ponto de saturação das fibras (PSF). Chegando a este estado, existem condições favoráveis à ocorrência de retração, e consequentemente, possíveis fendas e empenos nas peças da madeira. A madeira continua a secar até que se atinja uma humidade de equilíbrio, ou seja, até que se atinja um equilíbrio entre o teor de água da peça e as condições ambientais envolventes (Carvalho, 1996).

Esta variação de quantidade de água provoca na madeira perda de volume, conhecido como retratibilidade que varia com a direção das fibras (anisotropia), como se pode observar na Figura 14. Relativamente às variações geométricas, pode-se considerar uma retração tangencial cerca de duas vezes superior à radial e cerca de 20 vezes superior à longitudinal (Dias, Cruz, Machado, Custódio, & Palma, 2009)

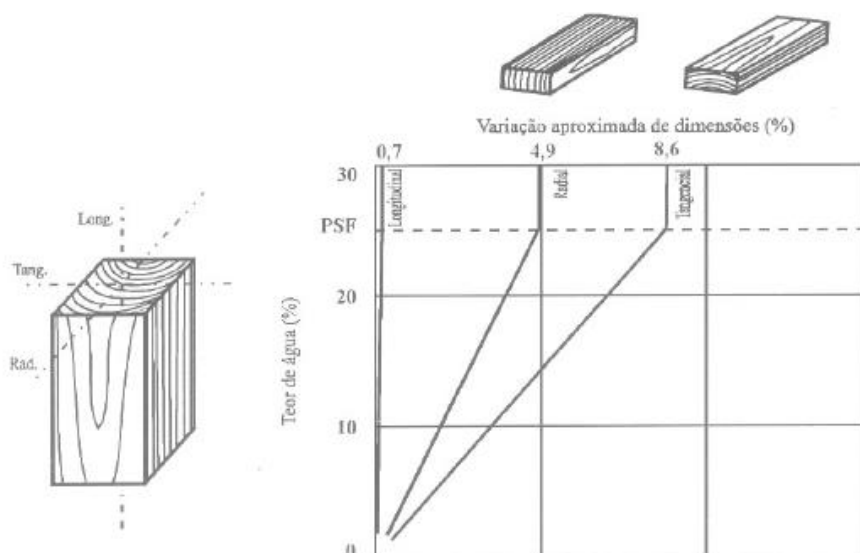


Figura 14 - Direções tangencial, radial e longitudinal e respectivos coeficientes de retração em termos relativos (valores médios para o Pinho Bravo) (LNEC, 1997c)

É importante referir que o teor em água afeta a resistência mecânica da madeira e é um dos principais fatores que condicionam a degradação por agentes biológicos, tais como térmitas subterrâneas e fungos de podridão, que necessitam de elevados teores de humidade para a degradação (superiores a 20%) (LNEC, 1997c). Por este motivo, este será um dos parâmetros a definir na inspeção da estrutura da Capela Real.

3.1.3 MASSA VOLÚMICA

A massa volúmica é um outro parâmetro de caracterização da madeira e é dado pela relação entre a massa do provete (M) e o seu volume (V), com o mesmo teor em água, de acordo com a expressão (2) (NP 616-1973):

$$\gamma(\text{kg}/\text{m}^3) = \frac{M}{V} \quad (2)$$

Este parâmetro varia muito de espécie para espécie, de árvore para árvore, dentro da mesma espécie e de zona para zona do lenho, mesmo dentro da mesma espécie. É indicador de qualidade, pois quanto maior a massa volúmica de uma peça de madeira, maior a resistência mecânica, a sua impermeabilidade, retractilidade e durabilidade natural (Henriques, 2011).

Também, a higroscopicidade da água afeta os valores de massa volúmica, uma comparação de valores só poderá ser feita para o mesmo estado higrométrico, ou teor de água. O mais usual é utilizar a massa volúmica a 12% de teor de água, considerado como referência, ou seja, medindo a massa com teor de água de 12% (M_{12}) e o volume nesse mesmo estado (V_{12}). É depois possível reverter valores medidos àquela humidade padrão através de expressões simples e comprovadas experimentalmente.

A massa volúmica é, portanto, uma das propriedades da madeira mais importantes de determinar, pois correlaciona-se com outras propriedades de resistência. (Carvalho, 1996).

3.1.4 DUREZA

A dureza pode-se definir como a resistência que o material opõe à penetração de um corpo estranho, quer seja um impacto gradual ou de choque. Laboratorialmente, pode-se determinar esta propriedade fazendo penetrar uma esfera de diâmetro adequado, no provete em ensaio, até ao seu equador e com determinada carga. A depressão que resulta dessa penetração é medida da dureza da madeira. Esta dureza depende da elasticidade da madeira, que é também uma propriedade da madeira, pois este é considerado como viscoelástico, que recupera a sua forma original após um impacto ou solicitações estranhas.

Esta propriedade é importante determinar para saber qual o melhor fim a dar à madeira numa construção, mas também para determinar o seu comportamento face à fixação de elementos metálicos, como pregos, parafusos ou placas dentadas. (Carvalho, 1996)

Em madeiras aplicadas na construção, esta dureza é determinada com um instrumento auxiliar de diagnóstico utilizando em inspeções, o Pylodin, o qual se apresenta no final do presente capítulo. A dureza será importante na determinação da massa volúmica, pois ambas estão correlacionadas.

3.1.5 DEFEITOS DA MADEIRA

Os defeitos da madeira são um outro fator muito importante para a avaliação da sua resistência mecânica. A madeira aplicada em estruturas, não se trata de madeira limpa, mas sim apresentando um conjunto de singularidades com reconhecido impacto nas suas propriedades mecânicas. (Dias, Cruz, Machado, Custódio, & Palma, 2009)

Em Portugal existe a norma NP 4305:1995 (Madeira serrada de pinho bravo para estruturas – Classificação Visual) que estabelece os parâmetros para classificação visual de uma madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas. Esta norma está definida para estruturas novas, porém podemos utilizá-la para classificar visualmente as estruturas em serviço, à falta de uma norma específica para tal. Esta classificação baseia-se na observação de nós, inclinação do fio, bolsas de resina, casca inclusa, o descaio e as suas alterações (empenos, fendas e degradação biológica). (LNEC, 1997a).

Tal como em Portugal, outros países têm normas para este tipo de classificação, como por exemplo, no Reino Unido existe a BS 4978:2007 (Visual strength grading of softwood – Specifications), também utilizada em madeira nova. Em Itália a UNI 11119:2004 (Beni culturali: Manufatti lignei – Strutture portanti degli edifici – Ispezione in situ per la diagnosi degli elementi in opera) é uma norma que estabelece também parâmetros para a classificação visual de peças de madeira, mas em serviço, ao contrário das normas anteriormente referidas.

Todas as normas referidas se baseiam na observação e medição dos defeitos. De seguida serão apresentados os defeitos a considerar e como estes são medidos.

a) Nós

Os nós da madeira são uma porção da base de um ramo inserida num tronco e, influenciam a resistência mecânica da peça de madeira porque são constituídos por fibras cuja orientação é perpendicular à direção do fio da peça. A ação redutora nas propriedades mecânicas assenta numa imposição de um desvio das fibras da madeira ao seu redor. Esta ação é maior quanto maior for o nó, a sua localização e o tipo de esforço a que a peça de madeira está sujeita (Dias, Cruz, Machado, Custódio, & Palma, 2009).

Os nós são avaliados pela razão entre a área da secção transversal que ocupam na secção e essa mesma secção, designada por KAR (Knot Area Ratio). A estimativa desta área é feita considerando que um nó tem a forma aproximada de um cone, com o seu vértice na medula (ver Figura 16 e Figura 16) (LNEC, 1997b).

O KAR total é uma relação da área dos nós existentes com a área da secção e o KAR marginal é essa mesma relação, mas calculada a $\frac{1}{4}$ da secção estudada (NP 4305: 1995). Num nó isolado, a avaliação faz-se pelo KAR total e pelo maior KAR marginal. Em nós agrupados, os KAR total e marginal são calculados para um conjunto de nós. Podem-se considerar nós agrupados quando, no espaço entre os nós, o fio não recupera a sua direcção normal. Estes parâmetros limitam a tolerância da existência dos nós para peças de madeira a aplicar em estruturas.

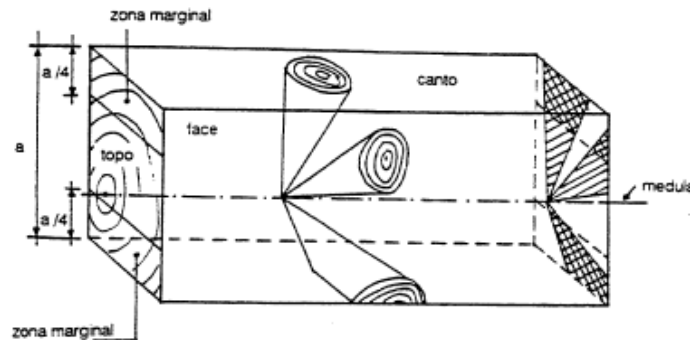


Figura 15 - Grupo de nós e projeção dos mesmos na secção (NP 4305: 1995)

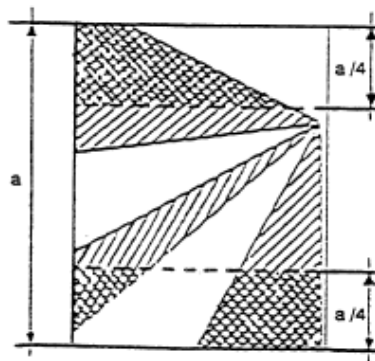


Figura 16 - Projeção dos nós na secção, mostrando a área total e a área marginal ($a/4$) (NP 4305: 1995)

Podem-se distinguir vários tipos de nós, os mais usuais, são os nós fixos e nós soltos. Existem também nós elípticos, resinosos, entre outros. Numa inspeção visual, deve-se localizar este defeito na peça, saber o tipo, a sua dimensão, e se estão agrupados (Carvalho, 1996).

b) Fio

A inclinação do fio é a orientação geral das fibras em relação ao eixo da peça. Uma inclinação muito acentuada provoca a diminuição das propriedades mecânicas da peça e outros defeitos devido às elevadas tensões internas provocadas pela variação do teor em água. Para além de modificar as características resistentes, influencia também o aparecimento de fendas e empenos. Perturba também o conceito de planos fundamentais, com expressão óbvia nas deformações decorrentes da retração que a secagem determina. (Carvalho, 1996) A inclinação do fio determina-se usando um riscador, uma peça composta por uma haste e, numa ponta uma agulha ou outro

objeto de ponta afiada, e na outra ponta um manipulô que roda em relação à haste. Este valor deve ser medido sobre um comprimento razoavelmente grande, para que se determine a inclinação geral (NP 4305: 1995). A norma italiana UNI 11035-3 – “Classificazione a vista dei legnami secondo la resistenza meccanica” refere um comprimento mínimo de um metro. A inclinação é dada pela relação entre a altura e o comprimento horizontal, expresso em fração (NP 4305:1995).

c) Taxa de Crescimento

A taxa de crescimento é a largura média dos anéis de crescimento, medida na direção radial que se possa observar num dos topos da peça. É calculada a partir da seguinte expressão (3):

$$TC = \frac{\text{Comprimento } R \text{ [mm]}}{n^{\circ} \text{ de aneis de crescimento anual na linha de comprimento } R} \quad (3)$$

Este parâmetro permite, de forma expedita, estimar a massa volúmica de uma peça de madeira, que por sua vez está diretamente relacionada com a rigidez, a resistência da mesma peça (Dias, Cruz, Machado, Custódio, & Palma, 2009).

d) Fendas

A madeira apresenta, muitas vezes, fendas que por si só não têm grande influência na sua resistência mecânica, mas que associadas a outros defeitos podem reduzir significativamente a resistência de uma peça de madeira. As fendas são descontinuidades no material, e quando esta ocorre em duas superfícies opostas diz-se uma fenda repassada (LNEC, 1997b). Como dito anteriormente, as fendas podem surgir devido ao processo inicial de secagem da madeira ou podem desenvolver-se ao longo do seu tempo de serviço (Dias, Cruz, Machado, Custódio, & Palma, 2009). A dimensão de uma fenda corresponde à distância entre as duas linhas que a delimitem, por norma, perpendicularmente à direção das fibras e paralela aos topos.

e) Descaio

Muitas vezes o toro cortado para uma estrutura não é um retângulo ou um quadrado perfeito por este ficar com parte da superfície externa do tronco e ficar uma dimensão em falta. Deste modo, o descaio traduz-se como um defeito de laboração resultando na diminuição de secção transversal, e na dificuldade de aplicação em obra (Dias, Cruz, Machado, Custódio, & Palma, 2009). A determinação deste defeito é expressa pelo quociente entre a projeção do descaio na face e a largura total dessa face, e a projeção no canto pela altura total da peça (ver Figura 17) (LNEC, 1997b).

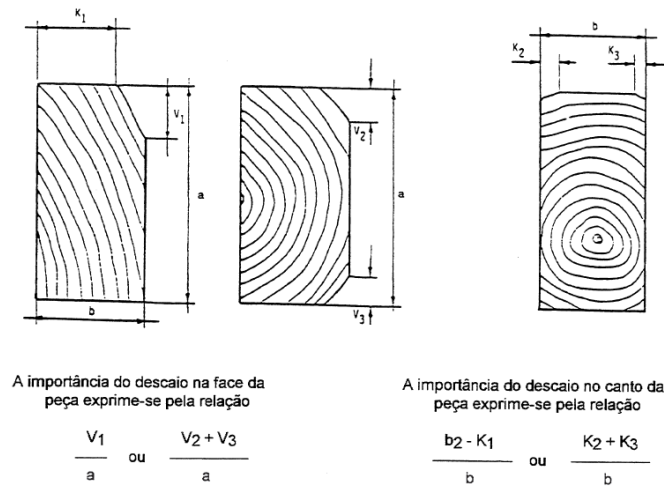


Figura 17 - Medição do descaio (NP 4305: 1995)

f) Empenos

Os empenos são deformações que ocorrem na madeira devidas à variação do seu teor em água, associado à anisotropia do material. Na Figura 18 pode-se observar os vários tipos de empeno e como medi-los.

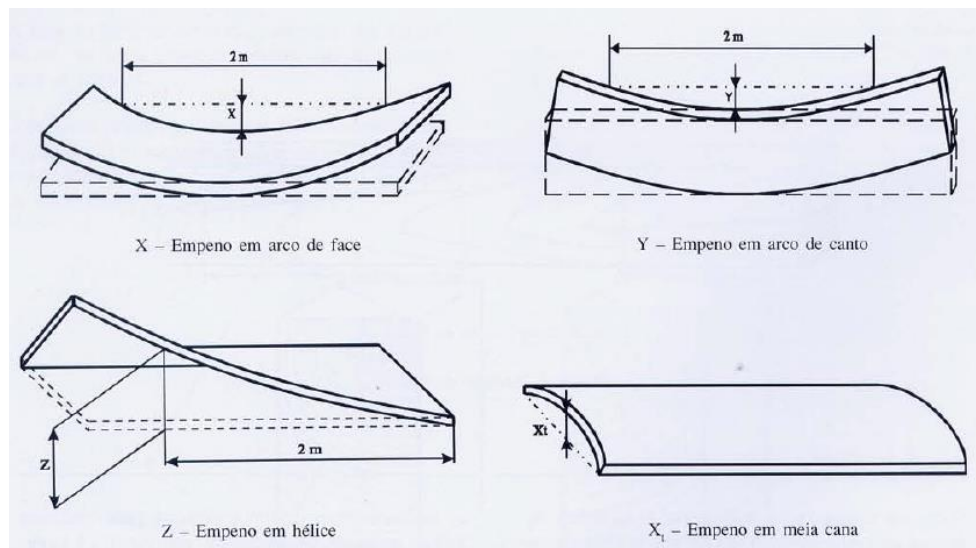


Figura 18 - Medição dos Empenos (LNEC, 1997b)

Os empenos em arco de face, de canto e em hélice são medidos num comprimento de dois metros, enquanto que o empeno em meia cana é medido sobre a largura da peça (LNEC, 1997b).

g) Bolsas de Resina e Casca Inclusa

Um outro defeito a observar é a existência de Bolsas de Resina ou Casca inclusa. As Bolsas de Resina são cavidades que contêm resina, no estado líquido ou sólido. Este defeito aparece nas árvores Resinosas e afetam as propriedades mecânicas e o aspeto da sua superfície. A Casca inclusa aparece devido a um crescimento irregular do fuste da árvore, exteriorizando-se numa parte de casca interposta no material do lenho. A medição destes defeitos deve obedecer aos limites impostos para as fendas. Quando ocorrem na proximidade de nós, as bolsas de resina e a casca inclusa devem igualmente ser contabilizadas no KAR.

3.2 DURABILIDADE

3.2.1 FATORES DE DEGRADAÇÃO DA MADEIRA

A madeira degrada-se de várias formas e ao longo do tempo, a madeira vai perdendo as suas propriedades de resistência devido a vários fatores. A humidade na madeira por si só não a degrada, porém, aumenta o risco dos agentes biológicos atacarem a madeira e potência inchamentos e retrações quando está em excesso ou em falta (Carvalho, 1996).

Podem-se dividir os fatores de degradação da madeira por fatores físicos, químicos e biológicos, tal como mostra a Figura 19.

Fatores de Degradação da Madeira		
Químicos	Físicos	Biológicos
	Fogo Retração Agentes Atmosféricos	Fungos (Cromogéneos e de Podridão) Insetos (Carunchos e Térmitas) Xilófagos Marinhos

Figura 19 - Fatores de Degradação da Madeira

3.2.1.1 Fatores Físicos

a) Fogo

A madeira é um material combustível, ou seja, alimenta a combustão. Porém, a madeira maciça arde lentamente. A Figura 20 mostra uma estrutura de madeira e de metal após um incêndio e pode-se observar que as peças metálicas perderam a sua resistência tendo as altas temperaturas feito com que estas se deformassem, enquanto que as peças de madeira mantêm a sua função, embora com secção reduzida.

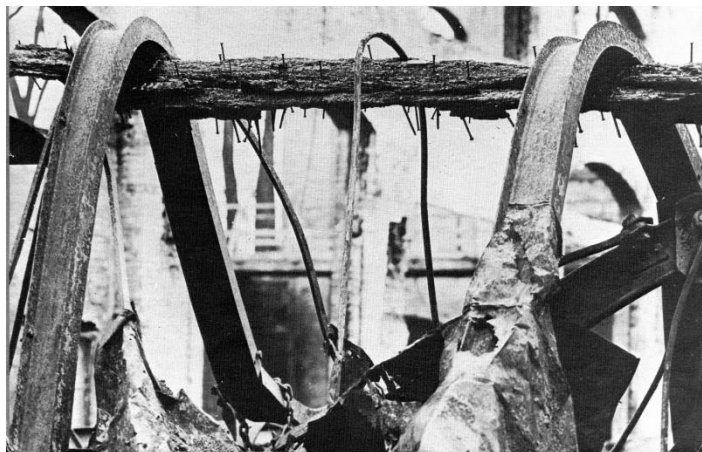


Figura 20 - Imagem de estrutura metálica e de madeira após incêndio (autor desconhecido)

No processo de queima de uma madeira, a sua carbonização inicia-se por volta de 280°C, o carvão que se forma em volta do elemento de madeira permanece aderente à restante madeira. Como o carvão é um ótimo isolante térmico (cerca de 3x mais isolante que a madeira) impede que a temperatura aumente no interior da secção. Assim a evolução da carbonização é retardada, e a parte não afetada pelo fogo mantém a sua resistência mecânica (Cruz, H.; Nunes, L; 2005).

b) Fendas e Empenos

Anteriormente tratado como um defeito visual da madeira, as fendas e empenos ocorrem devido a variações drásticas de teor em água e de temperatura ambiente. Estes provocam uma diminuição da resistência mecânica não desprezável ou afetar de forma significativa a capacidade resistente de ligações estruturais (Henriques, 2011; Dias, Cruz, Machado, Custódio, & Palma, 2009). Como se verá de seguida, os agentes atmosféricos são também causadores das fendas e empenos.

c) Agentes Atmosféricos

Os agentes atmosféricos afetam os elementos estruturais aplicados em ambiente interior e exterior. A luz solar, em conjunto com a chuva, contribuem para a degradação da madeira. A radiação ultravioleta provoca a decomposição química da lenhina. A madeira escurece e subsequentemente muda o seu tom para cinzento. Este processo acelera se se associar a incidência direta de chuva que remove o material deteriorado. A madeira fica com um aspeto cinzento e fibroso e a sua resistência mecânica quase não se altera. A aplicação de produtos de revestimento pode retardar este efeito de degradação (Cruz, H.; Nunes, L; 2005).

A degradação resultante pelos agentes atmosféricos, como a radiação ultravioleta, humidade relativa e temperatura do ar, precipitação e vento, não altera, significativamente, o desempenho da estrutura, mas pode propiciar condições para a ocorrência de outros tipos de degradação, nomeadamente biológica. O aumento da rugosidade da superfície da madeira facilita a deposição de poeiras e retenção de água, a fissuração facilita a difusão da água para o interior dos elementos podendo levar a condições propícias ao desenvolvimento de podridão ou em certas circunstâncias, levar à corrosão dos ligadores (Dias, Cruz, Machado, Custódio, & Palma, 2009).

A deterioração devida a agentes atmosféricos pode ser minimizada pela aplicação de produtos preservadores, como tintas, vernizes ou velaturas capazes de refletir ou absorver a radiação ultravioleta, além de terem uma ação hidrófuga.

3.2.1.2 Fatores Químicos

A madeira é um material bastante resistente a ambientes químicos, deste modo é sempre considerada para estruturas de piscinas, onde existe o cloro, e a situações ou ambientes mais agressivos (D. Henriques, 2011).

A ação de produtos químicos sobre a madeira é, de um modo geral, evidenciada como uma alteração na cor desta. Embora seja resistente a agentes químicos, sofre alguma alteração pela ação de ácidos fortes e lixívia alcalinas, inclusive os detergentes. A cal apagada em estado fresco, pode exercer uma ação corrosiva se estiver muito tempo em contacto com a madeira.

A madeira, em especial as folhosas, podem sofrer alguns danos de origem química, tanto em ambiente ácido ou básico. Num ambiente mais ácido as cadeias de carbono podem romper-se, deixando a madeira com um aspeto fibroso, já num ambiente mais alcalino os danos são mais graves pois degrada-se a lenhina e as hemiceluloses fazendo com que a madeira perca resistência e consistência (Arriaga, et al.; 2002).

3.2.1.3 Fatores Biológicos

A degradação biológica é a causa mais frequente de degradação da madeira. Os fungos, insetos e xilófagos marinhos atacam a madeira e os seus derivados de várias formas, como se apresenta de seguida.

a) Fungos

Os fungos mais frequentes em madeiramentos de edifícios são os fungos de podridão, os fungos cromogéneos e os bolores. Os fungos são organismos de organização celular muito primitiva e que se alimentam de elementos mortos para sobreviver, ou como parasitas. (Arriaga, et al.; 2002) Necessitam de um teor de água superior a 20% em massa para o seu desenvolvimento (NP EN 335-1:2011).

O ciclo de vida dos fungos no interior da madeira inicia-se com a instalação de esporos nas superfícies lenhosas. Estes esporos, sob teores de água adequados, germinam e dão início ao processo de degradação. As enzimas dos fungos decompõem a madeira, e esta é utilizada como alimento do fungo, dá-se a colonização. Os bolores e fungos cromogéneos, apesar de não afetarem a estrutura, são prejudiciais para a saúde humana. Quando a madeira é colonizada por fungos de podridão, estes degradam a parede celular, consumindo a lenhina e/ou a celulose, abrindo cavidades no seu interior e tornando o lenho mais macio (Nunes, L. 2013). Na fase adulta, fazem sair para o exterior do lenho um corpo frutífero (cogumelo), que é o responsável pela produção de mais esporos.

O aparecimento de fungos num edifício é mais recorrente nos pisos térreos, em aros e guarnições de portas e/ou janelas em contacto com paredes húmidas ou em madeiramento em contacto com o solo. Também é comum o aparecimento de fungos em zonas húmidas e sem grande ventilação, como nas coberturas, ou junto das canalizações de águas e esgotos (Henriques, 2011).

A NP EN 335-1 distingue os fungos destruidores da madeira (fungos de podridão), e os fungos cromogéneos da madeira. Dentro do grupo dos fungos destruidores da madeira podemos identificar os de podridão castanha e podridão branca, provocados pelos basidiomicetes, e os fungos da podridão mole.

Na Figura 21 pode-se identificar uma madeira afetada com podridão castanha, se esta apresentar fraturas de uma forma cúbica e em que esta escurece também. Já a madeira com por podridão branca caracteriza-se por um aspeto “fibroso” e com tendência para uma cor mais clara (Coleman, 2003).



Figura 21 - Ataque de podridão castanha e podridão branca (Coleman, 2003)

A podridão mole é caracterizada por um amolecimento da superfície da madeira, embora a madeira possa estar também afetada em profundidade. Os fungos que originam este tipo de podridão necessitam de teores de água mais elevados do que os basidiomicetes, e por norma são mais frequentes em madeira em contato permanente com o solo ou com água (NP EN 335-1:2011).

Os fungos de podridão ou fungos destruidores da madeira são os que produzem danos mais graves, pois alimentam-se de componentes da parede celular, resultando na perda de densidade e resistência da madeira. Para além disso, a existência destes fungos favorece o posterior surgimento de insetos xilófagos, sendo mais frequente nas madeiras folhosas (Arriaga, et al.; 2002).

Os fungos cromogéneos são os responsáveis pelo azulamento e o aparecimento de bolores. Os fungos de azulamento alteram a cor da madeira, principalmente no borne, Não têm influência na sua resistência mecânica, mas fazem perder o seu valor comercial. Os bolores aparecem quando o teor em água é superior a 20% e surgem na superfície da madeira. Também os bolores não alteram a resistência mecânica da madeira.

De modo geral, pode-se identificar a existência de podridão na madeira, pelos seguintes sintomas:

- Perda de resistência, amolecimento ou desintegração;
- Produção de som oco aquando do embate de uma masseta, por exemplo;
- Descoloração;
- Presença de micélio, hifas ou frutificações fúngicas;
- Odor a cogumelo;

Apenas após a identificação do tipo de podridão ou fungo presente, se pode determinar qual o melhor método de controlo a aplicar. (Nunes, L., Valente, A. 2007)

b) Insetos

Dos insetos que degradam a madeira podem-se realçar os Carunchos e as térmitas. Os carunchos são insetos voadores que colocam os seus ovos nos poros ou fendas da madeira, e cujas larvas atacam a madeira. Entre os carunchos, da ordem *Coleoptera*, existe o caruncho grande

(*Hylotrupes bajulus*) que geralmente só ataca o borne de resinosas e aparece até uma altitude de cerca de 2000 m, e o caruncho pequeno (*Anobium punctatum*) que ataca o borne de diversas espécies folhosas e resinosas e em algumas ataca até o cerne (NP EN 335-1:2011).

Por norma, o caruncho pequeno ataca as carpintarias limpas e secas, e pode-se deteta-lo visualmente pela existência de um grande número de orifícios circulares, pela presença de serrim solto de cor clara junto ao orifício. O caruncho grande tem maior expressão nos elementos estruturais das coberturas e pavimentos. Visualmente, é mais difícil de identificar do que o caruncho pequeno, pois os seus orifícios são ranhuras oblíquas, normalmente preenchidas pelo serrim que acaba por permanecer compactado no interior da madeira. A madeira parece íntegra no exterior, estando o seu interior totalmente degradado (Henriques, 2011). O ciclo de vida destes insetos inicia-se quando as fêmeas depositam os ovos nas fendas ou ranhuras da madeira, destes ovos nascem larvas pequenas que se alimentam da mesma, formando galerias no seu interior e que faz com que diminuam a capacidade resistente da peça. Esta larva permanece dentro da madeira por um longo período que pode variar, consoante a espécie, entre meses até dez anos, altura em que forma um casulo e se transforma em insecto voador, saindo depois da peça de madeira, e difundindo a infestação (Arriaga, et al.; 2002).

As térmitas são insetos que vivem numa sociedade organizada num sistema de castas (colónia), podendo-se distinguir morfológicamente, e consoante a sua função, as reprodutoras, responsáveis pela reprodução da colónia, os soldados que garantem a defesa da colónia e as trabalhadoras, que vão em busca de alimento e reparam o ninho (NCREP, 2013). As térmitas que apresentam maior perigo para as estruturas são as térmitas subterrâneas. Pode-se identificar a presença de térmitas subterrâneas pela observação de madeira atacada, de galerias terrosas sobre a madeira ou alvenaria, de asas ou mesmo de reprodutores em dispersão. A madeira atacada apresenta um aspeto laminado e podem também aparecer galerias e espaços abertos, sem serrim, mas com concreções terrosas. A sua identificação também é difícil numa fase inicial, pois deixam a parte exterior intacta, e escavam galerias pelo interior da peça. Para além disso as térmitas subterrâneas têm o seu ninho no exterior, servindo-se da madeira apenas como alimento (Henriques, 2011; Nunes, 2013).

c) Xilófagos Marinhos

Os xilófagos marinhos, são insetos invertebrados que necessitam de uma certa salinidade da água, e desenvolvem-se na madeira através de galerias e cavidades que vão escavando. Destes pode-se destacar a *Limnoria*, da família dos crustáceos, que destrói a superfície da madeira, e o *Teredo*, um molusco que penetra na madeira, destruindo o seu interior.

Estes atacam a madeira de resinosas e folhosas de madeira em contacto direto com a água, como, embarcações, portos e docas, não sendo relevante para o estudo em causa (Arriaga, et al.; 2002).

3.2.2 DURABILIDADE NATURAL

A durabilidade natural de uma madeira é a capacidade de esta resistir ao ataque de xilófagos sem qualquer tratamento preservador. Uma árvore, logo após o seu abate, corre o risco de ser atacada por fungos. Esta resistência intrínseca aos ataques destes organismos varia bastante de espécie para espécie e é sempre mais elevada no cerne do que no borne. Neste sentido é necessário proceder a uma secagem e/ou recorrer a produtos preservadores. A escolha destes produtos depende da impregnabilidade da madeira. A classe de durabilidade de uma espécie deve ser sempre acompanhada com a sua classe de impregnabilidade. A impregnabilidade de uma madeira

é a maior ou menor facilidade de impregnação por produtos líquidos preservadores. A NP EN 350 apresenta as características de durabilidade natural e de impregnabilidade da madeira de Pinho Bravo na Tabela 1 (LNEC, 1997a; LNEC, 1997b; Nunes, L.; Valente, A. 2007).

Tabela 1 - Características de durabilidade natural e de impregnabilidade da madeira de Pinheiro Bravo (LNEC, 1997b)

	Durabilidade Natural				Impregnabilidade
	Fungos	Térmitas	Carunchos		
			Pequenos	Grandes	
			<i>Anobium</i>	<i>Hylotrupes</i>	
Borne	Pouco Durável	Suscetível	Suscetível	Suscetível	Facilmente Impregnável
Cerne	Pouco a medianamente durável	Medianamente Durável	Durável	Durável	Difícilmente ou não Impregnável

3.2.3 CLASSES DE RISCO

A classe de risco de degradação biológica de uma peça de madeira refere-se ao ambiente à qual esta fica exposta. Estas classes definem o grau de exposição a agentes de degradação consoante a localização de um elemento de madeira na estrutura. Assim, a NP EN 335-1-2:2006 atribui cinco classes de risco que englobam as diferentes situações de serviço (LNEC, 1997a), esta tabela cruza as condições em que se encontra a madeira em serviço, com o teor em água provável e os agentes biológicos mais prováveis de atacar a madeira nessas condições. A Tabela 2 faz um resumo do risco de ataque por agentes xilófagos consoante a classe de risco.

Tabela 2 - Situações gerais de serviço e classes de risco (LNEC, 1997a)

Classes de Risco	Teor de água na madeira (%)	Situações gerais de serviço	Risco de ataque por agentes xilófagos			
			Fungos	Carunchos	Térmitas	Xilófagos marinhos
1	≤ 20	No interior, protegido Ex.: Divisórias, lambris, pavimentos	---	++	+	---
2	Ocasionalmente > 20	No interior, protegido Ex.: Estrutura de cobertura	++	++	+	---
3	Frequentemente > 20	No exterior, acima do solo, protegido (tectos) ou desprotegido (caixilharia)	+++	+	++	---
4	Permanentemente > 20	No exterior, em contacto com o solo e/ou água doce	+++	+	+++	---
5	Permanentemente > 20	Na água salgada	++	+	+	+++

3.2.4 TÉCNICAS DE REABILITAÇÃO

Nos últimos anos, tem-se vindo a assistir em Portugal, a um crescimento no investimento na reabilitação de edifícios, e este facto, tem refletido também a importância que a madeira teve na construção, sendo dos principais elementos estruturais antes do surgimento do betão armado como material de construção.

Porém, nas intervenções que se têm feito, muitas vezes se toma a opção de substituir todas, ou parte das peças de madeira existentes, sem existir antes um estudo sobre a viabilidade de manter o material original, ignorando os princípios listados pelo International Wood Comitee do ICOMOS. Este comité refere que todas as intervenções devem ser realizadas em função das condições e necessidades do presente, mas respeitando os valores estéticos e históricos do edifício, bem como a integridade física do elemento. Um dos princípios básicos de uma intervenção numa estrutura de madeira é a de manter, tanto quanto possível, os elementos originais. Ao tomar a decisão de substituir perder-se-á o valor histórico, a integridade e a qualidade original dos materiais do edifício intervencionado. (Henriques, M. D.; 2018)

Quando se pretende intervir num edifício antigo, e após um estudo detalhado sobre o seu estado de conservação, pode-se decidir entre, conservar, reforçar ou substituir. Antes de detalhar alguns exemplos destes três tipos de técnicas de reabilitação, deve-se esclarecer alguns conceitos ligados a eles.

Conservação é o conjunto de ações destinada a prolongar o tempo de vida de um elemento de forma a que se mantenha, no futuro, no melhor estado de integridade e autenticidade. Por reparação entende-se a correção das anomalias existentes, repondo, ou eventualmente melhorando, a sua função estrutural, já o conceito de restauro, ligado ao anterior, é o restabelecimento da conceção e legibilidade original dos materiais, forma e aparência de um objeto, elemento ou edifício. Já com o reforço pretende-se melhorar as condições de utilização de um elemento ou conjunto de elementos, satisfazendo condições de segurança global da estrutura. Este melhoramento pode ser pelo aumento da capacidade de carga, quer à limitação das deformações do elemento estrutural, ou ainda o melhoramento global de desempenho. (Henriques, 2018)

De seguida serão apresentados alguns exemplos de conservação e reforço de estruturas de madeira.

Conservar

Pode-se conservar um elemento, ou conjunto de elementos, aplicando tratamentos preservadores, destinados a impedir o desenvolvimento de agentes biológicos. A aplicação de produtos biocidas *in situ* pode ter carácter curativo ou preventivo. Aplica-se um tratamento curativo quando o agente destruidor se encontra instalado ou houve degradação no passado e é necessário tratar a parte remanescente a fim de impedir o surgimento dos agentes. Um tratamento preventivo é aplicado quando o estado de madeira é bom, mas há risco de instalação de agentes biológicos.

Outras técnicas utilizadas como tratamento preventivo indireto, são a introdução de produtos químicos diretamente no solo, muros, ou paredes de alvenaria de forma a repelir as térmitas. O uso deste tipo de produtos tem o aspeto nefasto de agredir o ambiente, poluindo solos e o ambiente em volta, por isso estão a ser desenvolvidos produtos biocidas não químicos que protejam o ambiente. Também existe a prática da colocação de iscos contaminados que atraem as térmitas que se alimentam destes iscos e acabam por morrer ou transporta-los para a colónia. (Arriaga, et al.; 2002)

Também nos últimos 50 anos tem-se vindo a desenvolver técnicas de consolidação com produtos poliméricos, nomeadamente a impregnação. A consolidação por impregnação de produtos poliméricos consiste na injeção do produto no interior da peça de madeira degradada, que uma vez endurecida, lhe restitui integridade e o aumento de características físicas e mecânicas (Henriques, 2018).

Reforçar

Em muitas intervenções de reabilitação é usual o reforço de estruturas, envolvendo substituições parciais dos elementos estruturais e até mesmo a reorganização e/ou alteração do sistema estrutural. A opção de reforço é feita, muitas vezes, pela alteração de uso dos edifícios, o que leva a verificações estruturais de cálculo atuais e por isso mais exigentes. Também é habitual proceder-se ao reforço para conferir à estrutura conforto, diminuindo vibrações ou deformações de pavimentos. (Henriques, 2018) Entre várias técnicas de reforço podem-se destacar:

- Empalmes: junção de novos elementos laterais ou da face inferior e podem ser de madeira, metálicos, ou com contraplacados, sendo feita a ligação por parafusos, pregos ou cavilhas, podendo se recorrer à cintagem metálica ou à utilização de fibras sintéticas coladas, como está representado na Figura 22;
- Interposição de vigas adicionais: a introdução de vigas novas entre as existentes aumenta claramente a resistência mecânica e contribui para a diminuição da deformação do pavimento;
- Colocação de viga transversal ao pavimento: permite diminuir o vão original, e consequentemente, diminuir o momento máximo positivo, criando momentos negativos. A escolha desta intervenção deve ter em atenção que o pé direito diminui e as paredes de apoio das novas vigas devem ter capacidade de as suportar.;
- Colocação de tarugos: a colocação de tarugos é uma medida com efeitos benéficos para a estrutura e pouco intrusiva. Reduz a encurvadura lateral da viga, mobiliza todo o momento de inércia e distribui forças de cargas concentradas sobre uma viga isolada, evitando assim a ocorrência de frequências excessivamente baixas;
- Remoção de troço degradado e consequente substituição: esta substituição deve ser feita por uma prótese de madeira sã da mesma espécie ou superior, desde que apresente uma rigidez compatível com o elemento principal (Henriques, 2018).

São já muitos os estudos elaborados em busca de soluções de reforço de estruturas de madeira *in situ*. Feio, Artur O.; Machado, José S.; Cunha, (2011) apresentam as várias utilidades do betão armado e peças metálicas no reforço de estruturas de madeira. Schober et al., (2015) elaboraram um completo estudo sobre o reforço de estruturas de madeira com FRP (fibre reinforced plastics) mostrando que é uma solução com muito bons resultados, melhorando a resistência a tensões perpendiculares ao fio, e ao corte, sendo também uma alternativa económica. Estudaram também o reforço das vigas nos apoios, comparativamente a empalmes de madeira, o aumento de performance é de 140%. Com o uso de FRP a deformação por fluência a longo prazo é muito reduzida. Alertam, no entanto, para as condições de aplicação das fibras, deve haver uma limpeza cuidada na superfície, o acondicionamento do material deve ser protegido e deve ser aplicado por um profissional experiente. Já estudos acerca da utilização de resinas epóxi (Bertolini et al., 2014) revelam que estas conferem uma boa rigidez à flexão ao elemento, uma boa compatibilidade entre a resina e o material. Referem, contudo, que estudos elaborados anteriormente, revelaram que a utilização de resinas epóxi reduziram o módulo de elasticidade longitudinal em flexão, em 65%.

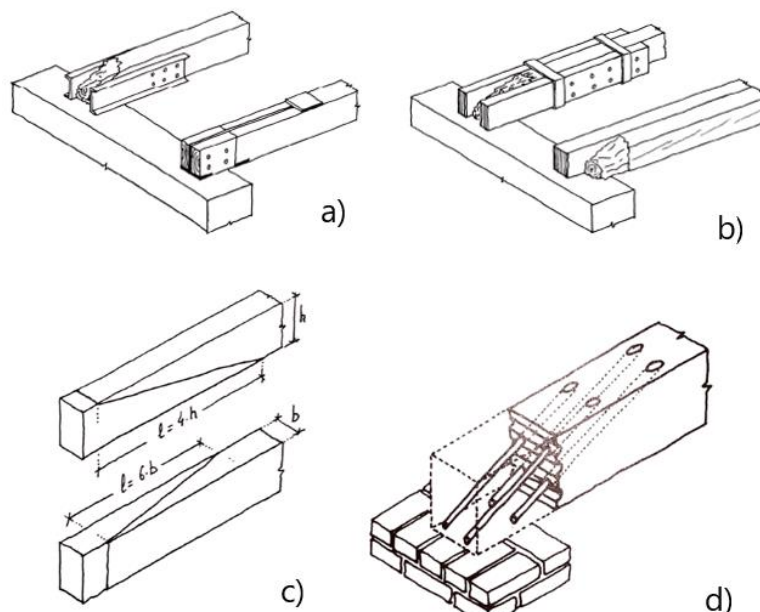


Figura 22 - Tipos de empalme em zonas de apoio com: a) chapas metálicas; b) madeira; c) substituição parcial por madeira sã; d) epoxi e barras de reforço (Arriaga; et al, 2002)

Substituir

A substituição integral de um elemento deve ser considerada como uma ação de última instância. Deve-se recorrer à substituição apenas quando os elementos se encontram muito degradados, se houver uma alteração ao uso e haja um aumento significativo de carga que seja incompatível com a capacidade das vigas existentes, ou se essa utilização preveja a existência de água em permanência.

3.3 VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA

A verificação estrutural dos elementos em estudo é feita após classificação dos mesmos. Atualmente esta verificação faz-se seguindo o Eurocódigo 5 (EN 1995:2004): Design of timber structures, que, embora esteja direcionado para o cálculo de estruturas de madeira de construção nova, pode-se utilizar para verificações de segurança de estruturas em serviço.

Depois de se proceder à classificação visual de acordo com a NP 4305:1995 e se obter a classe de qualidade, faz-se a correspondência com as classes de resistência, segundo as normas NP EN 1912:2013 (Madeira para estruturas – Classe de resistência: Atribuição de classes de qualidade e espécies) e a BS EN 338:2003 (Structural timber – Strength classes).

Para o correto dimensionamento não se recorre apenas ao Eurocódigo 5, auxiliamo-nos também pelo Eurocódigo 0 (NP EN 1990:2009): Bases para o projeto de estruturas, e o Eurocódigo 1 (NP EN 1991:2009): Ações em estruturas.

O Eurocódigo 0 aconselha a verificação da segurança segundo os Estados Limites Últimos e de Utilização. Como Estados Limites de Utilização, compreende-se deformações, vibrações e danos que limitam a normal utilização e funcionamento da estrutura, afetando o seu aspeto e o conforto do utilizador. Já os Estados Limites Últimos, comprometem a segurança estrutural e do seu utilizador, estando associados a estados de desequilíbrio estrutural e até ao colapso. Nas estruturas

de madeira, os modelos de dimensionamento devem considerar o efeito dos diferentes aspetos que afetam o seu comportamento mecânico, tais como:

- Propriedades dos materiais no curto e longo prazo;
- Condições ambientais do local em que o material é aplicado;
- Condições e duração dos carregamentos (Dias, Cruz, Machado, Custódio, & Palma, 2009).

Para este estudo, por simplificação e por serem os mais condicionantes, ir-se-á fazer a verificação à deformação por fluência (Estado Limite de Utilização), e a verificação à flexão simples e ao corte (Estados Limites Últimos).

Deve-se ter em conta também a duração das ações, e o EC5 define classes de duração das ações e dá alguns exemplos, como se pode ver na Tabela 3:

Tabela 3 - Classes de duração das ações (EN 1995:2004) adaptado

Classe de duração das ações	Duração	Exemplos
Permanente	>10 anos	Peso próprio
Longa duração	6 meses a 10 anos	Produtos armazenados
Média Duração	1 semana a 6 meses	Sobrecargas em pavimentos, neve
Curta duração	<1 semana	Neve, vento
Instantânea		Vento, ação de acidente

São também definidas pelo EC5, classes de serviço, que se destinam a refletir a influência das condições ambientais sobre o elemento de madeira. As classes de serviço permitem definir os fatores de modificação de propriedades mecânicas dos materiais (k_{mod}) e (k_{def}) em condições ambientais determinadas e são divididas em três:

- Classe de serviço 1 – caracterizada por um teor em água dos materiais correspondente a uma temperatura de 20 °C e uma humidade relativa do ar ambiente superior a 65% apenas durante algumas semanas por ano. Para as Resinosas o valor médio do teor em água na classe de serviço 1 não é superior a 12% (EN 1995:2004). Neste caso trata-se de materiais sem contacto com o solo que estejam em local coberto e seco, como por exemplo, pavimentos interiores, tetos, lambris, escadas interiores, portas ou ombreiras;
- Classe de serviço 2 – caracterizada por um teor em água dos materiais correspondente a uma temperatura de 20 °C e uma humidade relativa do ar ambiente superior a 85% apenas durante algumas semanas por ano (EN 1995:2004). Trata-se de estruturas sem contacto com o solo, em espaço coberto, mas com risco de humidificação, tais como, estruturas de cobertura não impermeabilizadas, elementos sob telheiros, ou caixilhos de fachadas protegidas;
- Classe de serviço 3 – caracterizada por condições climáticas que conduzem a valores de teor em água dos materiais superiores aos da classe 2 (EN 1995:2004). Neste caso pode-se falar de estruturas exteriores, como varandas ou pérgulas, pontes, passadiços ou cais de embarque.

Para o cálculo da verificação de segurança, deve-se adotar um modelo simplificado de cálculo, com o tipo de apoio da estrutura - simplesmente apoiada, apoio duplo ou encastramento - e as cargas atuantes, as permanentes e variáveis.

Trabalho Final de Mestrado

Mestrado em Engenharia Civil – Perfil Edificações

As cargas permanentes a considerar são o peso próprio e os revestimentos. O peso próprio será determinado a partir da massa volúmica dos elementos obtidos de forma experimental com os ensaios elaborados, e segundo a classe de resistência obtida. Quanto aos revestimentos, os valores a adotar são os definidos pelo Eurocódigo 1.

Outro parâmetro importante a definir é a sobrecarga a considerar. Para tal, o Eurocódigo 1 fornece uma tabela que define a sobrecarga em função da utilização do local. O local a considerar pode-se definir de acordo com a Tabela 4 que define a categoria de utilização e a Tabela 5 define a sobrecarga correspondente a cada categoria.

Tabela 4 - Categorias de Utilização (NP EN 1991:2009)

Categoria	Utilização específica	Exemplos
A	Actividades domésticas e residenciais	Salas em edifícios de habitação; quartos e enfermarias de hospitais; quartos de hotéis, cozinhas e lavabos.
B	Escritórios	
C	Locais de reunião (com excepção das utilizações correspondentes às categorias A, B e D) ¹⁾	<p>C1: Zonas com mesas, etc.; por exemplo, em escolas, cafés, restaurantes, salões de jantar, salas de leitura, recepções.</p> <p>C2: Zonas com assentos fixos; por exemplo, em igrejas, teatros ou cinemas, salas de conferências, salas de aulas, salas de reunião, salas de espera.</p> <p>C3: Zonas sem obstáculos para a movimentação de pessoas; por exemplo, em museus, salas de exposição, etc. e em acessos de edifícios públicos e administrativos, hotéis, hospitais, e em átrios de entrada de estações de comboio.</p> <p>C4: Zonas em que são possíveis actividades físicas; por exemplo, salões de dança, ginásios, palcos.</p> <p>C5: Zonas de possível acolhimento de multidões; por exemplo, edifícios para eventos públicos, tais como salas de concertos, salas para actividades desportivas incluindo bancadas, terraços e zonas de acesso; plataformas ferroviárias.</p>
D	Actividades comerciais	<p>D1: Zonas de lojas em geral.</p> <p>D2: Zonas de grandes armazéns.</p>

1) Chama-se a atenção para 6.3.1.1(2), em particular para C4 e C5. Ver a EN 1990 quando for necessário considerar efeitos dinâmicos. Para a Categoria E, ver o Quadro 6.3.

NOTA 1: Dependendo das utilizações previstas, as zonas que seriam normalmente classificadas como C2, C3 e C4 poderão ser classificadas como C5 por decisão do dono de obra e/ou do Anexo Nacional.

NOTA 2: O Anexo Nacional poderá estabelecer subcategorias para A, B, C1 a C5, D1 e D2.

NOTA 3: Ver 6.3.2 para zonas de armazenamento ou de actividades industriais.

Tabela 5 - Sobrecargas em pavimentos, varandas e escadas de edifícios (NP EN 1991:2009)

Categorias de zonas carregadas	q_k [kN/m ²]	Q_k [kN]
Categoria A		
- Pavimentos	1,5 a 2,0	2,0 a 3,0
- Escadas	2,0 a 4,0	2,0 a 4,0
- Varandas	2,5 a 4,0	2,0 a 3,0
Categoria B	2,0 a 3,0	1,5 a 4,5
Categoria C		
- C1	2,0 a 3,0	3,0 a 4,0
- C2	3,0 a 4,0	2,5 a 7,0 (4,0)
- C3	3,0 a 5,0	4,0 a 7,0
- C4	4,5 a 5,0	3,5 a 7,0
- C5	5,0 a 7,5	3,5 a 4,5
Categoria D		
- D1	4,0 a 5,0	3,5 a 7,0 (4,0)
- D2	4,0 a 5,0	3,5 a 7,0

3.3.1 ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS

A verificação de segurança em relação aos Estados Limites Últimos exige que as tensões atuantes sejam inferiores às tensões resistentes dos materiais. Os valores característicos das propriedades resistentes podem ser obtidos através da classe resistente a que pertence o material, indicados na EN 338:2003.

No presente trabalho para os ELU, as verificações a fazer serão a resistência à flexão simples e ao corte, embora o Eurocódigo 5, no capítulo 6, também preveja verificações de resistência à tração e compressão, tanto paralela como perpendicular ao fio da madeira, à torção e a esforços combinados.

Começando por quantificar os efeitos da flexão numa estrutura, o Eurocódigo 0 apresenta para a combinação fundamental de ações, as equações (4) e (5):

$$E_d = E\{\gamma_{G,j}G_{k,j}; \gamma_P P; \gamma_{Q,1}Q_{k,1}; \gamma_{Q,i}\psi_{0,i}Q_{k,i}\} \quad j \geq 1; i \geq 1 \quad (4)$$

Que pode ser expressa da seguinte forma:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (5)$$

Em que

$\gamma_{G,j}$ – Coeficiente parcial relativo à ação permanente j

$G_{k,j}$ – Valor característico da ação permanente j

γ_P – Coeficiente parcial relativo a ações de pré-esforço

P - Valor representativo de uma ação de pré-esforço

$\gamma_{Q,1}$ – Coeficiente parcial relativo à ação variável base da combinação 1

$Q_{k,1}$ – Valor característico da ação variável base da combinação 1

$\gamma_{Q,i}$ – Coeficiente parcial relativo à ação variável i

$\psi_{0,i}$ – Coeficiente para a determinação do valor de combinação de uma ação variável

$Q_{k,i}$ – Valor característico da ação variável acompanhante i

3.3.1.1 Flexão Simples

A verificação da resistência dos elementos sujeitos à atuação de flexão simples exige a verificação das tensões normais atuantes nas zonas de momentos máximos. Para a verificação da resistência de uma estrutura de madeira à flexão simples, o Eurocódigo 5 apresenta a inequação (6):

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} \quad (6)$$

Em que:

$$f_{m,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} \quad (7)$$

Então, simplificando as expressões anteriores, pode-se obter a inequação (8):

$$\frac{\sigma_{m,d}}{k_{mod}} \leq \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} \quad (8)$$

Na qual se pode substituir os valores das equações (9), (10) e (11), considerando a estrutura de secção retangular, simplesmente apoiada e com carga uniformemente distribuída:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{sd}}{w} \quad (9)$$

$$M_{sd} = \frac{E_d \cdot L^2}{8} \quad (10)$$

$$w = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (11)$$

Obtendo-se, então a expressão de verificação à flexão simples (12):

$$\frac{6 \cdot E_d \cdot L^2}{8 \cdot b \cdot h^2} \leq k_{mod} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} \quad (12)$$

Em que:

$\sigma_{m,d}$ – Valor de cálculo da tensão de flexão;

$f_{m,d}$ – Valor de cálculo da resistência à flexão;

k_{mod} – Fator de modificação da resistência em função da duração da carga e da classe de serviço;

$f_{m,k}$ – Valor característico da resistência à flexão;

γ_M – Coeficiente parcial para as propriedades dos materiais, que também cobre incertezas de modelação das variações de dimensões;

M_{sd} – Valor de cálculo do momento;

w – Módulo de flexão;

E_d – Carregamento das vigas;

L – Comprimento das vigas;

b – Dimensão da base das vigas;

h - Dimensão da altura das vigas;

O fator de modificação da resistência (k_{mod}) depende, então das classes de serviço do local em análise, da duração das cargas e do tipo de material. A Tabela 6 apresenta os valores recomendados a serem utilizados como fator de modificação.

Tabela 6 - Valores de k_{mod} (EN 1995:2004)

Material	Norma	Classe de serviço	Classe de duração das acções					
			Acção permanente	Acção de longa duração	Acção de média duração	Acção de curta duração	Acção instantânea	
Madeira maciça	EN 14081-1	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10	
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10	
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90	
Madeira lamelada colada	EN 14080	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10	
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10	
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90	
LVL	EN 14374, EN 14279	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10	
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10	
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90	
Contraplacado	EN 636							
	Parte 1, Parte 2, Parte 3	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10	
	Parte 2, Parte 3	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10	
OSB	EN 300	OSB/2	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
		OSB/3, OSB/4	1	0,40	0,50	0,70	0,90	1,10
		OSB/3, OSB/4	2	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90
Aglomerado de partículas de madeira	EN 312							
	Parte 4, Parte 5	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10	
	Parte 5	2	0,20	0,30	0,45	0,60	0,80	
	Parte 6, Parte 7	1	0,40	0,50	0,70	0,90	1,10	
Aglomerado de fibras de madeira duro	EN 622-2	HB.LA, HB.HLA 1 ou 2	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
		HB.HLA1 ou 2	2	0,20	0,30	0,45	0,60	0,80
Aglomerado de fibras de madeira semi-duro	EN 622-3	MBH.LA 1 ou 2	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,10
		MBH.HLS 1 ou 2	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,10
		MBH.HLS 1 ou 2	2	-	-	-	0,45	0,80
Aglomerado de fibras de madeira de média densidade (MDF)	EN 622-5	MDF.LA, MDF.HLS	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,10
		MDF.HLS	2	-	-	-	0,45	0,80

Para a determinação do coeficiente parcial γ_M deve-se consultar a Tabela 7 onde estão contemplados os coeficientes em função do material para combinações fundamentais, e para combinações de acidente. Já o valor característico na resistência à flexão depende da classe de resistência atribuída aos elementos de madeira, após a classificação visual e pode ser consultado na EN 338:2003.

Tabela 7 - Coeficientes parciais γ_M recomendados para as propriedades dos materiais (EN 1995:2004).

<i>Combinações fundamentais:</i>	
<i>Madeira maciça</i>	1,3
<i>Madeira lamelada colada</i>	1,25
<i>LVL*, contraplacado, OSB*</i>	1,2
<i>Aglomerado de partículas de madeira</i>	1,3
<i>Aglomerado de fibras de madeira duro</i>	1,3
<i>Aglomerado de fibras de madeira semi-duro</i>	1,3
<i>Aglomerado de fibras de madeira de média densidade (MDF)</i>	1,3
<i>Aglomerado de fibras de madeira brando</i>	1,3
<i>Ligações</i>	1,3
<i>Ligadores em placas metálicas perfuradas</i>	1,25
<i>Combinações de acidente</i>	1,0

3.3.1.2 Corte

Para efetuar um estudo de resistência ao corte, deve-se analisar as zonas onde o esforço transversal é maior. A verificação da segurança ao corte segue a inequação (13), retirada do Eurocódigo 5:

$$\tau_d \leq f_{v,d} \quad (13)$$

Em que o valor de cálculo de resistência ao corte é dado pela equação (14):

$$f_{v,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} \quad (14)$$

E o valor de cálculo da tensão ao corte dado pela equação (15):

$$\tau_d = \frac{V_{sd}}{A_v} \quad (15)$$

Para as condições enunciadas antes da Equação (9), sabe-se que:

$$V_{sd} = \frac{E_d \cdot L}{2} \quad (16)$$

E que:

$$A_v = \frac{2bh}{3} \quad (17)$$

Em que, as incógnitas são:

τ_d – Valor de cálculo da tensão de corte;

$f_{v,d}$ – Valor de cálculo da resistência ao corte;

$f_{v,k}$ – Valor característico da resistência ao corte;

V_{sd} – Valor de cálculo do esforço transversal;

A_v – Área sujeita a tensão transversal;

E_d , L , b e h são os mesmos valores explicados anteriormente.

Deste modo pode-se obter a expressão (18), substituindo as equações (16) e (17) nas (14) e (15):

$$\frac{4 \cdot b \cdot h}{3 \cdot E_d \cdot L} \leq k_{mod} \cdot \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} \quad (18)$$

O valor k_{mod} e γ_M determinam-se como explicado anteriormente, recorrendo às tabelas, e o valor característico da resistência ao corte $f_{v,k}$ encontra-se definido também nas tabelas das classes de resistência.

3.3.2 ESTADOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO

Nos Estados Limites de Utilização, o Eurocódigo 5 prevê verificações para a resistência ao deslizamento das uniões, à deformação por fluência e às vibrações. No presente trabalho ir-se-á apenas apresentar o cálculo para a verificação à deformação por fluência. Esta compreende o controlo das deformações de curto prazo (instantâneas) e longo prazo (finais) (Dias et al., 2009).

As equações (19) e (20) representam a combinação característica definida pelo Eurocódigo 0 e a respetiva simplificação:

$$E_d = E \{ G_{k,j}; P; Q_{k,1}; \psi_{0,i} Q_{k,i} \} j \geq 1; i \geq 1 \quad (19)$$

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + "P" + "Q_{k,1}" + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (20)$$

As incógnitas aqui apresentadas, estão definidas no subcapítulo anterior.

3.3.2.1 Deformação por Fluência

É comum, em estruturas de pavimento, existir deformação por fluência. Este fenómeno é devido à conjugação do peso próprio da viga com as cargas atuantes, que ao longo do tempo levam à deformação da própria viga.

As deformações de longo prazo podem ser obtidas a partir das deformações de curto prazo, através da equação (21) para ações permanentes.

$$w_{fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q} \quad (21)$$

Esta equação pode ser dividida nas suas duas componentes de deformação final devido às cargas permanentes ($w_{fin,G}$) e deformação final devido às cargas variáveis ($w_{fin,Q}$). Estes valores podem ser calculados de acordo com as equações (26) e (23) abaixo indicadas.

$$w_{fin,G} = w_{inst,G} \times (1 + k_{def}) \quad (22)$$

$$w_{fin,Q} = w_{inst,Q} \times (1 + \psi \cdot k_{def}) \quad (23)$$

O coeficiente (ψ) é o definido no Anexo A do Eurocódigo 0. A deformação instantânea é calculada pela equação (24) utilizando como carregamento das vigas (P_x) a combinação para as cargas permanentes e variáveis em separado.

$$w_{inst,x} = \frac{5}{384} \cdot \frac{P_x \cdot L^4}{EI} \quad (24)$$

Em que E é o módulo de elasticidade do material, dado na tabela da EN 338:2003 e que depende da classe de resistência do material. I é o momento de inércia obtido pela equação (25):

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (25)$$

Por outro lado k_{def} é o coeficiente de fluência, que depende da classe de serviço e do tipo de material empregue. Pode-se encontrar este valor numa tabela do Eurocódigo 5, aqui apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores de k_{def} (EN 1995:2004)

Material	Norma	Classe de serviço		
		1	2	3
Madeira maciça	EN 14081-1	0,60	0,80	2,00
Madeira lamelada colada	EN 14080	0,60	0,80	2,00
LVL	EN 14374, EN 14279	0,60	0,80	2,00
Contraplacado	EN 636			
	Parte 1	0,80	–	–
	Parte 2	0,80	1,00	–
OSB	EN 300			
	OSB/2	2,25	–	–
	OSB/3, OSB/4	1,50	2,25	–
Aglomerado de partículas de madeira	EN 312			
	Parte 4	2,25	–	–
	Parte 5	2,25	3,00	–
	Parte 6	1,50	–	–
Aglomerado de fibras de madeira duro	EN 622-2			
	HB.LA	2,25	–	–
	HB.HLA1, HB.HLA2	2,25	3,00	–
Aglomerado de fibras de madeira semi-duro	EN 622-3			
	MBH.LA1, MBH.LA2	3,00	–	–
	MBH.HLS1, MBH.HLS2	3,00	4,00	–
Aglomerado de fibras de madeira de média densidade (MDF)	EN 622-5			
	MDF.LA	2,25	–	–
	MDF.HLS	2,25	3,00	–

A limitação da flecha final ou deformação final (w_{fin}) é um aspeto relevante na avaliação de uma estrutura que trabalha à flexão. A Tabela 9 recomenda valores limites para as flechas com um vão de comprimento L, em função do tipo de apoio das vigas.

Tabela 9 - Exemplos de valores limites para as flechas de vigas (EN 1995:2004)

	w_{inst}	$w_{net,fin}$	w_{fin}
Vigas sobre dois apoios	L/300 a L/500	L/250 a L/350	L/150 a L/300
Vigas em consola	L/150 a L/250	L/125 a L/175	L/75 a L/150

Por simplificação, a deformação final é limitada pela expressão (26):

$$w_{fin} \leq \frac{L}{250} \quad (26)$$

3.3.3 VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA AO FOGO

Estando Portugal a atravessar uma fase em que se dá bastante relevo à ação do fogo em estruturas, depois dos últimos acontecimentos devastadores para a região centro, e a tragédia que se sucedeu no Museu Nacional do Rio de Janeiro, pensou-se ser fundamental fazer uma verificação da estrutura ao fogo. O Eurocódigo 5 reserva uma parte para esta verificação, a parte 1-2 “General Rules – Structural Fire design” que ainda não existe em português e trata-se de uma norma europeia, a EN 1995-1-2:2004.

Esta parte do Eurocódigo 5, apresenta então, dois métodos para o dimensionamento ao fogo. O método simplificado que é o que iremos usar e o mais correntemente utilizado, e o método avançado que recorre a modelos de cálculo mais complexos e usualmente utilizados em situações excecionais.

Assim, o método simplificado faz a verificação da resistência ao fogo através da redução da secção da madeira resultante de um eventual incêndio e compara a capacidade resistente desta secção reduzida com as secções de cálculo para a situação de incêndio.

Para a verificação da resistência mecânica dos materiais, os valores cálculo da resistência ao fogo devem ser determinados pela equação (27):

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \cdot \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (27)$$

Em que:

$f_{d,fi}$ – valor de cálculo da resistência ao fogo;

$k_{mod,fi}$ – factor de modificação considerando os efeitos do ambiente na resistência e rigidez, recomendando-se, para o método simplificado, igual a 1,0;

$\gamma_{M,fi}$ – factor parcial de segurança da madeira sob fogo e que se recomenda ser igual a 1,0 para o método simplificado.

f_{20} – quantilho inferior de 20% de uma propriedade de resistência a temperaturas normais, dado pela equação (28):

$$f_{20} = k_{fi} \cdot f_k \quad (28)$$

Os valores do fator k_{fi} são dados pela Tabela 10:

Tabela 10 - Valores de k_{fi}

	k_{fi}
Madeira maciça	1,25
Madeira lamelada colada	1,15
Contraplacados de madeira	1,15
LVL	1,1
Conexões com fixadores em corte com membros laterais de madeira ou à base de madeira	1,05
Conexões com fixadores em corte com membros laterais em aço	1,05
Conexões com fixadores carregados axialmente	1,05

E f_k é o valor característico da propriedade, que depende da classe de resistência das peças de madeira em estudo.

A verificação ao fogo é feita da mesma forma que outras verificações, os esforços atuantes têm de ser menores ou iguais aos esforços resistentes, tal como apresentado nas inequações (29) e (30):

$$\sigma_{m,d,fi} \leq f_{m,d,fi} \quad (29)$$

Ou seja:

$$\sigma_{m,d,fi} \leq k_{mod,fi} \cdot \frac{f_{m,k,fi}}{\gamma_{M,fi}} \quad (30)$$

Os esforços atuantes em situação de incêndio $\sigma_{m,d,fi}$ são calculadas pela afetação das cargas a temperatura normal, para a combinação fundamental de ações, por um fator de redução, η_{fi} , como se pode observar na equação (31).

$$\sigma_{m,d,fi} = \eta_{fi} \cdot \sigma_{m,d} \quad (31)$$

Recomenda-se:

- para situações normais - $\eta_{fi} = 0,60$
- para zonas de acumulação de cargas - $\eta_{fi} = 0,70$

Para o cálculo da secção remanescente não consumida pelo incêndio, retira-se à secção transversal a profundidade de madeira carbonizada.

A redução de secção é baseada no conceito de taxa de carbonização, que permite determinar a profundidade de madeira consumida pelo fogo.

O EC5 define duas profundidades de carbonização: unidimensional ($d_{char,0}$) e nominal ($d_{char,n}$).

A profundidade de carbonização nominal ($d_{char,n}$) considera que a secção se mantém com forma igual à inicial utilizando-se uma profundidade de carbonização nominal, que considera o efeito do arredondamento dos cantos, e é dado pela expressão (32):

$$d_{char,n} = \beta_n \cdot t \quad (32)$$

Em que:

β_n – taxa de carbonização nominal;

t – tempo.

A taxa de carbonização nominal depende do tipo de madeira a e contabiliza o efeito do arredondamento dos cantos e das fissuras e é dada na **Error! Reference source not found.**:

Tabela 11 - Taxa de carbonização da madeira

	β_0 mm/min	β_n mm/min
a) Madeiras resinosas e faia		
Madeira lamelada colada com características de densidade $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
Madeira maciça com características de densidade $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,8
b) Madeiras folhosas		
Madeira maciça ou lamelada colada com características de densidade de 290 kg/m^3	0,65	0,7
Madeira maciça ou lamelada colada com características de densidade de $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,55
c) LVL		
Com características de densidade $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
d) Painéis		
Painéis de madeira	0,9 ^a	-
Contraplacados	1,0 ^a	-
Outos painéis de madeira sem ser contraplacado	0,9 ^a	-
(a) Os valores aplicam-se a características de densidade de 450 kg/m^3 e uma espessura do painel de 20mm.		

Este método de cálculo pressupõe que a secção transversal efetiva tem propriedades de resistência constantes e iguais às da madeira à temperatura ambiente.

A secção transversal efetiva é obtida através da redução da secção inicial, de uma profundidade de carbonização efetiva, d_{ef} , que corresponde à soma da zona carbonizada com a zona aquecida e é dada pela expressão (33):

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \cdot d_0 \quad (33)$$

A profundidade de carbonização efetiva é calculada como mostrado anteriormente, o fator k_0 é igual a $t/20$ se o tempo de exposição a um incendio for menor que 20 minutos, e igual a 1,0 se este tempo for maior ou igual a 20 minutos. A profundidade de carbonização para resistência zero (d_0) é igual a 7mm.

Por fim faz-se a verificação de da secção residual, ou seja, retirando o valor de profundidade de carbonização residual das faces expostas ao fogo à secção real do elemento em estudo.

3.4 TÉCNICAS E METODOLOGIAS DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO

Os monumentos históricos, como é o Palácio Nacional de Sintra, são objeto de manutenção e conservação contínua. A aplicação de técnicas de inspeção e diagnóstico deve obedecer às linhas orientativas que são descritas, por exemplo, na Carta de Veneza de 1964, ou pela ICOMOS – International Council On Monuments and Sites. Deve-se ter em conta a responsabilidade inerente a este tipo de intervenção em edifícios e monumentos antigos, sendo dever de todos protegê-los e conservá-los o melhor possível. Assim, as intervenções a fazer devem ter como princípio

fundamental, minimizar a degradação dos materiais, mantendo ou repondo o seu nível de desempenho, procurando meios de diagnóstico que causem o menor dano possível.

Para um adequado diagnóstico do estado de uma estrutura de madeira, é necessário um conhecimento completo e detalhado dos elementos que a constituem, começando pela estrutura de suporte, passando para o forro de madeira, e terminando no seu revestimento decorativo. Numa inspeção adequada, fiável e objetiva, deve-se descrever corretamente os fatores seguintes:

- qualidade da madeira (espécie florestal, tipologia e extensão dos defeitos);
- localização da degradação, a sua gravidade e extensão e a possibilidade de evolução;
- secção resistente residual dos elementos singulares (Mannucci, 2001).

A descrição adequada destes fatores permite concluir sobre o estado de conservação da estrutura e que opções tomar sobre o seu tratamento.

Deste modo, os principais objetivos de uma inspeção, são:

- identificar anomalias e procurar a origem das mesmas, entendendo quais as condições que levaram ao seu surgimento;
- quantificar, ou tentar estimar, a resistência e rigidez dos elementos de madeira;
- detetar pontos da estrutura que necessitam de reforço ou substituição;
- recomendar medidas que impeçam o surgimento dos mesmos ou outros problemas. (Cruz; et.al., 2000)

3.4.1 FASES DA INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO

A metodologia de inspeção e diagnóstico deve ser feita em cada elemento estrutural e é dividida em três fases (Mannucci, 2001):

- **Fase 1: Inspeção Visual** – descrição de cada elemento da estrutura, identificação da espécie florestal, mapeamento e avaliação dos defeitos e anomalias presentes, localização e quantificação de alterações sofridas ao longo do tempo, avaliação do estado das ligações.
- **Fase 2: Meios Auxiliares de Diagnóstico** – sob técnicas de diagnóstico não destrutivas aplicadas “in situ” (Higrómetros de superfície ou de contacto, *Resistograph*®, *Pylodin*® ou métodos de transmissão de ondas sonora e/ou ultra-sónicas) como complemento da informação recolhida na fase 1.
- **Fase 3: Tratamento dos Resultados** – Classificação do elemento segundo a qualidade de resistência e estimativa da secção resistente, identificação e localização da secção de mínima resistência, estimativa do estado de eficiência das ligações e visualização gráfica dos resultados (Mannucci, 2001; Henriques, 2011).

3.4.1.1 Inspeção Visual

A inspeção visual é o primeiro passo para o diagnóstico. Baseia-se na caracterização dos elementos da estrutura, conforme descrito no capítulo 3, observando os defeitos da madeira (nós, fissuras, inclinação do fio). A análise da madeira pode ser feita de forma direta, observando-a com o auxílio de um simples objeto cortante e/ou um martelo. Nesta fase deve-se procurar

possíveis causas de danos (entradas de água, sobrecarregamentos, remates ineficazes, crescimento de vegetação, aberturas de ventilação obstruídas, etc (Henriques, 2011; Mannucci, 2001).

Numa estrutura de madeira, deve-se ter atenção a certos aspetos críticos. Assim que se chega ao local, o cheiro a “mofo” pode ser indicador de alguma patologia de origem biológica, tal como a existência de serrim ou de canais de terra. Os pontos de maior risco, e aos quais se deve ter maior atenção numa inspeção visual são, no interior, os encontros da estrutura da cobertura com as fachadas, zonas de remates e zonas pouco ventiladas onde podem ocorrer condensações. No exterior é importante identificar deformações na cobertura, indicadores de problemas estruturais, a deterioração de beirados e algerozes, ou até a sua inexistência, levam-nos a concluir que a entrada de água está facilitada e que os encontros da estrutura com a fachada podem estar já degradados. Ter também em atenção a manchas de humidade nas alvenarias (Arriaga, et. al.; 2002).

3.4.1.2 Meios Auxiliares de Diagnóstico

Depois da primeira fase de inspeção visual, identificando a espécie da madeira, a sua geometria e identificar alguns pontos críticos, deve-se fazer uma planificação da inspeção propriamente dita, recorrendo a técnicas de diagnóstico.

Nesta fase é importante garantir, antes de iniciar a inspeção, a existência de luz, natural ou artificial, o acesso à estrutura e respetiva limpeza para melhor visualização dos danos. É também essencial conseguir plantas do espaço para assinalar as zonas críticas.

Os meios auxiliares de diagnóstico podem englobar técnicas não destrutivas (TND), técnicas semi-destrutivas (TSD) ou técnicas destrutivas (TD). As técnicas não destrutivas podem dividir-se por métodos de análise global e métodos de análise local. No primeiro grupo enquadram-se os aparelhos de aplicação de vibrações e de ultrassons, são técnicas de difícil aplicação “in situ” mas permitem avaliar a peça no seu todo. No segundo grupo estão o *Resistograph*® ou o *Pyloclin*® que dão um apoio importante na continuidade da inspeção visual (Henriques, 2011).

Numa inspeção pode-se ainda utilizar objetos mais tradicionais para o diagnóstico. Um caderno e lápis é essencial para anotações de valores registados e fitas métricas para um bom levantamento da estrutura. Uma camera fotográfica para registar tudo o que se observa e auxiliar no posterior tratamento de resultados. Uma lupa pode ser usada para conseguir tirar dúvidas de uma primeira análise, espelhos para conseguir reflectir zonas de mais difícil visualização. Também é muito usado em inspeções um martelo de borracha para identificar zonas ocas, consoante o som de pancadas secas na estrutura ou no revestimento da madeira, conseguimos identificar um som mais oco que é indicação de existência de vazios. Objetos cortantes ou um formão permitem identificar degradação superficial e conhecer a profundidade da degradação, podendo também extrair amostras da madeira danificada para identificação do agente xilófago em laboratório. É relevante referir que numa inspeção deve-se usar roupa e calçado adequado, bem como algum equipamento de proteção individual como luvas e em alguns casos máscara e óculos de proteção (Arriaga, et. al.; 2002).

No presente trabalho iremos utilizar como meio auxiliar de diagnóstico, o humidímetro, o *Resistograph*®, e o *Pyloclin*®, este último apenas na estrutura de suporte ao pavimento da tribuna. De seguida iremos apresentar cada um destes aparelhos descrevendo como utilizar e quais os resultados que obtemos de cada um.

Humidímetro ou Higrómetro: Serve para medir o teor em água da peça de madeira baseando-se na variação da resistência elétrica entre as duas agulhas (Raposo et al., 2017). Existem os higrómetros de contacto em que apenas é necessário encostar as duas agulhas à madeira e medem o teor em água da superfície. Para chegar a um valor deve-se efetuar, na mesma zona, doze leituras e excluir a mais alta e a mais baixa, depois faz-se a média com as restantes dez medições. Já nos higrómetros de agulhas, estas são maiores e penetram na madeira para obter leituras no interior da peça de madeira. Estes últimos são mais rigorosos, mas de uso mais difícil já que se tem de fazer penetrar as agulhas na madeira (Henriques, 2011).

Resistograph®: Permite detetar zonas degradadas por fungos ou insetos xilófagos que são difíceis de encontrar apenas com a inspeção visual. (Raposo et al., 2017) Este aparelho tem uma agulha de 1 a 1,5 mm de diâmetro que penetra na madeira a uma velocidade constante de 8,000 rpm, e uma broca na ponta com um diâmetro de cerca do dobro da agulha para que a leitura da resistência não seja alterada pelo atrito lateral (D. Henriques, 2011). O *Resistograph®* permite medir a resistência que a madeira opõe à penetração da agulha que avança na madeira. Este instrumento dá-nos um perfil, em cujo eixo das ordenadas é indicada a resistência da madeira à perfuração e no eixo das abcissas a profundidade de penetração. Os furos deixados na madeira são muito pequenos comparados com o tamanho do elemento em estudo e por isso os danos causados por este teste podem ser desprezados. Os resultados obtidos com este aparelho podem também fornecer informação para a estimação da massa volúmica da madeira, o teor de água, a resistência à compressão e a velocidade de ultrassons, se tiverem sido realizados estudos de correlação de dados, específicos para a espécie em estudo (Henriques, 2011; Calderoni, De Matteis, Giubileo, & Mazzolani, 2010).

Pyloclin®: este aparelho mede a resistência da madeira mediante um impacto de um pino metálico com energia conhecida. A profundidade de penetração na madeira é inversamente proporcional à sua dureza na secção transversal. (Henriques, 2015). Este equipamento é composto por uma cápsula e um pino (ou ponteira) com 2,5mm de diâmetro que está ligado a uma mola no interior da cápsula. Mediante o impacto esta mola liberta-se e permite que a energia potencial elástica (5 Joules) se transforme em energia de impacto e facilite a penetração na madeira. Esta penetração está correlacionada com a massa volúmica da peça, tal como mostra um estudo de Henriques (2011). Como limitações, o *Pyloclin®* mede apenas superficialmente, não detetando os defeitos senão aqueles que intersecta. (D. Henriques, Nunes, Machado, & Brito, 2011)

3.4.1.3 Tratamento dos Resultados

Após todos os testes efetuados procede-se ao tratamento de todos os dados obtidos, correlacionando-os.

É nesta fase que se faz uma avaliação dos problemas, com a finalidade de estimar a resistência dos elementos estruturais afetados e estabelecer as medidas corretivas adequadas. Esta avaliação, inclui:

- Identificar os fatores de degradação, pois os tratamentos preservadores dependem do agente em causa, a possibilidade de progressão e propagação a outros elementos;
- Estimar a degradação existente, determinando a secção remanescente dos elementos afetados;
- Identificar a espécie e a qualidade da madeira, de forma a adequar eventuais tratamentos preservadores, consoante a sua durabilidade e impregnabilidade;

- Estimar a sua resistência mecânica e estabelecer valores de cálculo adequados à verificação das condições de segurança estrutural. (Cruz, et.al.: 2000)

Pode-se então decidir sobre a substituição integral dos troços, reparar danos não muito profundos ou ainda optar pela consolidação. Porém, a análise só ficará completa após o estudo detalhado das ligações, pois só assim saber-se-á como as cargas estão a ser transmitidas de elemento para elemento (Henriques, 2011).

4. INSPEÇÃO NA CAPELA REAL

4.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Como referido no capítulo 1 e 2, o objetivo do presente trabalho será o estudo de elementos de madeira, verificando o estado de conservação do revestimento da parede e estrutura do pavimento do piso 1 da tribuna da Capela Real. As zonas em estudo correspondem à parte nascente da capela, tal como está assinalado a bordeaux na Figura 23.

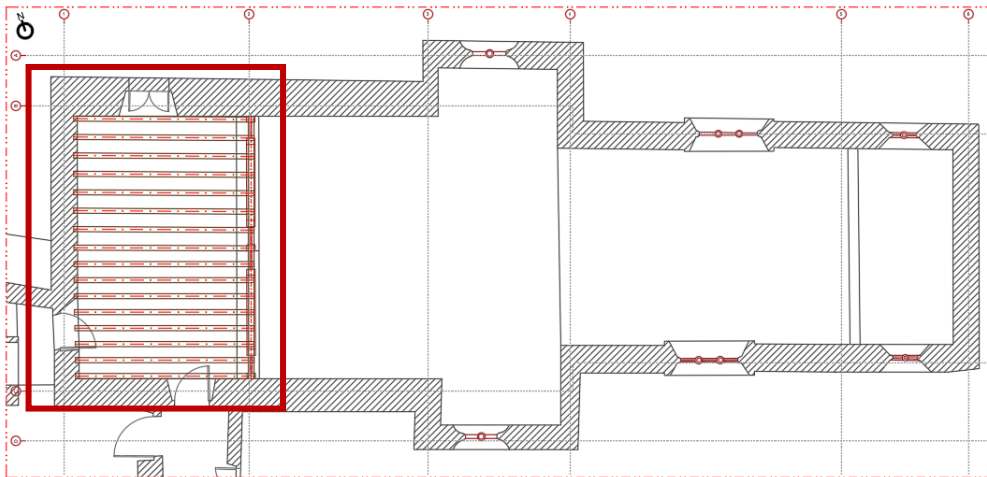


Figura 23 - Planta da Capela Real (NCREP, 2018)

Neste trabalho houve a oportunidade de estudar dois locais distintos. O primeiro é na parte do revestimento da parede e teto da capela, local a que se teve acesso pelo segundo piso da tribuna e de onde se pretende fazer um estudo sobre o estado de conservação do revestimento e da estrutura que suporta o mesmo, tal como mostrado na Figura 6 do capítulo 2. O segundo local são as vigas de suporte ao piso da tribuna, a que se teve acesso pelo piso inferior da capela. Neste caso, para além de caracterizar o estado de conservação irá realizar-se, também, uma verificação estrutural deste piso. Este é alvo de muitas solicitações diárias, pois é por aqui que passam os visitantes do palácio, número esse que tem vindo a crescer nos últimos anos, sendo que no ano de 2017 foi de 545 558 visitantes.

Uma estrutura antiga, como é a da capela, espera-se que exista alguma degradação, principalmente nas zonas pouco ventiladas. Deste modo, durante a inspeção visual já esperamos que haja degradação devido a infiltrações, ocorrência de fungos e de ataque por insetos xilófagos. A escolha do material a levar é feita com base no que se espera encontrar.

As condições necessárias para viabilidade de uma inspeção de diagnóstico são: a acessibilidade à estrutura, a limpeza do local e da superfície dos elementos, a disponibilidade de peças desenhadas com a finalidade de permitir uma adequada localização dos resultados (Mannucci, 2001).

Inicialmente pensou-se conseguir acesso à estrutura da cobertura pelo exterior, mas por uma questão de timing, isso não foi possível. Assim o acesso foi feito pelo interior com o auxílio de um andaime de menor dimensão. Também foi desmontada uma parte do revestimento por onde se conseguiu observar uma parte da estrutura da cobertura. Verificou-se aqui, numa primeira visita ao local, uma entrada de água pela cobertura. A fraca iluminação natural é um fator negativo para a inspeção, tendo de se recorrer a iluminação artificial tanto no primeiro local, como para a observação das vigas do pavimento. Para aceder a estas vigas também se recorreu ao mesmo

andaime, e também foi feito um desmonte parcial do revestimento do teto pelo piso inferior. As condições de limpeza não foram um problema, pois com uma simples trincha se conseguiu limpar e observar o necessário.

4.2 INSPEÇÃO DO REVESTIMENTO DAS PAREDES E TETO

A inspeção do revestimento das paredes e do teto, foi elaborada pelo interior da capela, no segundo piso da tribuna. Observaram-se dois painéis, o painel da parede Sul e o da parede Norte.

Numa primeira visita de inspeção visual na tribuna da capela, e tal como se referiu anteriormente, pôde-se identificar a entrada de água pela cobertura, na zona da fachada voltada a sul, na parte em que tinham retirado um pedaço do revestimento. Verificou-se também muita degradação dos montantes dessa zona, estando já em falta parte dos mesmos. Na parte de trás dos painéis de revestimento existentes, observa-se muita acumulação de sujidade, poeiras, e madeira degradada.

A Figura 24 apresenta a parede da fachada Sul, onde se indica o painel vertical e o painel diagonal que se irá estudar. É também evidenciada na Figura 25 a degradação dos montantes 1 e 2 e o lixo acumulado por detrás do revestimento.



Figura 24 - Painel Sul, localização dos painéis vertical e diagonal



Figura 25 - Parede Sul com evidência de a) Lixo e detritos acumulados entre o revestimento b) Degradação dos montantes

O montante 1 e 2 (os que estão à vista), estão bastante degradados, existindo evidências de ataque por térmitas subterrâneas e fungos de podridão. O ataque por estes agentes biológicos pode dever-se à entrada de água pela cobertura, junto do montante 1, o que levou a um aumento do teor em água. A perda de secção é evidente, não existindo apoio nos montantes referidos e uma redução da secção útil bastante evidente. Observa-se também a acumulação de sujidade, detritos e areias entre o revestimento de madeira e a parede de alvenaria, a uma altura de cerca de 15 cm. No exterior da capela, na mesma fachada, pode-se observar o crescimento de ervas na cobertura.

Com estes níveis de degradação é possível estimar que outras partes menos visíveis da estrutura sofram também de alguma degradação. Segundo a Tabela 2 do capítulo 3, a estrutura de madeira neste local classifica-se, segundo a exposição ao risco por ataque biológico, como classe de risco 2, tendo risco médio de ataque por fungos e caruncho, e risco baixo de ataque por térmitas.

O trabalho desenvolvido nesta zona incidiu sobre a avaliação do estado de conservação de parte da estrutura e do revestimento da parede da capela, utilizando algumas técnicas não destrutivas e semi-destrutivas. O material utilizando, tanto na fase de inspeção visual, como na fase de análise com meios auxiliares de diagnóstico, foi o que se apresenta na Figura 26 onde se podem identificar os seguintes materiais:

1. Higrómetro de agulhas
2. Higrómetro de contacto
3. Réguas de escalas e fita métrica
4. Formão
5. Maceta
6. Trincha
7. Resistógrafo (à esquerda)



Figura 26 - Meios auxiliares de diagnóstico

Foi também levado para o local um termo-higrómetro, para registo da temperatura e da humidade relativa do ar no interior da capela. Todo este equipamento pertence ao Laboratório de Madeiras do Departamento de Engenharia Civil do ISEL.

As visitas de inspeção fizeram-se em dias distintos. De seguida será apresentado em detalhe o modo como foi feita cada inspeção e como foram utilizados os instrumentos.

4.2.1 PAINEL SUL

4.2.1.1 Teor em água e ambiente interior no local em estudo

No primeiro dia de inspeção, a 23 de Março de 2018, por volta das dez horas a aplicação do Instituto Português do Mar e da Atmosfera – IPMA - registava em Sintra cerca de 12 °C e chuva fraca. O dia esteve nublado e com chuva fraca. Às 10 horas e 40 minutos, o termo-higrómetro registava 12,3 °C e uma Humidade Relativa de 77,8% no interior da capela. É importante registar estes valores pois, como se disse anteriormente, a madeira é um material higroscópico e o teor em água das peças alteram-se consoante a Humidade Relativa do ar e a temperatura ambiente.

Neste dia, analisou-se o painel da parede Sul, começando por identificar a possível localização dos montantes, usando como guia os parafusos de fixação do revestimento à estrutura de suporte. A maceta auxiliou também na localização dos montantes, pois onde estes estão o som sentido soa mais seco e não tão oco. Esboçou-se, depois, a sua localização de acordo com a Figura 27.



Figura 27 - Esquema da localização dos montantes

Este reconhecimento dos montantes será útil para efetuar as medições com o higrómetro e resistógrafo. Os montantes visíveis têm uma secção de 10,0x7,0 centímetros. Verificou-se que a madeira é de uma espécie resinosa, provavelmente casquinha (*Pinus Sylvestris, L*), por ser uma espécie de utilização muito comum na zona de Lisboa em elementos estruturais de monumentos até ao fim do século XVIII.

Começou-se por registar as medições com o higrómetro de contacto e com os resultados deste, determinaram-se dois pontos para utilizar o higrómetro de agulhas. A utilização do higrómetro de agulhas tem de ser pensada, pois este provoca dois pequenos furos de dimensões quase impercetíveis, mas que ainda assim é uma perturbação no revestimento que terá de ser depois restaurado. Por esta razão foram feitas poucas medições com esse equipamento. Na Tabela 12 estão contemplados os resultados das medições com higrómetro de contacto e de agulhas.

Tabela 12 - Teor em água medido com Humidímetro de contacto e de agulhas no painel Sul

Teor em Água medido com Humidímetro de Contacto (%)												Média Total	Teor em Água medido com Humidímetro de Agulhas (%)
Localização	Painel Vertical				Painel Diagonal						50 cm		
	25 cm	50 cm	80 cm	135 cm	no início			no final					
Montante 1	12.9	13.2	13.1	14.0	14.9	13.5	12.4	13.4	12.9	14.2	14.0	13.5	
				14.5		13.1			14.1				
Montante 2	12.1	12.3	12.3	12.6	13.5	13.0	12.8			12.2	12.8	12.5	
				13.1		12.9			12.5				
Montante 3	13.5	15.3	14.7	13.2						14.1	12.9	13.4	16.2
		15.0		13.0		12.4			13.5				
Montante 4	12.6		12.3		13.1	13.8	14.6			11.8	10.7	12.7	
				13.1		14.2			11.3				
Montante 5	12.2		12.6									12.4	
Montante 6	12.9		12.5		13.1			12.8		13.3	14.0	13.0	12.9
				13.1		12.8			13.7				
Montante 7	12.5		12.6		13.1			13.3		13.6	13.1	13.0	
				13.1		13.3			13.4				
Montante 8	11.8		12.1									12.0	

Analisando a tabela anterior, verifica-se que os valores do teor em água medidos com o higrómetro de contacto estão entre 12% e 15%. Isso significa que todos os elementos se encontram secos, bastante abaixo do valor de teor em água de risco de ataque por térmitas subterrâneas e por fungos de podridão, que é de cerca de 20% (Cruz, H.; Nunes, 2005). Uma vez que a humidade relativa do ar era, nesse dia, de 77,7% e a temperatura de 12,3°C, tendo em conta a Figura 13, que relaciona as condições ambientais médias em que se insere uma madeira, pode-se constatar que os teores de humidade se encontram dentro dos valores de equilíbrio. A Tabela 13 é apresentada em Henriques (2011) em que correlaciona os valores de temperatura e humidade a que um elemento estrutural de madeira de Pinho bravo pode estar exposto com os locais-tipo no interior do edifício, complementando esta relação com as classes de risco definidas pela EN 335-1-2:2006 e apresentadas na Tabela 2 do presente trabalho.

Considerando que estamos num local sem aquecimento de um edifício público de difícil acesso à cobertura e junto de paredes antigas de alvenaria, classifica-se como uma zona de Classe de Risco 2, concluindo-se, assim, que os valores das medições estão concordantes com a Tabela 13.

Tabela 13 – Relação entre o teor de água de equilíbrio da madeira de Pinho bravo e as condições higrotérmicas ambientais em edifícios (Henriques, 2011)

Humidade relativa do ar (%)		Teor em água de equilíbrio (%)	Locais-tipo em interior de edifícios	Classe de Risco
T=15 °C	T=25 °C			
40	43	8	Com aquecimento	1
53	55	10		
63	65	12	Sem aquecimento	1
72	74	14		2
78	79	16		
83	84	18	Muito húmido ou em contacto com focos de humidade	2
86	87	20		3.1
90	91	22		3.2
94	95	26		4.1
97	98	30		4.2

As medições efetuadas com o humidímetro de contacto e de agulhas não evidenciaram teores de humidade muito elevados, daí se pode cogitar que o ataque pelas térmitas subterrâneas já tenha ocorrido há mais tempo, pois estas só degradam madeiras com teor em água superiores a 20%. (Cruz, H.; Nunes, 2005).

4.2.1.2 Resistência à perfuração

As medições com os humidímetros, produziram informação sobre onde utilizar o Resistograph®, técnica também semi-destrutiva. Assim fez-se medições no montante 3 por ter sido onde se registou maior teor em água no interior do montante e também no montante 6. Após ter sido detetada alguma degradação interior neste montante, resolveu-se medir também no montante 7 para verificar se a degradação se mantinha.

O resistógrafo utilizado é da marca IML Resi-B, regulado para uma velocidade perfuração de 25cm/min. Apresentam-se em anexo os gráficos obtidos, em que cada ensaio está identificado pelo número de ensaio, precedido pela letra R e indicando de seguida a distância a que se fez o ensaio desde o seu apoio na base do painel. Este equipamento é pesado e difícil de utilizar, por isso as medições a efetuar foram condicionadas e houve alguma dificuldade em conseguir um perfil resistográfico até ao final, pois tem de se manter o aparelho pressionado contra a peça em estudo. Este aspeto revelou ser uma limitação no estudo, pois nem sempre se conseguiram os melhores gráficos.

Com os perfis resistográficos obtidos, pode-se determinar um valor essencial, a medida resistográfica (MR), que se pode utilizar para a determinação da massa volúmica e resistência das peças em estudo. Este valor é obtido pela equação (34) (Calderoni et al., 2010):

$$MR = \frac{\int_0^h \text{Área}}{h} \quad (34)$$

Em que h é a profundidade de penetração. Esta medida resistográfica é aplicada para madeira sem degradação, madeira sã. (Henriques et al., 2011) Deste modo, para a determinação deste valor, em madeira degradada, só se podem considerar as zonas claramente sãs.

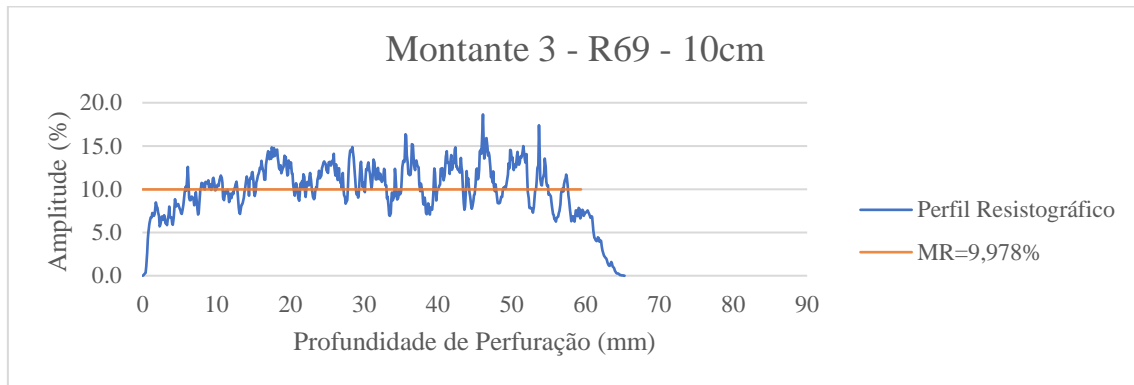
De seguida apresentar-se-ão alguns dos resultados obtidos com o resistógrafo, o principal objetivo deste ensaio é verificar o interior dos montantes, se existe degradação qual a sua localização e a

sua extensão. Sendo que estes montantes estão na maioria por detrás do revestimento, este é o único método de acesso aos mesmos.

Montante 3

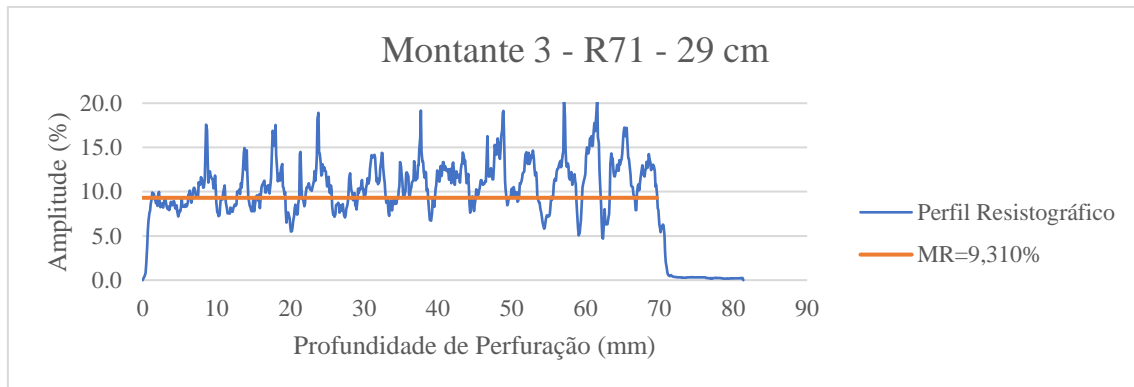
O montante 3 está à vista, por isso a profundidade de perfuração dá-nos também a dimensão do montante na direção da perfuração.

Gráfico 1 - Perfil Resistográfico R69



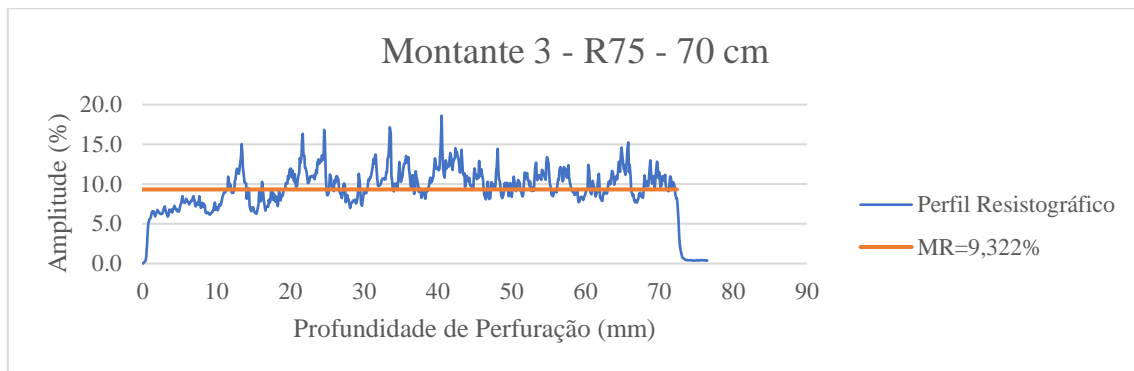
Este primeiro ensaio, apresentado no Gráfico 1, foi elaborado a 10 centímetros do apoio. Apresenta alguma uniformidade no perfil, podendo-se observar a diferença de resistência à penetração entre os anéis de Outono e de Primavera. Este é um perfil típico de madeira sã, pelo que se conclui que, de um modo geral não há degradação no interior da peça.

Gráfico 2 - Perfil Resistográfico R71



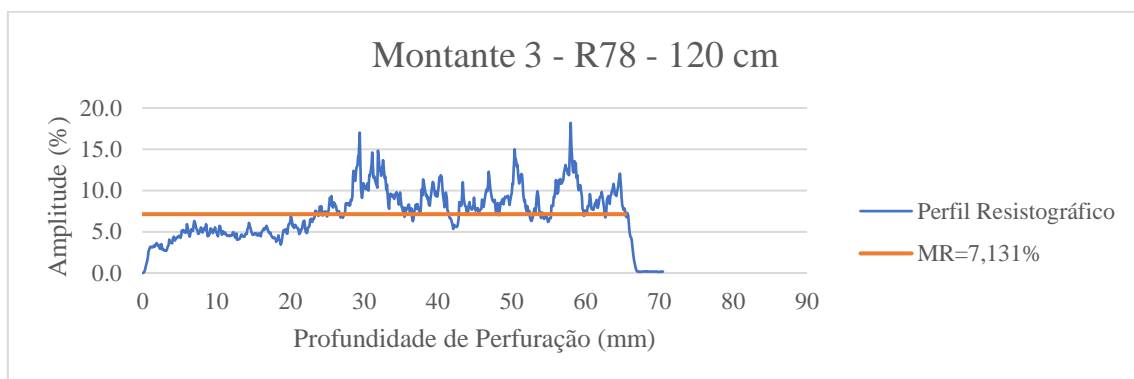
Mais acima no mesmo montante, e como mostra o Gráfico 2 existe uma maior diferença entre valores de resistência mais altos e mais baixos, apesar de a média se manter uniforme. A Medida Resistográfica é semelhante ao ensaio anterior. Mais uma vez se verifica que a madeira está sã.

Gráfico 3 - Perfil Resistográfico R75



No ensaio do Gráfico 3, a 70 centímetros do apoio do montante 3, denota-se que a resistência à penetração é menor no primeiro centímetro, variando depois de forma uniforme até ao final da secção, situação que eventualmente se deverá ao facto de a madeira perfurada se tratar de borne e depois atinge parte do cerne.

Gráfico 4 - Perfil Resistográfico R78



O Gráfico 4 apresenta o perfil resistográfico a 120 centímetros do apoio verifica-se que a resistência à penetração é menor nos primeiros dois centímetros, havendo dois picos maiores. A medida resistográfica é menor que nos ensaios anteriores.

Todos os ensaios mostraram que a secção tem cerca de sete centímetros, o primeiro apresenta uma secção inferior em, aproximadamente, 0,5 centímetros, resultando, provavelmente, de irregularidades no corte.

Não foi encontrada degradação no interior do montante. Os restantes perfis podem ser consultados nos anexos do trabalho. A Tabela 14 apresenta um resumo das Medidas Resistográficas calculadas e a média dos valores para o montante 3. Foi aqui aplicado o estudo de Henriques (2011) que correlaciona valores entre as medidas resistográficas e valores de massa volúmica e de resistência à compressão, para madeiras sãs de casquinha e pinho bravo. Foram utilizadas as fórmulas $MR = 0,0285 \times \text{massa volúmica} - 4,7291$ e $MR = 0,334 \times \text{resistência à compressão} - 2,8454$ respectivamente.

Tabela 14 - Medidas Resistográficas do Montante 3

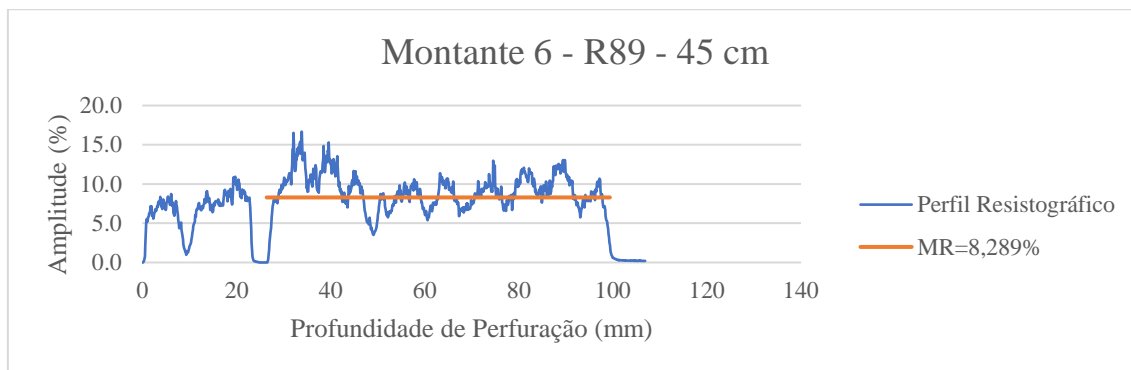
Ensaio	R69	R70	R71	R72	R74	R75	R77	R78	R80	R79
Distância ao apoio (cm)	10	17	29	42	55	70	108	120	123	129
MR (%)	9,98	9,02	9,31	8,71	10,16	9,32	9,80	7,13	10,22	9,50
Massa volúmica estimada (kg/m ³)	516	482	493	471	523	493	510	416	525	499
Resistência à compressão estimada (N/mm ²)	38,4	35,5	36,4	34,6	38,9	36,4	37,9	29,9	39,1	37,0
Média MR (%)	9,31									
Média da Massa volúmica (kg/m ³)	493									
Média da Resistência à compressão (N/mm ²)	36,4									

Montante 6

Nos restantes montantes, a agulha do resistógrafo tem de perfurar primeiro o revestimento até chegar ao montante. O revestimento tem cerca de dois centímetros e isso é perceptível pelos ensaios registados.

O Gráfico 5 mostra o ensaio elaborado a 45 centímetros do apoio, onde se registou uma resistência à penetração maior nos primeiros dois centímetros do perfil, descendo no interior e mantendo-se uniforme até ao final do perfil. Verifica-se que revestimento tem dois centímetros e meio e a medida resistográfica é menor que no montante 3. A secção do montante tem sete centímetros e meio de profundidade.

Gráfico 5- Perfil Resistográfico R89



Já o **Error! Reference source not found.**, que apresenta o ensaio realizado um pouco mais acima, o perfil resistográfico mostrou uma zona de degradação no interior do montante, entre os cerca de 5,5 centímetros de perfuração e os 6,5. Fez-se, então outro ensaio um pouco mais acima, o **Error! Reference source not found.**, o qual também revelou a continuação desta degradação. Nos perfis resistográficos que apresentam degradação, o cálculo da medida resistográfica é feita apenas com os valores de madeira sã, retirando os valores de resistência à penetração mais baixos.

Gráfico 6 - Perfil Resistográfico R90

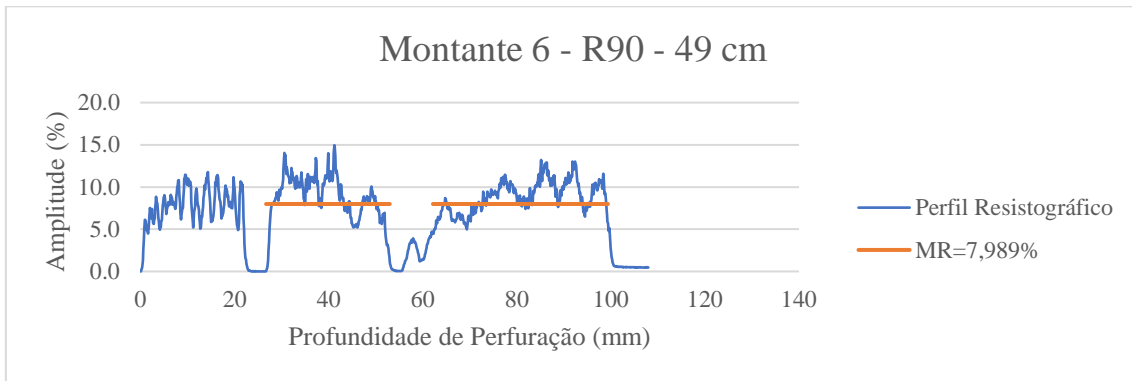
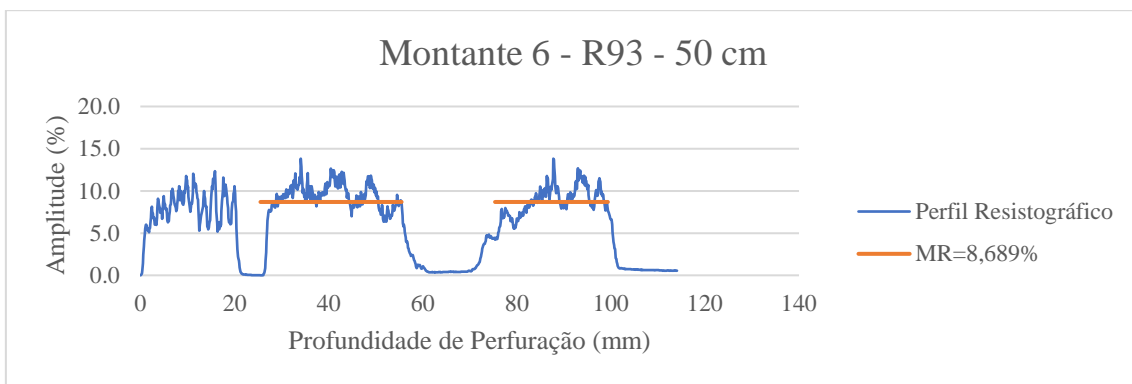


Gráfico 7 - Perfil Resistográfico 93



A Tabela 15 apresenta os valores das medidas resistográficas, bem como, a média para o montante 6 e os valores de relação entre as medidas resistográficas e a massa volúmica e a resistência à compressão.

Tabela 15 - Medida Resistográfica do montante 6

Ensaio	R89	R90	R93	R92	R91	R87	R82
Distância ao apoio (cm)	45	49	50	62	70	82	91
MR (%)	8.289	7.989	8.689	8.475	7.357	7.613	9.337
Massa volúmica estimada (kg/m ³)	456.78	446.25	470.81	463.30	424.07	493.55	165.93
Resistência à compressão estimada (N/mm ²)	33.34	32.44	34.53	33.89	30.54	36.47	8.52
Média MR (%)	8.250						
Média da Massa volúmica (kg/m ³)	417.242						
Média da Resistência à compressão (N/mm ²)	29.962						

A Figura 28 apresenta um corte esquemático do montante 6 com representação da degradação encontrada por meio dos ensaios realizados com resistógrafo.

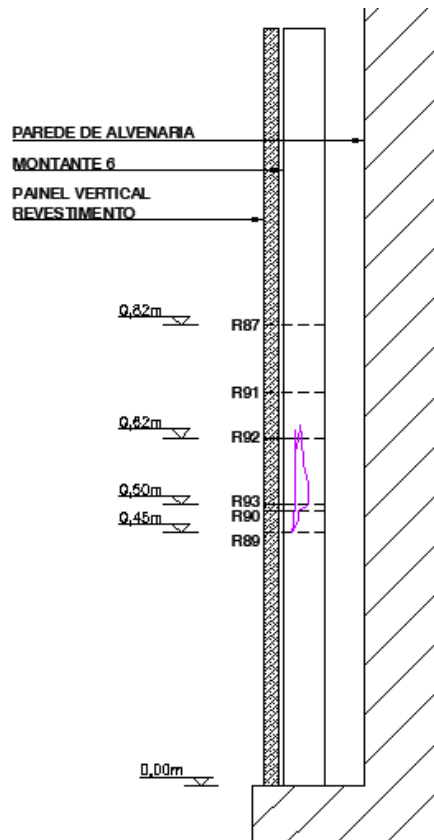


Figura 28 - Corte do montante 6 com representação da degradação encontrada

Montante 7

Como no montante 6 foi encontrada degradação, decidiu-se verificar também no montante 7. Alguns dos resultados são mostrados nos gráficos seguintes:

Gráfico 8 - Perfil Resistográfico R94

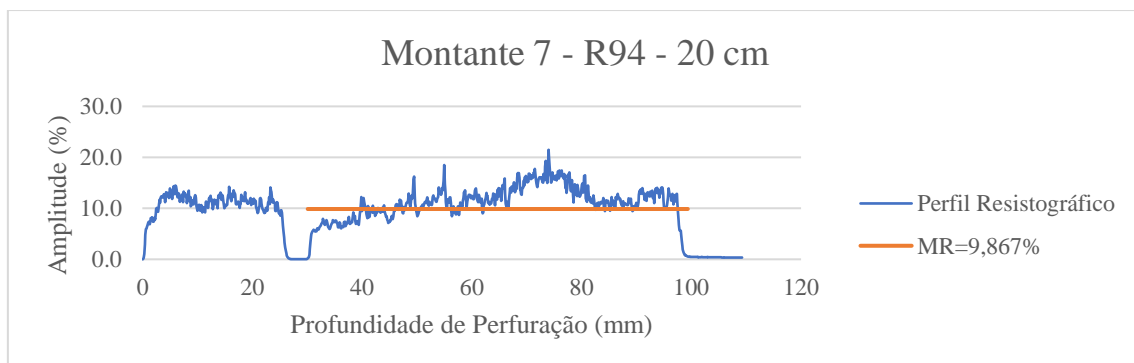
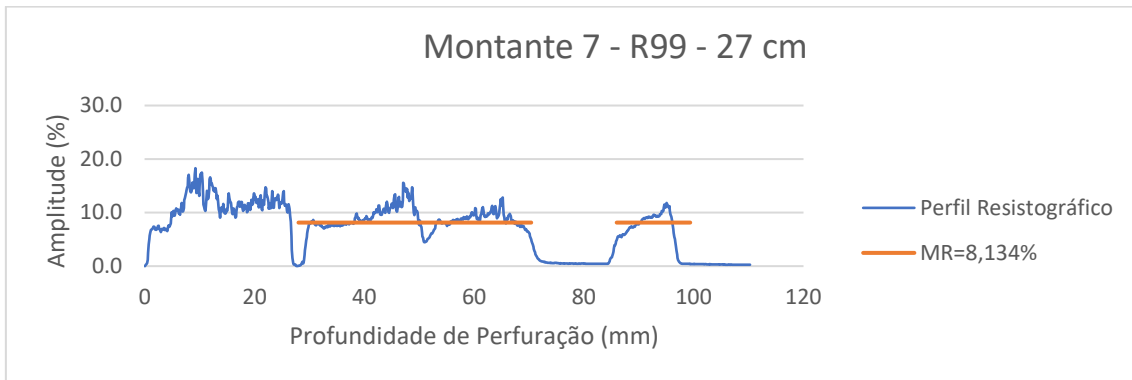


Gráfico 9 - Perfil Resistográfico R99



No montante 7 verificou-se a existência de degradação entre os 27 e os 34 centímetros de distância ao apoio (ver

Gráfico 9). Nas restantes zonas mantêm-se a uniformidade do perfil e valores de medida resistográfica semelhantes aos anteriores montantes em estudo, tal como apresentado na Tabela 16.

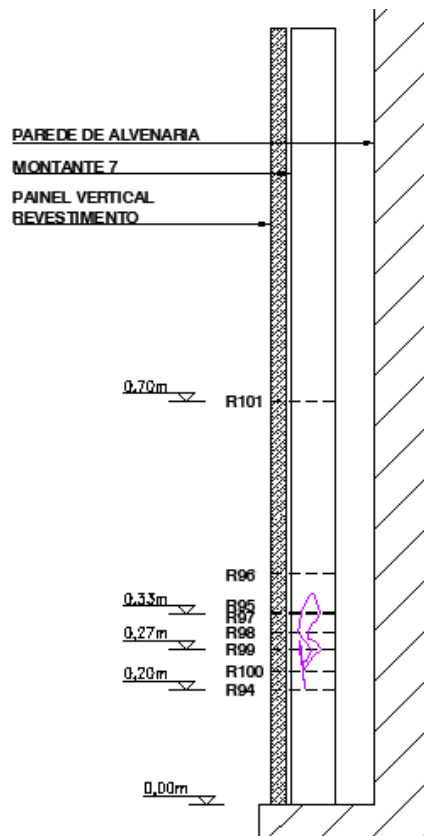


Figura 29 -Corte do montante 7 com representação da degradação encontrada

A Figura 29 apresenta um corte esquemático do montante 7 onde se evidencia degradação por térmitas subterrâneas, de acordo com os perfis resistográficos obtidos.

Tabela 16 - Medida Resistográfica do montante 7

Ensaio	R94	R100	R99	R97	R96	R101
Distância ao apoio (cm)	20	23	27	33	40	70
MR (%)	9.867	8.544	8.134	11.778	9.106	9.405
Massa volúmica estimada (kg/m ³)	512.14	465.72	451.34	579.20	485.44	495.93
Resistência à compressão estimada (N/mm ²)	38.06	34.10	32.87	43.78	35.78	36.68
Média MR (%)	9.47					
Média da Massa volúmica (kg/m ³)	498.30					
Média da Resistência à compressão (N/mm ²)	36.88					

4.2.2 PAINEL NORTE

4.2.2.1 Teor em água e ambiente interior no local em estudo

O segundo dia de inspeção do revestimento da capela, foi no dia 27 de Março. Chegou-se ao local, perto das dez horas, o IPMA indicava uma temperatura de 13 °C. No interior da capela o Termohigrómetro registava 13,8 °C e uma Humidade Relativa do Ar de 73,7%. O dia esteve sempre limpo, como mostra a Figura 30 e com temperatura máxima de 20 °C por volta das quinze horas.



Figura 30 - Registo do exterior do Palácio Nacional de Sintra 27/03/2018

À semelhança do painel Sul, no painel da parede Norte não existe nenhum montante aparente, pelo que teve de se identificar a sua possível localização com a identificação da localização dos parafusos e pelo do som da maceta ao bater no revestimento. Na Figura 31 é indicado o que se considerou ser a localização dos montantes.



Figura 31 - Localização dos montantes no painel Norte

Da mesma forma do que se fez no painel Sul, também se fizeram medições com o humidímetro de contacto e o de agulhas nos vários montantes identificados, tanto no painel vertical, como no painel acima, que se dispõe já na diagonal. A Tabela 17 apresenta as medições efetuadas no painel vertical e na Tabela 18 contemplam-se os resultados no painel diagonal.

Tabela 17 - Valores de teor em água medidos com Humidímetro de contacto e de agulhas no painel vertical Norte

Localização (cm)	Teor de Humidade no Painel Vertical (%)											Média Total	Humidímetro de Agulhas					
	Humidímetro de Contacto										35 cm		82 cm					
	25 cm			50 cm		75 cm				100								
Montante 1	14.30			14.10		14.80				14.10	14.33	17.40	18.50					
Montante 2	13.80			12.80	14.10	13.20				13.20	13.41							
Montante 3	13.20			12.70	12.40	13.40				12.90	13.60							
Montante 4	13.40			12.80		11.50	13.60	13.30	14.90	12.60	13.60	14.30	13.90	13.93	13.50	76 cm	17.70	
Montante 5	13.10			13.30		13.40				12.50	13.08							
Montante 6	11.90	12.30	12.60	12.27		12.40	12.20	12.30				12.20	12.10	11.10	12.12			
Montante 7	12.70	12.20	12.45		12.70		13.20	13.00	13.10				13.60	11.70	11.80	12.73		
Montante 8	12.50			12.20		13.40	12.80	13.10				11.60	11.80	11.70	12.38			
Montante 9	13.10			12.30	13.40	13.00	12.30	12.65				12.60	12.60	12.60	12.81			
Montante 10	12.80			12.30		12.80				12.80	13.00	12.73						
Montante 11	12.90			12.00	12.60	12.50	12.80				13.30	12.70	13.00	12.77				

Tabela 18 - Valores de teor em água com Humidímetro de contacto e de agulhas no painel diagonal Norte

Localização	Teor em Água medido com Humidímetro de Contacto no Painel Diagonal (%)													Média Total					
	Zona 1			Zona 2				Zona 3		Zona 4		Zona 5			Zona 6				
Montante 1	13,80			14,20				12,80		12,80		13,50		13,00		13,35			
Montante 2	14,80			16,00	14,50	16,60	15,60	12,70	12,80	12,75		12,20		12,60		13,45			
Montante 3	15,00	13,90	14,30	16,20	15,80	14,60	15,68		12,30	12,90	12,60		11,90		13,00	13,41			
Montante 4	12,50	14,30	13,00	13,50				13,00	12,20	12,30	12,50		11,30	11,00	11,15		12,40	12,55	
Montante 5	13,20	13,30	13,27	13,40	14,10	13,20	13,57		13,60	13,40	14,00		13,30		11,70	13,30	13,10	13,25	
Montante 6	14,40	14,20	13,25	14,20	14,30	14,00	13,67		13,60		13,50	13,70	13,20		13,80		13,79		
Montante 7	13,50	13,80	14,40	11,60	13,40	13,30	14,17		13,20		12,60		13,40	12,80	13,80		13,16		
Montante 8	13,30			13,10				12,60	11,80	12,00	12,90		13,00	12,20	12,70	13,80	14,90	14,30	13,07
Montante 9	13,70	13,40	13,90	14,00	13,90	13,90	13,93		13,00		12,90	13,10	13,90		12,80		13,34		
Montante 10	13,20			13,10				12,77		12,77		13,50		14,40	11,50	12,50	13,20	12,30	13,03
Montante 11																			

Devido ao formato dos laços que desenham o revestimento da parede, não foi possível retirar o mesmo número de medições nas diferentes zonas.

De uma forma geral, as medições registadas com o higrómetro de contacto no painel vertical revelaram teores em água médios relativamente baixos, entre os 12,12% e os 14,33%, sendo estes valores aceites e fora dos limites de risco de ataques de agentes xilófagos. Porém, utilizando o humidímetro de agulhas, para uma análise a maior profundidade, encontraram-se teores em água mais elevados, como mostra a Figura 32, embora não se ultrapasse os 20%.

Também no painel diagonal, os valores médios de teor em água com higrómetro de contacto variaram entre 12,55% e 13,79%, indicando madeira seca.



Figura 32 - Medição do teor em água com humidímetro de agulhas

4.2.2.2 Resistência à perfuração

Após isso, utilizou-se o resistógrafo, não só para análise das secções dos montantes, mas também para confirmar a localização dos mesmos. O ensaio com o resistógrafo é realizado exercendo alguma pressão no revestimento para que a agulha penetre, e sempre o mais perpendicular possível ao elemento em estudo, tal como mostra a Figura 33.



Figura 33 - Realização do ensaio com o resistógrafo

De seguida apresentam-se alguns perfis obtidos e a informação se pôde retirar dos mesmos.

Montante 1

Gráfico 10 - Perfil Resistográfico R102

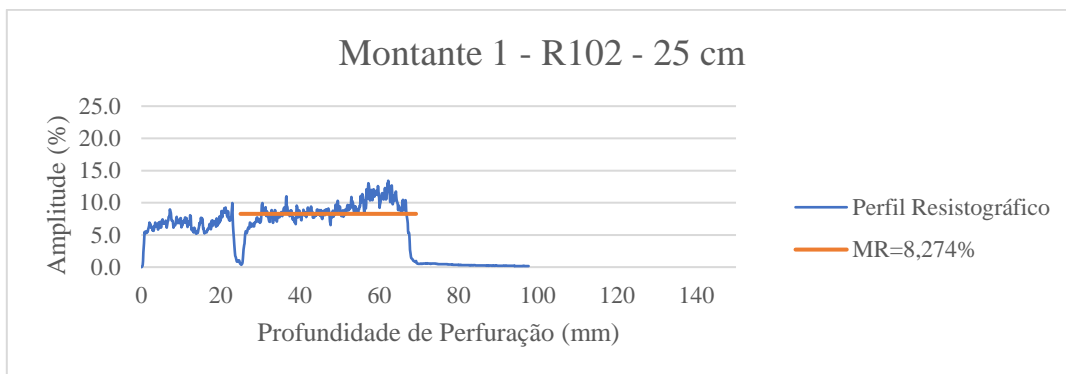
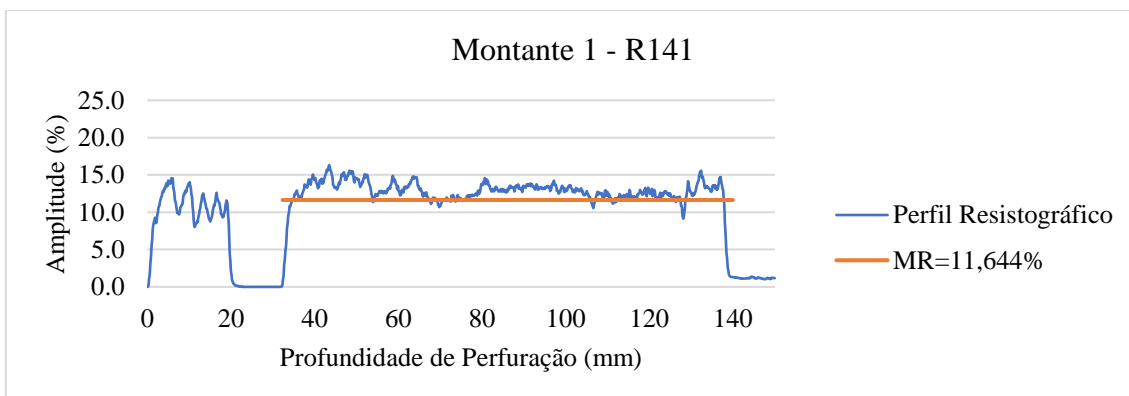


Gráfico 11 - Perfil Resistográfico R141



No montante 1, ambos os perfis apresentam uniformidade, não existindo sinais de degradação aparente. O Gráfico 10 apresenta um perfil do montante 1 retirado do painel vertical, e o Gráfico 11, pertence ao painel diagonal logo acima do vertical. Verifica-se que os montantes do painel inferior têm menor largura que os elementos que estão na diagonal.

Montante 3

Gráfico 12 - Perfil Resistográfico R104

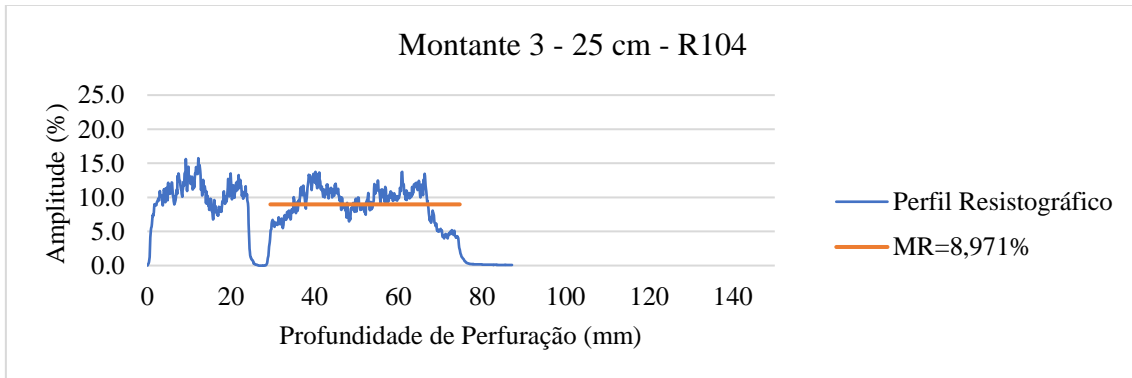
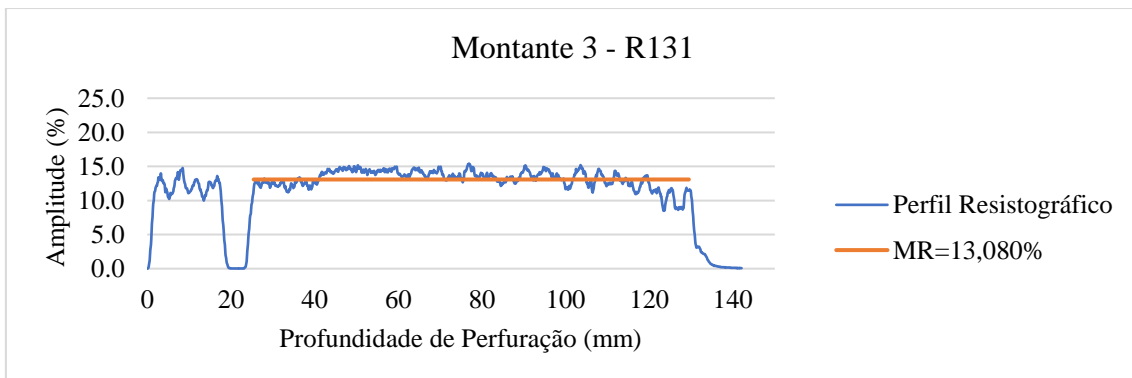


Gráfico 13 - Perfil Resistográfico R131



O mesmo que acontece no montante 1 repete-se no montante 3. O Gráfico 12 apresenta o ensaio no painel vertical que apresenta menor largura e menor medida resistográfica do que no painel diagonal, como mostra o Gráfico 13. O perfil resistográfico do montante apresenta alguma irregularidade, demonstrando uma diminuição da resistência à perfuração, sensivelmente a meio da sua profundidade. Já o perfil resistográfico do elemento na diagonal apresenta maior largura e maior medida resistográfica.

Pode se afirmar que pela sua localização na estrutura e que tanto pelo ensaio R 141 e R131 foram realizados numa peça pertencente a uma diagonal da estrutura da asna (ver Figura 6), apresentando uma profundidade de perfuração de cerca de 110 milímetros. Mostra também um cuidado maior na escolha de maiores secções e madeiras mais resistentes para elementos de maior importância no funcionamento de uma asna.

Montante 4

Gráfico 14 - Perfil Resistográfico R105

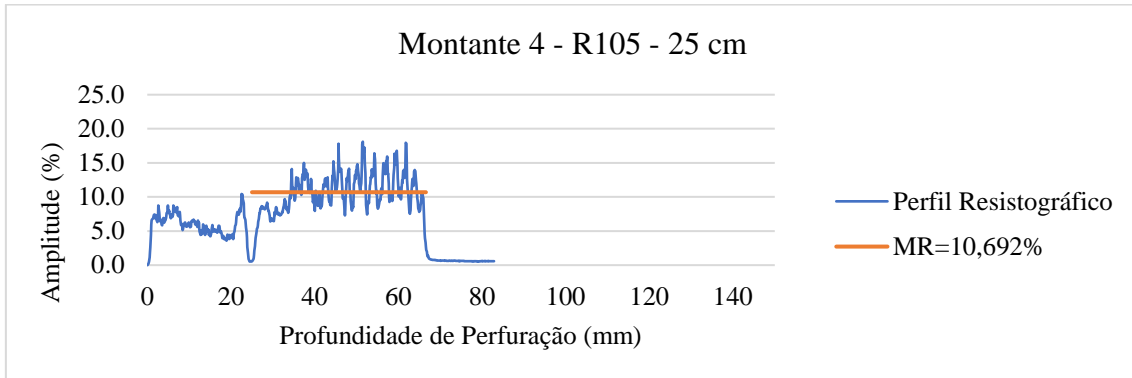


Gráfico 15 - Perfil Resistográfico R107

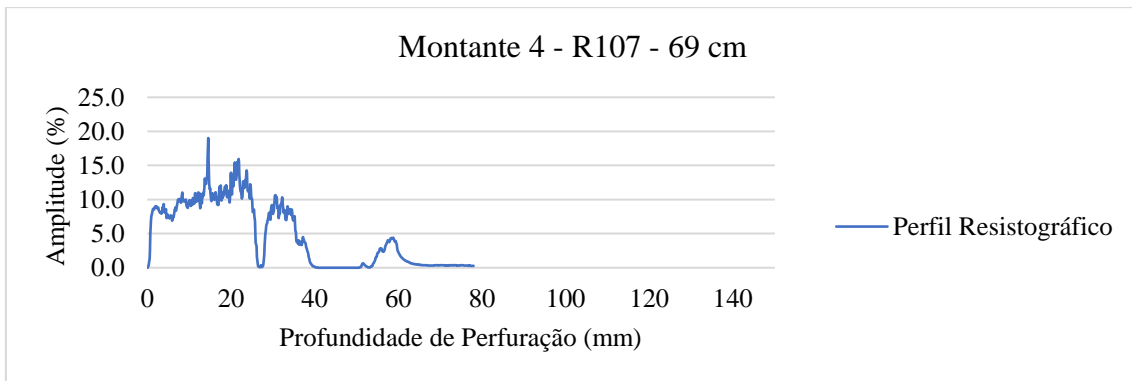
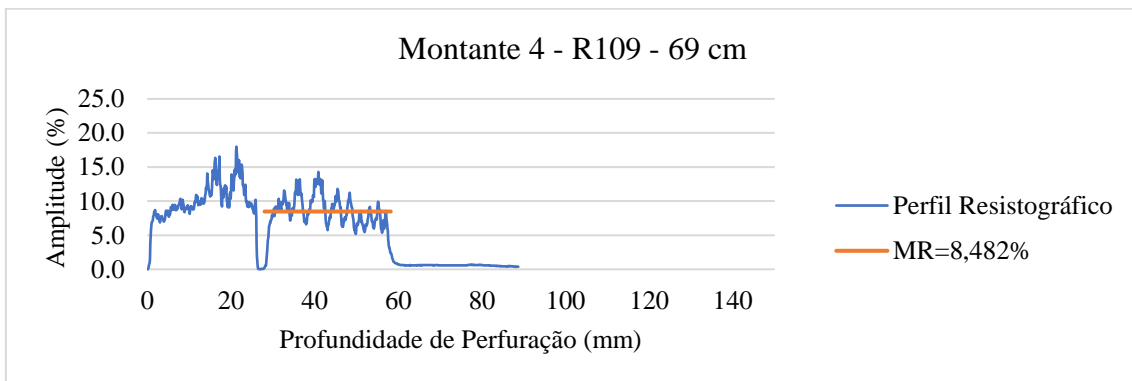


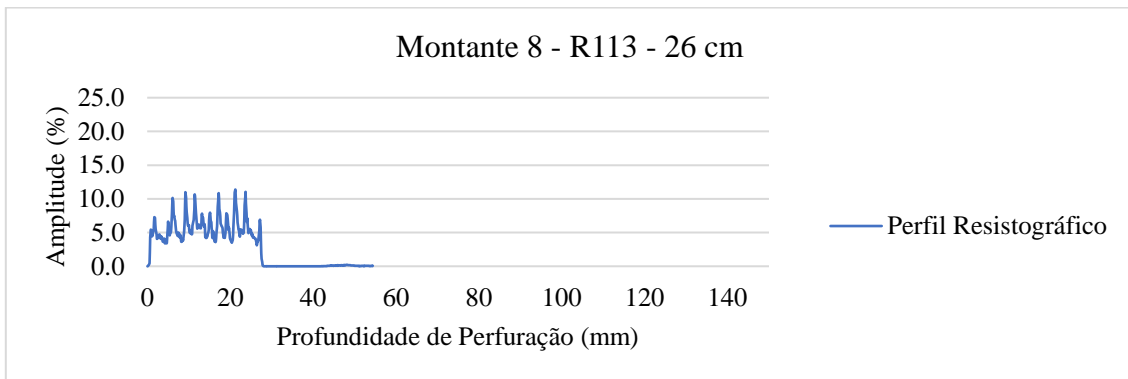
Gráfico 16 - Perfil Resistográfico R109



Nos ensaios realizados no montante 4, o Gráfico 14 demonstra que este tem menor dimensão que os outros. Encontrou-se degradação profunda a 69 centímetros do apoio dos montantes, como se pode observar no Gráfico 15. Porém esta degradação encontra-se do lado esquerdo do montante, pois um outro ensaio feito à mesma altura, mas do lado direito (Gráfico 16) revela não ter degradação.

Montante 8

Gráfico 17 - Perfil Resistográfico R113

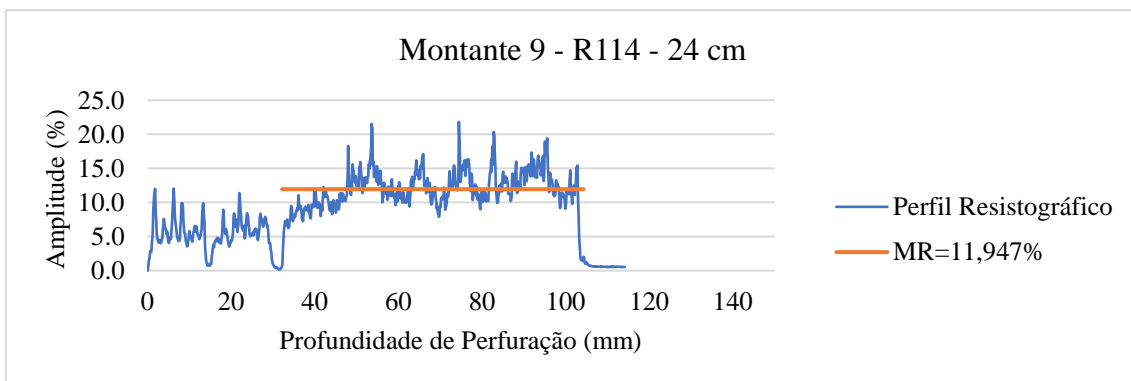


Neste ensaio, chegou-se à conclusão de que, onde se julgou localizar o montante 8, não há qualquer montante. O Gráfico 17 apresenta o perfil resistográfico elaborado na zona onde se arbitrou ser o montante 8, mas pela profundidade obtida percebe-se que não existe montante, e que o revestimento tem cerca de 2,5 centímetros, tal como nos ensaios anteriores.

Outros ensaios permitiram também perceber que no painel diagonal, a continuação da estrutura por vezes não está no seguimento dos montantes do painel vertical, e que a distância entre montantes não é sempre igual.

Montante 9

Gráfico 18 - Perfil Resistográfico R114



Dos ensaios elaborados no montante 9 pode-se concluir que este tem maior largura que os anteriores, tal como mostra o Gráfico 18. Encontrou-se uma zona de significativa perda de resistência a 54 centímetros de altura.

Na Tabela 19 pode-se consultar as medidas resistográficas dos montantes do painel Norte, bem como a correspondência de valores de massa volúmica e resistência à compressão de acordo com o estudo de Henriques (2011).

Tabela 19 - Medidas Resistográficas dos montantes do painel Norte

Montante	Ensaio	Distância ao apoio (cm)	MR (%)	Massa volúmica estimada (kg/m ³)	Resistência à compressão estimada (N/mm ²)	Média MR (%)	Média da Massa volúmica (kg/m ³)	Média da Resistência à compressão (N/mm ²)
1	R102	25	8.247	455.30	33.21	8.25	455.30	33.21
	R141	Diagonal	11.644	574.49	43.38	11.00	551.79	41.44
	R143		10.350	529.09	39.51			
3	R104	25	8.971	480.71	35.38	8.97	480.71	35.38
	R131	Diagonal	13.08	624.88	47.68	13.08	624.88	47.68
4	R105	25	10.692	541.09	40.53	8.68	470.41	34.50
	R106	63	5.063	343.58	23.68			
	R108	65	10.473	533.41	39.87			
	R109	69	8.482	463.55	33.91			
	R122	Diagonal	9.490	498.92	36.93	9.49	498.92	36.93
6	R110	20	9.236	490.00	36.17	9.24	490.00	36.17
7	R112	29	10.272	526.35	39.27	10.27	526.35	39.27
9	R114	24	11.947	585.13	44.29	11.95	585.13	44.29
10	R117	83	9.928	514.28	38.24	9.93	514.28	38.24

Fazendo a análise dos ensaios no painel Norte, pode-se pressupor que a generalidade dos montantes se encontra em bom estado de conservação e secos. No entanto, encontrou-se degradação significativa no lado esquerdo do montante 4, vertical, entre as cotas 63 e 69 cm.

4.2.3 CONCLUSÃO

Uma condicionante deste tipo de ensaios é o peso do equipamento, o que não permitiu realizar ensaios em número suficiente de modo a conseguir fazer uma média de medida resistográfica igual para todos. Como já tinha sido referido, muitos dos ensaios elaborados não chegaram ao fim por não se conseguir fazer força suficiente para que a agulha do resistógrafo avançasse dentro dos montantes.

De notar também que estes ensaios são acompanhados de uma grande incerteza, pois não se consegue ter acesso visual à estrutura, estando apenas a retirar ilações com base em resultados do resistógrafo e das medições de teores em água.

Contudo, pode-se concluir que, de um modo geral, estes montantes têm degradação pontual em algumas zonas, devido ao ataque, no passado, de térmitas subterrâneas e, possivelmente, fungos de podridão. A entrada de água pela cobertura e a existência de lixo e detritos entre as paredes da capela e os painéis de revestimento da parede também contribuem para o desenvolvimento de degradação.

Verificou-se também que as dimensões dos montantes variam e a diagonal da asna apresenta uma secção de maior dimensão e maior resistência à perfuração que os montantes, demonstrando assim um cuidado na escolha de materiais para estruturas.

4.3 INSPEÇÃO DAS VIGAS DO PAVIMENTO DA TRIBUNA

No dia 28 de Junho de 2018, por volta das nove horas e quarenta e cinco minutos, o IPMA registava 19 °C. O Termohigrometro, no exterior registava 20,9 °C e uma Humidade Relativa de 70,6%. Às dez horas e quinze minutos estes valores alteraram-se para 21,5 °C e HR de 68,6%. A Figura 34 mostra o ambiente exterior nessa manhã.



Figura 34 - Registo do exterior do Palácio Nacional de Sintra 28/06/2018

Nesta inspeção ir-se-á avaliar a estrutura de suporte do soalho da tribuna, por onde passam turistas todos os dias. Parte da estrutura está à vista, assim vai ser possível identificar defeitos da madeira, nós e fendas, e colocar em evidência sinais de ataque biológico. Considerar-se-á que as vigas são de casquinha pela sua cor e formato dos anéis.

No interior da capela, por baixo da tribuna às 10:50 regista-se uma temperatura de 21,1 °C e uma humidade relativa de 70,7%.

4.3.1 INSPEÇÃO VISUAL

Nesta primeira fase de inspeção, procedeu-se a um levantamento da estrutura em estudo: a medição de cada secção e o comprimento das vigas, bem como a distância a que se encontram. Verificaram-se os apoios e entregas, procuraram-se e localizaram-se os nós, fendas e outros defeitos que permitiram classificar visualmente as vigas. Em anexo encontra-se o levantamento dos defeitos encontrados nas vigas. A Figura 35, mostra as vigas de suporte do pavimento da tribuna, estas apoiam numa viga metálica com secção e I, sendo igual ou semelhante a um IPE200. Esta viga metálica, por sua vez, está apoiada na coluna central, do lado norte, e na parede de alvenaria a sul. O segundo apoio das vigas em estudo será na parede de alvenaria, não se tendo conseguido verificar o mesmo.



Figura 35 - Vigas da Tribuna

Numa primeira abordagem, procurou-se com a maceta algum som oco, podendo evidenciar a existência de madeira degradada. O que não aconteceu, a pancada revelou um som seco e vibrante. À primeira vista, a estrutura de madeira parece estar em bom estado de conservação, não havendo evidências da existência de ataques de origem biológica. Pensa-se que o tipo de madeira será a Casquinha. A distância entre eixos das vigas é de cerca de 45 centímetros, e as secções das vigas são as apresentadas na Tabela 20 - Levantamento geométrico das vigas da tribuna. A numeração das vigas foi feita da viga mais a Norte como a viga V1, sendo aquela de que se vê maior comprimento da face inferior, até à viga do lado do alçado Sul como a viga V7.

Tabela 20 - Levantamento geométrico das vigas da tribuna

Viga	Altura h (cm)	Largura b (cm)	Comprimento L (cm)	Área de Secção (m ²)
V1	13,00	19,50	531,50	253,50
V2	13,50	14,20	531,50	191,70
V3	13,50	15,50	531,50	209,25
V4	13,00	12,00	531,50	156,00
V5	14,00	15,00	531,50	210,00
V6	14,00	12,50	531,50	175,00
V7	14,00	12,50	531,50	175,00

O comprimento L referido, tem em conta uma entrega das vigas, na parede de alvenaria de 35 centímetros, não se conseguindo, porém, confirmar estes valores. Entre as vigas existentes, existem tarugos de secção regular com 14,50 centímetros de altura e 8,50 centímetros de largura. Estes encontram-se bem posicionados entre as vigas, sem qualquer desalinhamento entre si. O posicionamento dos tarugos tem a sua relevância, pois estes permitem impedir a encurvadura lateral das vigas e funcionam como meio de distribuição de cargas do conjunto do vigeamento face a ações concentradas sobre uma viga isolada. (Henriques & Appleton, 2018)

Nos cantos, e como se pode observar na Figura 36, a estrutura é travada com um elemento disposto na diagonal, que permite uma melhor ligação entre os elementos viga-tarugo, e melhora a segurança estrutural do pavimento. Estes aspetos revelam o enorme cuidado que se teve na altura da construção da tribuna.



Figura 36 - Pormenor do travamento com elemento na diagonal

Após a primeira visita para a inspeção visual, começou-se por decidir que informações se iriam retirar do levantamento com os meios auxiliares de diagnóstico. O material utilizado para esta inspeção, encontra-se na Figura 37. A fita métrica (6) utilizada para o levantamento geométrico, a trincha (4) e o formão (3) para limpeza da área em estudo e retirar material desagregado. As régua de escalas (5) servem para medir fendas e nós e a maceta (2) para deteção de alguns defeitos pelo som do bater desta nos elementos em estudo. Para fornecer dados mais concretos, e determinar depois a capacidade resistente da estrutura, temos o humidímetro de contacto (7) e de agulhas (8), o resistógrafo (1) também utilizado na inspeção dos elementos da parede, e o pylodin (9).



Figura 37 - Material utilizado na inspeção às vigas da tribuna

4.3.2 MEDIÇÕES COM OS MEIOS AUXILIARES DE DIAGNÓSTICO

Nesta inspeção, não se conseguiu ter acesso visual à totalidade do comprimento das vigas, apenas da viga V1 foi possível aceder a todo o seu comprimento, mas apenas pela face inferior. Para as restantes vigas só se conseguiu estudar a parte que estava à vista, cerca de 1,70 m do vão, desde o seu apoio na viga metálica até estar tapada com o revestimento em tábuas de madeira pregadas às vigas e pintadas de branco.

Começou-se por registar o teor em água de todas as vigas, retirando cinco valores de cada zona, na face inferior, e três valores da face voltada a Sul. Após este registo, fez-se medidas com o humidímetro de agulhas e com o Pylodin. Estes dois ensaios têm de ser pensados, pois causam um pequeno furo na estrutura, pelo que não devem ser feitos repetidamente no mesmo local.

Com os valores registados pelo Pylodin, e com base no estudo de Henriques (2011) conseguiu-se estimar também um valor de massa volúmica utilizando a expressão $y = -0,312x + 33,043$ em que y é o valor de penetração em milímetros e x é o valor que se obtém de massa volúmica.

Em ensaios correntes, em madeira nova para aplicar em construção, o ensaio com o Pylodin é feito com várias leituras por zona numa mesma peça de madeira, porém neste estudo optou-se por fazer apenas uma leitura.

Na viga V1 1 apenas se retiraram valores da face inferior, que estão representados Tabela 21. Os valores de teor em água à superfície não são altos, não havendo valores que indiquem risco de ataques por térmitas subterrâneas ou fungos de podridão. Porém, no seu interior o teor em água ultrapassa os 20%.

Tabela 21 - Teores em água dos ensaios com o Humidímetro e profundidade de penetração com o Pylodín na viga VI

Viga 1							
Zonas de medição	distancia à parede aproximadamente	1 m	1,5 m	2 m	2,5 m	3 m	3,5 m
Teor em água (%)	Higrómetro de Superfície	16,40	15,30	15,40	14,30	14,40	15,10
		13,30	16,60	16,00	14,90	14,00	14,90
		14,60	14,90	15,30	15,00	13,00	15,80
		16,30	14,80	15,80	14,20	14,40	15,60
		16,20	15,80	15,30	14,10	15,20	15,10
	Valor Médio TH	15,36	15,48	15,56	14,50	14,20	15,30
Penetração (mm)	Higrometro de Agulhas	20,40					22,00
	Pylodín	18			18		21
Média		19					
Massa volúmica estimada com ensaio do Pylodín (kg/m ³)		450					

De seguida, nas Tabela 22 e Tabela 23 apresentar-se-á os resultados para as restantes vigas, sendo que nestas retiraram-se valores da face inferior e da face virada a Sul. As zonas referidas, zona 1, 2 e 3 correspondem a aproximadamente a zona meeira entre tarugos.

Tabela 22 - Teores em água dos ensaios com o Humidímetro e profundidade de penetração com o Pylodín nas vigas V2, V3 e V4

		Viga 2			Viga 3			Viga 4		
		Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 1	Zona 2	Zona 3
Teor em água de superfície (%)	Face inferior	14,90	15,00	13,70	15,10	14,60	16,30	16,00	17,70	18,00
		14,60	13,60	14,00	14,60	15,00	14,30	15,90	18,10	17,40
		14,80	14,80	14,50	15,80	14,90	15,70	15,90	18,10	17,50
		15,00	14,40	13,80	15,70	14,20	15,80	15,60	18,30	17,90
		15,00	12,70	14,00	15,70	15,00	15,60	15,00	18,60	17,80
	Média	14,86	14,10	14,00	15,38	14,74	15,54	15,68	18,16	17,72
	Face Sul	13,30	14,20	14,00	14,60	14,80	15,20	15,80	16,20	15,50
		14,80	12,50	14,00	15,40	14,60	15,70	15,60	17,00	16,50
15,00		14,50	14,10	14,70	15,20	15,40	16,30	17,40	17,50	
Média	14,37	13,73	14,03	14,90	14,87	15,43	15,90	16,87	16,50	
Teor em água com higrómetro de agulhas (%)	1/4 do vão - face inferior									
Pylodín (mm)					23			17		
Massa volúmica estimada com ensaio do Pylodín (kg/m ³)					322			514		

Tabela 23 - Teores em água dos ensaios com o Humidímetro e profundidade de penetração com o Pylodín nas vigas V5, V6 e V7

		Viga 5			Viga 6			Viga 7		
		Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 1	Zona 2	Zona 3
Teor em água de superfície (%)	Face inferior	18,10	17,80	16,90	15,20	15,20	16,20	15,10	15,10	14,40
		18,80	17,60	17,60	15,40	15,20	16,30	14,90	14,00	14,70
		18,20	17,50	17,90	14,60	15,00	15,80	14,70	15,40	14,80
		17,90	17,00	18,00	14,30	15,80	16,40	14,70	15,20	15,00
		19,00	17,60	18,10	15,50	16,30	16,50	14,30	14,30	14,60
	Média	18,40	17,50	17,70	15,00	15,50	16,24	14,74	14,80	14,70
	Face Sul	18,30	18,20	16,70	16,30	15,80	15,70	14,00	14,80	14,20
		17,80	17,80	17,00	15,60	15,90	16,00	14,10	14,40	13,80
		19,50	17,70	17,00	16,20	15,30	15,70	14,70	14,70	13,60
	Média	18,53	17,90	16,90	16,03	15,67	15,80	14,27	14,63	13,87
Teor em água com higrómetro de agulhas (%)	1/4 do vão - face inferior	25,10			19,90					
Pylodín		16 mm			18 mm			13 mm		
Massa volúmica estimada com ensaio do Pylodín (kg/m ³)		418			354			514		

As vigas 5, 6 e 7, são as que têm um tom mais escurecido, são também onde se encontram mais defeitos visuais e onde se registaram maiores teores em água, porém o teste com Pylodín, mostra que a profundidade de penetração não tem grande variação entre as vigas, registando um menor valor na viga 7 e um maior valor na viga 3, isenta de defeitos visuais nas faces expostas.

De seguida passou-se à execução do ensaio com o resistógrafo, da mesma forma que descrito anteriormente. Pensou-se realizar duas medições na face inferior e duas na horizontal, porém este plano não avançou, pela dificuldade de colocar o resistografo na horizontal.

Ensaiou-se a viga 1, com duas medições em três zonas distintas, a primeira zona localizada a 1/4 do vão medindo-se a partir da parede que será um dos apoios da viga, a outra zona 1/4 do apoio na viga metálica, e a terceira zona a meio vão (Figura 38).



Figura 38 - Execução de ensaio com resistógrafo na viga VI

As restantes vigas ensaiadas foram as vigas, 4, 5, 6 e 7, pois são as que apresentam mais defeitos, têm um aspeto mais irregular e os teores de humidade também mais elevados. Apresentar-se-ão alguns dos resultados obtidos.

Viga 1

Gráfico 19 - Perfil Resistográfico R155

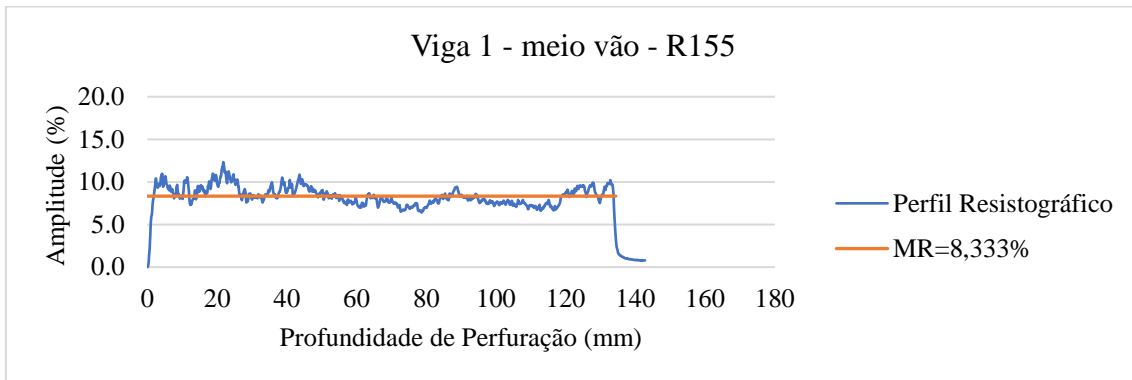
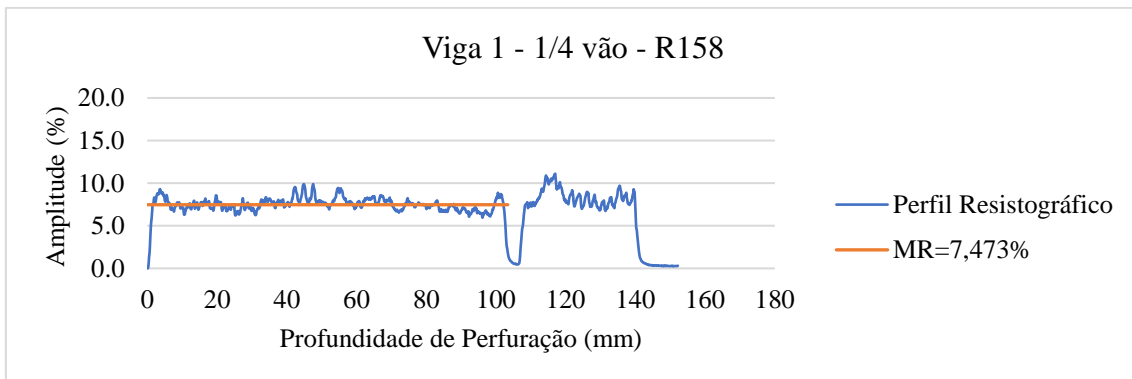


Gráfico 20 - Perfil resistográfico R158



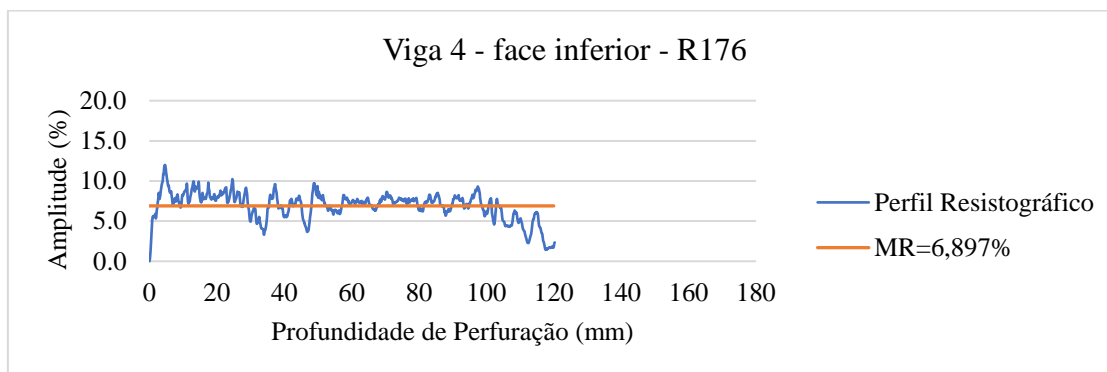
O Gráfico 19 mostra um dos perfis resistográficos retirados a meio vão que se apresenta uniforme ao longo da altura da viga. Já o Gráfico 20 apresenta uma faixa de perda de resistência, facto este que se deve à existência de uma fenda aqui localizada. Os valores das medidas resistográficas apresentam-se na Tabela 24.

Tabela 24 - Medidas Resistográficas da Viga VI

Viga VI						
Ensaio	R150	R153	R155	R157	R158	R159
Localização	1/4 vão fim		1/2 vão		1/4 vão inicio	
MR (%)	9.637	7.943	8.333	8.558	7.473	7.915
Massa volumica estimada (kg/m3)	504.07	444.64	458.32	466.21	428.14	443.65
Resistência à compressão estimada (N/mm2)	37.37	32.30	33.47	34.14	30.89	32.22
Média MR (%)	8.310					
Média da Massa volúmica (kg/m3)	457.506					
Média da Resistência à compressão (N/mm2)	33.398					

Viga 4

Gráfico 21 - Perfil Resistográfico R176



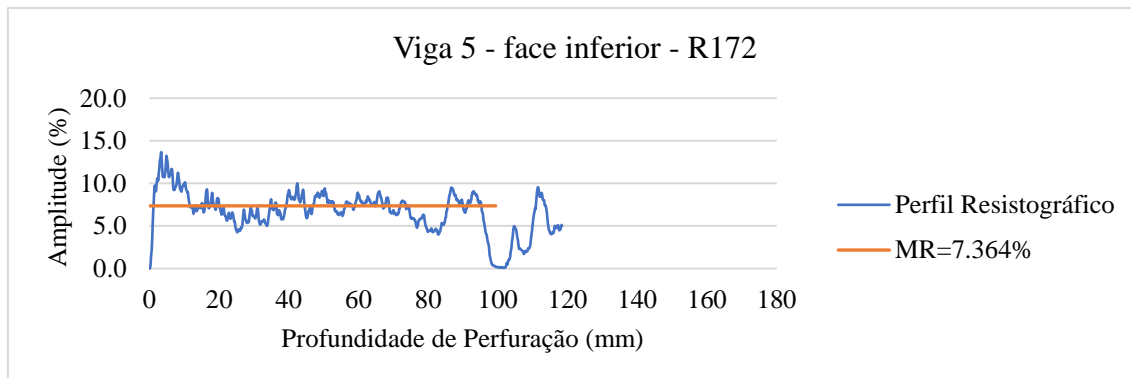
Na viga 4 registou-se uma resistência à penetração da agulha menor, e pouco uniforme. No Gráfico 21 observa-se a perda de resistência na face superior à qual não se tem acesso e que está voltada para o pavimento. Devido à continuidade da alternância de anéis, mas com menor resistência à perfuração, supõe-se que indica degradação por fungos de podridão, nos dois centímetros superiores da viga (Neves, Henriques, 2014), ou poderá indicar uma zona da madeira mais branda. Por conseguinte os valores das medidas resistográficas são menores, tal como apresentado na Tabela 25.

Tabela 25 - Medidas Resistográficas da viga V4

Viga V4		
Ensaio	R175	R176
Posição do Resistógrafo	Vertical	
MR (%)	7.005	6.689
Massa volumica estimada (kg/m3)	411.72	400.64
Resistência à compressão estimada (N/mm2)	29.49	28.54
Média MR (%)	6.847	
Média da Massa volúmica (kg/m3)	406.179	
Média da Resistência à compressão (N/mm2)	29.018	

Viga 5

Gráfico 22 - Perfil Resistográfico R172

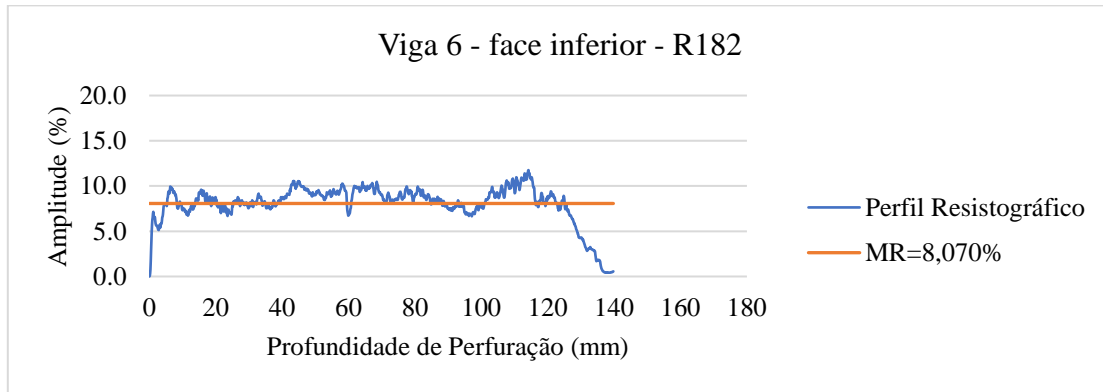


Também na viga 5, existem sinais de degradação no interior da secção, mais próximo da face à qual não se consegue ter acesso e que está em contacto com as tábuas de madeira que servem de apoio ao pavimento da tribuna.

O Gráfico 22 apresenta-se inconclusivo em relação à altura da viga, não se sabendo se o ensaio chega a perfurar as tábuas do revestimento. O tipo de perfil parece corresponder a degradação por caruncho grande, pois apresenta zonas profundamente degradadas, intercaladas com sãs, e que deve corresponder às galerias abertas por estas. Enquanto que na degradação por térmitas não existe madeira numa maior galeria, e o perfil vai a zero no eixo das ordenadas (Neves,; Henriques, 2014).

Viga V6

Gráfico 23 - Perfil Resistográfico R182



Na viga 6 não há registos de degradação significativa e os valores de resistência estão dentro dos valores encontrados nas restantes vigas quando não existe degradação, tal como se pode confirmar pela Tabela 26. O Gráfico 23 apresenta um perfil resistográfico na viga V6 onde este se apresenta uniforme.

Tabela 26 - Medidas Resistográficas da viga V6

Viga V6				
Ensaio	R180	R182	R178	R179
Posição do Resistógrafo	Vertical		Horizontal	
MR (%)	8,48	8,07	8,10	7,58
Massa volumica estimada (kg/m ³)	464	449	450	432
Resistência à compressão estimada (N/mm ²)	33,9	32,7	32,8	31,2
Média MR (%)	8,06			
Média da Massa volúmica (kg/m ³)	449			
Média da Resistência à compressão (N/mm ²)	32,64			

Viga 7

Gráfico 24 - Perfil Resistográfico R162

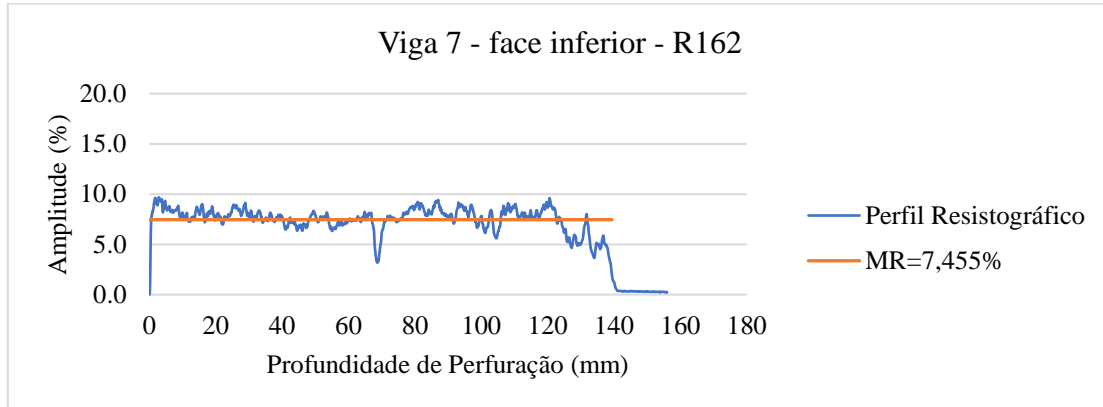
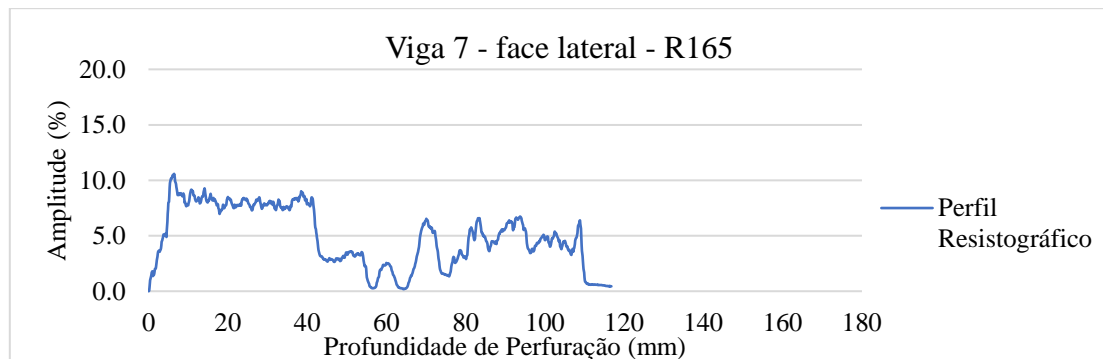


Gráfico 25 - Perfil Resistográfico R165



Na viga 7 encontrou-se alguma degradação, no Gráfico 24 encontra-se o ensaio feito na vertical e que apenas encontrou uma pequena fissura. Já no Gráfico 25 é um ensaio realizado na horizontal a uma altura de onze centímetros e encontrou-se uma degradação profunda no interior da viga devido, provavelmente, a caruncho grande.

Tabela 27 - Medidas resistográficas da viga V7

Viga V7				
Ensaio	R162	R163	R164	R165
Posição do Resistógrafo	Vertical		Horizontal	
MR (%)	7,46	5,09	7,02	5,08
Massa volumica estimada (kg/m ³)	428	345	412	344
Resistência à compressão estimada (N/mm ²)	30,8	23,8	29,5	23,7
Média MR (%)	6,16			
Média da Massa volúmica (kg/m ³)	382			
Média da Resistência à compressão (N/mm ²)	27,0			

4.3.3 CONCLUSÃO

Como conclusão deste levantamento, pode-se afirmar que as vigas se encontram em bom estado de conservação, sendo apenas registada degradação ou heterogeneidade junto à face superior nas vigas V4, V5 e V7.

Na viga V1 conseguiu-se acesso à face inferior da viga, em toda a sua extensão, o que permitiu a elaboração de vários ensaios nesta face e em diversas zonas. Porém apenas em parte de uma das faces laterais se conseguiu ter acesso visual e poder daí analisar defeitos.

Nas restantes vigas apenas se conseguiu observar parte das faces inferior e laterais, o que revela ser uma condicionante para um estudo mais detalhado.

As vigas V2 e V3 apresentam poucos defeitos visuais e aparentam estar em bom estado, por isso não se executou nenhum perfil resistográfico nestas duas vigas.

Na viga V4 foram elaborados dois ensaios na vertical, não tendo sido possível efetuar os mesmos na horizontal. A mesma apresentava poucos defeitos e numa análise visual aparentava estar em boas condições.

As vigas V5, V6 e V7 eram as que, visualmente, apresentavam mais defeitos e um aspeto um pouco degradado, porém, os ensaios com o resistógrafo na viga V6 revelou que esta não tem degradação na secção estudada. Já as vigas V5 e V7 apresentam degradação no seu interior devido a caruncho grande.

No anexo B do presente trabalho podem-se encontrar todos os perfis resistográficos realizados.

5. CLASSIFICAÇÃO VISUAL

Após o trabalho de inspeção, dever-se à proceder à classificação visual das peças de madeira. A necessidade de classificar a madeira prende-se com o facto de conseguir atribuir uma classe de resistência de forma a poder calcular a capacidade resistente de uma peça estrutural.

Em Portugal a norma em vigor para a classificação visual é a NP 4305:1995 (Madeira serrada de pinho bravo para estruturas – Classificação Visual) que rege orientações para o fazer. Esta classificação, mencionada no capítulo 3 do presente trabalho, baseia-se na identificação, quantificação e limitação de defeitos da peça. A norma aplica-se a Pinho Bravo (*Pinus Pinaster*, Ait), novo, a única espécie em Portugal sujeita a normalização e definição de classes de qualidade. Por este motivo ir-se-á fazer a classificação com base nesta norma, como exercício de sensibilização, mesmo sendo a espécie em questão a Casquinha. O objetivo é classificar a qualidade da madeira como EE (madeira especial para estruturas), E (madeira para estruturas) ou Sem Classificação, e deste modo estabelecer uma relação com as classes de resistência mecânica. Esta classificação deve cumprir o disposto na Tabela 28. De acordo com a NP 338:2003 e a NP 1912:2004 estas classes correspondem a uma classe de resistência mecânica C18 para a classe de qualidade E e C35 para Classe EE. O sistema de Classes de Resistência está apresentado na EN 338:2003 que divide a classificação para madeiras Resinosas e Folhosas. Esta norma apresenta valores de propriedades resistentes, propriedades elásticas e massa volúmica.

A NP EN 1912:2004 (Madeira para estruturas) estabelece uma relação entre as classes de qualidade, atribuídas pelas normas de classificação visual de cada país, com as classes de resistência. Esta norma classifica o Pinho bravo como C18, classificada como classe de qualidade E. Sabendo que a NP 4305:1995 é aplicada a madeira nova e que é bastante conservativa, esperando-se encontrar classificações visuais E, e conseqüentemente uma classe de resistência C18, ir-se-á recorrer à norma britânica BS 4978:2007 (Visual strength grading of softwood – Specification) como exercício académico. Esta norma é semelhante à portuguesa e classifica uma peça de madeira resinosa em GS (General Structural Grade) e SS (Special Structural). Esta norma considera a casquinha, que é a espécie em estudo, e por isso iremos recorrer a esta para classificar as vigas da tribuna. A NP 1912:2004 define a classe de resistência C24 para classe de qualidade SS e C16 para GS.

De seguida será apresentada a classificação visual baseada nas medições elaborados no local aquando da inspeção visual. Esta análise será apenas elaborada para a estrutura do pavimento da tribuna, pois apenas aqui se conseguiu aceder à estrutura. A estrutura da cobertura não foi possível observar pelo que apenas se poderá fazer conclusões quanto ao seu estado de degradação. Contudo, na estrutura de suporte do pavimento da tribuna também não é possível visualizar todas as faces de todas as vigas, deste modo a classificação visual fica condicionada para certos parâmetros.

Ambas as normas foram estabelecidas para madeira nova, comercializada tendo como fim a sua aplicação em estruturas. Não é, assim, para aplicar em madeira antiga, em serviço há várias centenas de anos como é o caso em estudo. Para madeira em serviço a sua aplicação e análise será simplificada.

5.1 CLASSIFICAÇÃO VISUAL SEGUNDO A NORMA PORTUGUESA NP 4305:1995

Apesar de a madeira da estrutura ser em casquinha e não ser nova, decidiu-se atribuir-se classe à madeira pela via da norma portuguesa, por ser a única em Portugal e como exercício de aproximação.

Como referido anteriormente, a NP 4305:1995 classifica a madeira para Estruturas, E, ou para Especial de Estruturas, EE para madeira de Pinho Bravo. De acordo com a avaliação dos defeitos descritos no capítulo 3, pode-se classificar uma peça de madeira seguindo as condicionantes dadas pela Tabela 28.

Tabela 28 - Classificação Visual (LNEC, 1997b)

Características e defeitos da madeira		Classes de qualidade	
		Classe EE	Classe E
Nós	KAR marginal	< 1/5	< 1/2
	KAR total	< 1/5	> 1/2 < 1/3
Fio		< 1/10	< 1/6
Taxa de crescimento		< 6 mm	< 10 mm
Fendas	não repassadas	Fendas superficiais com $l_f < 300$ mm podem ser ignoradas	
		$l_f < 1/4 l$ e $l_f < 600$ mm	$l_f < 1/4$ e $l_f < 900$ mm
	repassadas	Não mais do que uma fenda com o comprimento máximo, por cada metro	
		Permitidas só nos topos: $l_f < 600$ mm e $l_f < 1,0x_a$	Permitidas só nos topos: $l_f < 1,5x_a$
Descaio		< 1/4b ; < 1/4a no comprimento total	< 1/3b ; < 1/3a no comprimento total
		< 1/3b ; < 1/3a ao longo de 300 mm (se cada topo tiver 3 ou 4 arestas vivas)	< 1/2b ; < 1/2a ao longo de 300 mm (se cada topo tiver 3 ou 4 arestas vivas)
Empenos	em arco de face (em 2 m)	Se $b = 35$ mm $\rightarrow X < 30$ mm ; Se $b > 75$ mm $\rightarrow X < 10$ mm (interpolador para valores de espessura intermédios)	
	em arco de canto (em 2 m)	Se $a = 60$ mm $\rightarrow Y < 10$ mm ; Se $a > 250$ mm $\rightarrow Y < 5$ mm (interpolador para valores de largura intermédios)	
	em hélice (em 2 m)	$Z < 1,5$ mm por cada 25 mm de largura da peça	
	em meia-cana	$X_s < 1$ mm por cada 25 mm de largura da peça	
Bolsas de resina e casca inclusa	não repassadas	Sem limites caso sejam mais curtas que a largura da peça Se tal não se verificar aplicam-se os limites das fendas	
	repassadas	Sem limites caso o seu comprimento seja < 1/2 da largura da peça Se tal não se verificar aplicam-se os limites das fendas	
Medula		Não admitida	Admitida

Nós

Para a classificação dos nós seguiu-se o especificado na norma e o que está referido no capítulo 3. A ter em conta que nesta inspeção não se consegue ter acesso a todas as faces nas vigas nem aos topos, o que não permite verificar onde está a medula, esta foi atribuída conforme a inclinação das fibras. Nos casos em que não é possível prever a localização da medula, esta foi considerada no centro da secção, por simplificação. Os desenhos dos nós e respetiva localização encontram-se nos anexos. De seguida será apresentada na Tabela 29 a atribuição da classe de qualidade tendo em conta os nós nas vigas, o cálculo das áreas de nós e as áreas marginais, bem como a relação de KAR Marginal e KAR Total, anteriormente referido como determinar. Segundo a norma uma peça pode ser classificada como Classe EE caso o KAR marginal e KAR total sejam ambos menores que 1/5. Para ser classificada como Classe E, o valor de KAR marginal e o KAR total devem ambos estar compreendidos entre 1/5 e 1/2. Pode ser aceite um KAR marginal superior a 1/2, desde que o KAR total seja inferior a 1/3. Caso contrário a madeira será considerada Sem Classificação.

Das vigas estudadas, obteve-se resultados bastante positivos, apenas a viga 7 apresenta classe de qualidade E.

Tabela 29 - Cálculos para o parâmetro Nós segundo a NP 4305:1995

Nós											
Elemento	Secção	Base b (cm)	Altura h (cm)	Área da Secção (cm ²)	Área de nós (cm ²)	Área marginal de nós (cm ²)	KAR Marginal	KAR Total	Classe c/ KAR Marginal	Classe c/ KAR Total	Classe da Viga
V1	1	19,30	13,00	250,90	7,869	0,901	0,004	0,031	Classe EE	Classe EE	Classe EE
	2				9,537	4,739	0,019	0,038	Classe EE	Classe EE	
	3				4,674	2,488	0,010	0,019	Classe EE	Classe EE	
V2	1	14,20	13,00	184,60	2,477	1,432	0,008	0,013	Classe EE	Classe EE	Classe EE
	2				1,767	0,995	0,005	0,010	Classe EE	Classe EE	
	3				6,925	2,938	0,016	0,038	Classe EE	Classe EE	
	4				3,545	0,000	0,000	0,019	Classe EE	Classe EE	
V3	1	15,50	13,50	209,25	6,630	4,672	0,022	0,032	Classe EE	Classe EE	Classe EE
V4	1	12,00	13,00	156,00	7,059	2,871	0,018	0,045	Classe EE	Classe EE	Classe EE
	2				7,748	2,438	0,016	0,050	Classe EE	Classe EE	
	3				5,863	0,045	0,000	0,038	Classe EE	Classe EE	
	4				1,499	0,000	0,000	0,010	Classe EE	Classe EE	
	5				11,457	2,339	0,015	0,073	Classe EE	Classe EE	
V5	1	15,00	14,00	210,00	40,551	16,254	0,077	0,193	Classe EE	Classe EE	Classe EE
	2				24,940	6,517	0,031	0,119	Classe EE	Classe EE	
	3				9,746	2,363	0,011	0,046	Classe EE	Classe EE	
	4				17,710	13,283	0,063	0,084	Classe EE	Classe EE	
V6	1	12,50	14,00	175,00	3,1063	0	0	0,018	Classe EE	Classe EE	Classe EE
	2				3,0355	0	0	0,017	Classe EE	Classe EE	
V7	1	12,50	14,00	175,00	42,299	22,596	0,129	0,242	Classe EE	Classe E	Classe E
	2				15,379	10,813	0,062	0,088	Classe EE	Classe EE	
	3				30,405	6,761	0,039	0,174	Classe EE	Classe EE	

Inclinação do Fio

A medição da inclinação do fio foi efetuada consoante a norma, medindo um segmento AC e BC. A norma define que para se considerar de Classe EE, a relação BC/AC deve ser menor que 1/10, e caso esteja compreendida entre 1/10 e 1/6 já é classificada como Classe E. Quaisquer valores acima de 1/6, a peça é considerada sem classificação. A Tabela 30 abaixo indica os cálculos efetuados e a classe atribuída a cada viga.

Tabela 30 - Cálculos para a inclinação do fio segundo a NP4305:1995

Inclinação do Fio				
Elemento	Seguemento AC (cm)	Seguemento BC (cm)	Inclinação do fio	Classe
V1	20.00	1.31	0.07	Classe EE
V2	25.00	2.76	0.11	Classe E
V3	30.00	0.80	0.03	Classe EE
V4	25.00	0.89	0.04	Classe EE
V5	25.00	0.51	0.02	Classe EE
V6	25.00	0.42	0.02	Classe EE
V7	20.00	0.43	0.02	Classe EE

Taxa de Crescimento

Como não se consegue aceder aos topos das vigas não foi possível determinar a taxa de crescimento. Deste modo não entrará em consideração para a determinação da classe de qualidade.

Fendas

A medição das fendas foi feita *in situ* utilizando as régua de escalas e a fita métrica. A avaliação deste parâmetro é feita tendo em conta o comprimento das fendas (L_f), e se estas são ou não repassadas. Foi também medida a abertura da fenda (A_b) com o comparador de fendas e a sua profundidade (P_f).

Para fendas não repassadas pode-se ignorar fendas inferiores a 30 centímetros. Para a classificação de qualidade EE o comprimento da fenda deve ser inferior a 1/4 do comprimento total da viga e ao mesmo tempo inferior a 30 centímetros, para a Classe E o comprimento da fenda deve ser também inferior a 1/4 do comprimento da viga mas também inferior a 90 centímetros, fora destes parâmetros não tem classificação admissível na norma.

Em anexo encontra-se também a localização das fendas. Este parâmetro, relativamente aos parâmetros anteriores, foi o que registou maior quantidade de vigas de classe E e sem classificação, como se pode observar na Tabela 31, ficando as vigas 2 e 7 classificadas como Classe E e as vigas 1, 4 e 6 sem classificação

Tabela 31 - Cálculos para o parâmetro fenda segundo a NP4305:1995

Fendas									
Elemento	Fenda	Lf (cm)	Pf (cm)	Ab (cm)	L (cm)	Repassada?	1/4L (cm)	Classe da Secção	Classe da Viga
V1	F1	221,50	2,00	0,80	531,50	Não	132,88	Sem Classificação	Sem Classificação
	F2	60,00	1,00	0,20	531,50	Não	132,88	Classe E	
V2	F1	77,50	1,50	1,00	531,50	Não	132,88	Classe E	Classe E
	F2	85,97	0,50	0,50	531,50	Não	132,88	Classe E	
V3	F1	38,06	0,40	0,20	531,50	Não	132,88	Classe EE	Classe EE
V4	F1	31,35	1,00	0,12	531,50	Não	132,88	Classe EE	Sem Classificação
	F2	96,52	0,20	0,40	531,50	Não	132,88	Sem Classificação	
V5	F1	57,95	1,00	0,50	531,50	Não	132,88	Classe EE	Classe EE
V6	F1	97,00	1,50	0,50	531,50	Não	132,88	Sem Classificação	Sem Classificação
	F2	44,05	0,10	0,09	531,50	Não	132,88	Classe EE	
	F3	44,02	0,50	0,10	531,50	Não	132,88	Classe EE	
	F4	44,00	1,50	0,30	531,50	Não	132,88	Classe EE	
	F5	176,50	1,00	0,30	531,50	Não	132,88	Sem Classificação	
V7	F1	69,41	1,00	0,30	531,50	Não	132,88	Classe E	Classe E
	F2	93,37	1,50	0,50	531,50	Não	132,88	Classe E	
	F3	96,50	0,50	0,30	531,50	Não	132,88	Sem Classificação	

Descaio

Este defeito visual apenas foi encontrado na viga 1 e 3. Como dito anteriormente este valor é obtido pela relação de comprimento em falta (para se completar um retângulo perfeito) pelo comprimento total, distinguido face e canto. Compreende-se por “canto” as faces laterais da peça,

e por “face” as faces inferiores e superiores. A classificação de qualidade da peça deve ter em conta se o descaio se verifica ao longo da peça ou se ocorre ao longo de 30 centímetros (caso cada topo tiver 3 ou 4 arestas vivas). Caso seja em todo o comprimento da peça para ser classificada uma Classe EE a relação descaio deve ser menor que 1/4 da base ou da altura, dependendo se é descaio de canto ou de face. Para a Classe E a relação deve ser menor que 1/3 da base ou altura. Caso o descaio ocorra ao longo de 30 centímetros, a Classe EE dá-se caso a relação do descaio seja menor que 1/3 da base ou da altura, e a Classe E caso seja menor que 1/2 da base ou altura.

A Tabela 32 apresenta os cálculos feitos para a atribuição da classe para as vigas 1 e 3, com base no que foi explicado.

Tabela 32 - Cálculos para o parâmetro Descaio segundo a NP4304:1995

Elemento	Base b (cm)	Altura a (cm)	V1 (cm)	K1 (cm)	Descaio de face	Descaio de Canto	Localização	1/4a	1/4b	Classe
V1	19,30	13,00	3,00	2,50	0,23	0,13	Ao longo da peça	4,83	3,25	Classe EE
V3	15,50	13,50	3,00	3,00	0,22	0,19	Ao longo da peça	3,88	3,38	Classe EE

Empenos

Não se verificou ocorrência de qualquer empeno em nenhuma das vigas.

Bolsas de Resina e Casca Inclusa

Não foi detetada qualquer bolsa de resina, nem casca inclusa nas vigas em estudo.

Medula

Admitiu-se a existência de medula em todas as vigas, embora esta situação não se possa confirmar.

Degradação Biológica

A nível superficial as vigas parecem estar em bom estado, não existindo degradação biológica aparente. A exceção são as vigas 4, 5, 6 e 7 que apresentam uma cor mais escurecida. Nos ensaios realizados com o resistógrafo encontrou-se diminuição de resistência no interior destas vigas, em especial nas vigas 5 e 7.

A NP 4305:1995 refere que deverão ser excluídas peças que apresentem ataque por fungos de podridão ou ataques de insetos, pelo que se vai considerar como “Sem Classificação” as vigas 5 e 7.

Classificação Final

Qualquer trabalho *in situ* tem muitas condicionantes, como referido anteriormente, não se consegue aceder a todas as faces dos elementos em estudo, e há sempre erros associados à medição de operador para operador. A NP 4305:1995 tem também uma utilização limitada para a avaliação de elementos em serviço, a existência de degradação biológica leva à não classificação desses elementos.

A Tabela 33 fornece um resumo da classificação efetuada aos vários elementos. Quando um dos elementos foi classificado como Classe E, nem que seja apenas num parâmetro essa é considerada como Classe E. As vigas 1, 4, 5 e 7 ficaram sem classificação devido à presença de fendas e de degradação biológica.

Tabela 33 - Atribuição de Classe de Qualidade às vigas em estudo segundo a NP4305:1995

Elemento	Nós	Fio	Taxa de Crescimento	Fendas	Descaio	Empenos	Bolsas de Resina e Casca Inclusa	Medula	Classe Final	
V1	Classe EE	Classe EE	Não considerado	Sem Classificação	Classe EE	Não Existente	Não Existente	Não Considerado	Sem Classificação	
V2	Classe EE	Classe E		Classe E	-				Classe E	
V3	Classe EE	Classe EE		Classe EE	Classe EE				Classe EE	
V4	Classe EE	Classe EE		Sem Classificação	-				-	Sem Classificação
V5	Classe EE	Classe EE		Classe EE	-				-	Classe EE
V6	Classe EE	Classe EE		Sem Classificação	-				-	Sem Classificação
V7	Classe E	Classe EE		Sem Classificação	-				-	Sem Classificação

De um modo geral a estrutura não está em mau estado. No entanto, seguindo os parâmetros da NP 1405, apenas foi atribuída a classe EE – Especial para Estruturas – a duas das sete vigas existentes, e como classe E – para Estruturas – apenas numa das vigas, as restantes estão sem classificação.

5.2 CLASSIFICAÇÃO VISUAL SEGUNDO A NORMA BRITÂNICA BS 4978:2007

A norma britânica BS 4978:2007 (Visual strength grading of softwood – Specification) tem parâmetros de classificação muito semelhantes à NP 4305:1995, como dito anteriormente, esta classifica as peças de madeira por GS – General Structural (Estruturas Gerais/Correntes) e SS – Special Structural (Especial para Estruturas) para madeiras resinosas, abrangendo a espécie em causa, *Pinus Sylvestris*, ou Casquinha.

A

Tabela 34 é uma tradução da tabela existente na BS 4978:2007 e que refere os limites para classificação das peças de madeira. A cláusula 5 referida na parte da degradação biológica refere que degradação por fungos de azulamento não é considerado um defeito estrutural e deve ser aceite sem limitações.

De seguida serão apresentados os cálculos justificativos da atribuição de classe.

Tabela 34 - Limites para a classificação visual segundo a BS 4978:2007

Limites permissíveis para Classificação Visual GS e SS			
Características		Classe	
		GS	SS
Nós		Se KAR Marginal é menor ou igual a 1/2, então KAR Total deve ser menor ou igual a 1/2 OU KAR Marginal é menor que 1/2 e KAR Total deve ser menor ou igual a 1/3	Se KAR Marginal é menor ou igual a 1/2, então KAR Total deve ser menor ou igual a 1/3 OU KAR Marginal é menor que 1/2 então KAR Total deve ser menor ou igual a 1/5
Inclinação do Fio		Não superior a 1/6	Não superior a 1/5
Taxa de Crescimento		Largura média dos anéis anuais não superiores a 10mm	Largura média dos anéis anuais não superior a 6mm
Fendas	Não Repassadas	Não superior a 1,5m ou 1/2 do comprimento total da peça (o menor dos dois); Contudo, fissuras com profundidade inferior a metade da espessura podem ser ignoradas	Não superior a 1,0 m ou 1/4 do comprimento total da peça (o menor dos dois)
	Repassadas	Não superior a 1,0m ou 1/4 do comprimento da peça (o menor valor). Se nos topos, o comprimento da fenda não deve ser superior a duas vezes a largura da peça.	Só permitido nos topos um comprimento não superior à largura da peça.
Descaio		O descaio não deve reduzir a dimensão total para menos de 2/3 da dimensão da peça. O comprimento do descaio é ilimitado	
Empenos	Arco de face	Não superior a 20mm num comprimento de 2,0m	Não superior a 10mm num comprimento de 2,0m
	Arco de Canto	Não superior a 12mm num comprimento de 2,0m	Não superior a 8mm num comprimento de 2,0m
	Hélice	Não superior a 2mm por 25mm de largura, num comprimento de 2,0m	Não superior a 1mm por 25mm de largura, num comprimento de 2,0m
	Meia Cana	Ilimitado	Ilimitado
Bolsas de Resina e Casca Inclusa	Não Repassadas	Ilimitado, se menor que a espessura da peça, de outra forma aplica-se os mesmos limites para as fissuras	
	Repassadas	Ilimitado, se menor que metade da espessura da peça, de outra forma aplica-se os mesmos limites para as fissuras	
Degradação Biológica		Permitido desde que esteja em conformidade com os requisitos da Cláusula 5. Nenhuma infestação ativa é permitida. Buracos de insetos xilófagos não são permitidos.	

Nós

Os limites de classificação do parâmetro dos nós, para a classe SS são muito semelhantes à da NP 4305, e por isso os resultados também foram semelhantes, tal como apresentado na Tabela 35 Apresentando na viga 7 uma secção com classe GS e as restantes SS.

Tabela 35 - Cálculos para o parâmetro nós segundo a BS 4978:2007

Nós											
Elemento	Secção	Base b (cm)	Altura h (cm)	Área da Secção (cm ²)	Área de nós (cm ²)	Área marginal de nós (cm ²)	KAR Marginal	KAR Total	Classe c/ KAR Marginal	Classe c/ KAR Total	Classe da Viga
V1	1	19,30	13,00	250,90	7,869	0,901	0,004	0,031	SS	SS	SS
	2				9,537	4,739	0,019	0,038	SS	SS	
	3				4,674	2,488	0,010	0,019	SS	SS	
V2	1	14,20	13,00	184,60	2,477	1,432	0,008	0,013	SS	SS	SS
	2				1,767	0,995	0,005	0,010	SS	SS	
	3				6,925	2,938	0,016	0,038	SS	SS	
	4				3,545	0,000	0,000	0,019	SS	SS	
V3	1	15,50	13,50	209,25	6,630	4,672	0,022	0,032	SS	SS	SS
V4	1	12,00	13,00	156,00	7,059	2,871	0,018	0,045	SS	SS	SS
	2				7,748	2,438	0,016	0,050	SS	SS	
	3				5,863	0,045	0,000	0,038	SS	SS	
	4				1,499	0,000	0,000	0,010	SS	SS	
	5				11,457	2,339	0,015	0,073	SS	SS	
V5	1	15,00	14,00	210,00	40,551	16,254	0,077	0,193	SS	SS	SS
	2				24,940	6,517	0,031	0,119	SS	SS	
	3				9,746	2,363	0,011	0,046	SS	SS	
	4				17,710	13,283	0,063	0,084	SS	SS	
V6	1	12,50	14,00	175,00	3,1063	0	0	0,018	SS	SS	SS
	2				3,0355	0	0	0,017	SS	SS	
V7	1	12,50	14,00	175,00	42,299	22,596	0,129	0,242	SS	GS	GS
	2				15,379	10,813	0,062	0,088	SS	SS	
	3				30,405	6,761	0,039	0,174	SS	SS	

Inclinação do Fio

Na avaliação do parâmetro da inclinação do fio, este é menos conservativo que a norma referida e determina que uma inclinação de fio menor que 1/5 seja classificada como SS. Assim, de acordo com a norma britânica todas as vigas em análise são classificadas como Special Structural de acordo com a Tabela 36.

Tabela 36 - Cálculos para o parâmetro inclinação do fio segundo a BS 4978:2007

Inclinação do Fio				
Elemento	Segmento AC (cm)	Segmento BC (cm)	Inclinação do fio	Classe
V1	20,00	1,31	0,07	SS
V2	25,00	2,76	0,11	SS
V3	30,00	0,80	0,03	SS
V4	25,00	0,89	0,04	SS
V5	25,00	0,51	0,02	SS
V6	25,00	0,42	0,02	SS
V7	20,00	0,43	0,02	SS

Fendas

Para a avaliação da existência de fendas, esta norma também distingue se estas são ou não repassadas. No caso das vigas em estudo nenhuma fenda mostrou ser repassada. Para classificar a viga como SS as fendas devem ter um comprimento menor que 100 centímetros, ou menor que 1/4 do comprimento total. Para classificar como GS o comprimento total das vigas deve ser menor que 150 centímetros ou menor que 1/2 do comprimento total das fendas. No caso desta norma

Trabalho Final de Mestrado

Mestrado em Engenharia Civil – Perfil Edificações

pode-se ignorar fendas com profundidade inferior a metade da abertura da fenda, e neste caso faz sentido a medição destes dois parâmetros.

Mais uma vez a norma britânica é menos conservativa, como mostra a Tabela 37, que a NP 4305:1995, deste modo todas as fendas são classificadas como SS.

Tabela 37 - Cálculos para o parâmetro fendas segundo a BS 4978:2007

Fendas										
Elemento	Fenda	Lf (cm)	Pf (cm)	Ab (cm)	L (cm)	Repassa da?	1/4L (cm)	1/2L (cm)	Classe da Secção	Classe da Viga
V1	F1	221,50	2,00	0,80	531,50	Não	132,88	265,75	Sem Classificação	Sem Classificação
	F2	60,00	1,00	0,20	531,50	Não	132,88	265,75	SS	
V2	F1	77,50	1,50	1,00	531,50	Não	132,88	265,75	SS	SS
	F2	85,97	0,50	0,50	531,50	Não	132,88	265,75	SS	
V3	F1	38,06	0,40	0,20	531,50	Não	132,88	265,75	SS	SS
V4	F1	31,35	1,00	0,12	531,50	Não	132,88	265,75	SS	SS
	F2	96,52	0,20	0,40	531,50	Não	132,88	265,75	SS	
V5	F1	57,95	1,00	0,50	531,50	Não	132,88	265,75	SS	SS
V6	F1	97,00	1,50	0,50	531,50	Não	132,88	265,75	SS	Sem Classificação
	F2	44,05	0,10	0,09	531,50	Não	132,88	265,75	SS	
	F3	44,02	0,50	0,10	531,50	Não	132,88	265,75	SS	
	F4	44,00	1,50	0,30	531,50	Não	132,88	265,75	SS	
	F5	176,50	1,00	0,30	531,50	Não	132,88	265,75	Sem Classificação	
V7	F1	69,41	1,00	0,30	531,50	Não	132,88	265,75	SS	SS
	F2	93,37	1,50	0,50	531,50	Não	132,88	265,75	SS	
	F3	96,50	0,50	0,30	531,50	Não	132,88	265,75	SS	

Descaio

Para a avaliação do descaio, a BS 4978 é onde existe uma maior diferença com a referida norma portuguesa. A limitação para a classificação das secções é que o descaio existente não deve reduzir em 2/3 a hipotética área total da dimensão da peça. A Tabela 38 apresenta os cálculos para a determinação da classificação do descaio para as vigas V1 e V3.

Tabela 38 - Cálculos para o parâmetro descaio segundo a BS 4978:2007

Elemento	Base b (cm)	Altura a (cm)	Área Total	Área real	2/3A _{total}	Classe
V1	19,30	13,00	250,90	250,00	167,27	SS
V3	15,50	13,50	209,25	205,00	139,50	SS

Degradação Biológica

Ao contrário da NP 4305, a norma britânica contabiliza a existência de degradação biológica. Caso exista azulamento por fungos cromogéneos esta degradação pode ser ignorada para a classificação visual. Porém caso existam evidências de degradação ativa ou furos de insetos xilófagos, a norma não aceita a peça para classificação visual, deste modo ficam sem classificação.

Como foi dito anteriormente só foram encontradas evidências de degradação nas vigas V5 e V7, pelo que estas ficam sem classificação e as restantes com SS.

Classificação Final

Como resumo desta classificação visual apresenta-se a Tabela 39:

Tabela 39 - Classificação final das vigas segundo a BS 4978:2007

Elemento	Nós	Fio	Taxa de Crescimento	Fendas	Descaio	Empenos	Bolsas de Resina e Casca Inclusa	Degradação Biológica	Classe Final	
V1	SS	SS	Não considerado	Sem Classificação	SS	Não Existente	Não Existente	SS	Sem Classificação	
V2	SS	SS		SS	-			SS	SS	
V3	SS	SS		SS	SS			SS	SS	
V4	SS	SS		SS	-			SS	SS	
V5	SS	SS		SS	-			SS	Sem Classificação	Sem Classificação
V6	SS	SS		Sem Classificação	-			SS	SS	Sem Classificação
V7	GS	SS		SS	-			SS	Sem Classificação	Sem Classificação

Tal como anteriormente não foi considerada a taxa de crescimento, por não ter sido possível aceder aos topos das peças. Empenos, Bolsas de Resina e Casca Inclusa não foram encontrados. A três das sete vigas em estudo estão classificadas como SS (Special Structural), à exceção da viga V5 e V7 pela existência de degradação biológica e das vigas V1 e V6 devido à presença de várias fendas.

5.3 CONCLUSÃO

A norma britânica BS 4978:2007 é, como se pôde observar, menos conservativa do que a NP 4305:1995 e por isso conseguiu-se melhores resultados de classificação visual com a norma britânica. É também com esta norma que se fará a correspondência com as classes de resistência de forma a podermos ter valores característicos para a verificação estrutural. A NP 4305:1995 apenas tem correspondência de classe de qualidade E, segundo a NP EN 1912:2013 e serve apenas para madeira de pinho bravo. Já a norma britânica tem reconhecidas as duas classes de qualidade para madeiras resinosas.

Porém, estas normas têm como finalidade classificar madeira nova para comercialização, e são elaboradas em laboratório, pelo que a sua utilização deveria ser elaborada nos mesmos moldes, situação que não é possível quando se avalia madeira em serviço.

Segundo (Dias, Cruz, Machado, Custódio, & Palma, 2009) a aplicação de qualquer norma de classificação visual em elementos de madeira em serviço deve ter em conta que:

- Alguns defeitos considerados nas normas não afetam as propriedades mecânicas do elemento, mas são tomadas em linha de conta devido a poderem vir a afetar a sua colocação em obra (empenos) ou resultar numa perda de secção (descaio);
- Qualquer sinal de degradação biológica, que não azulamento, não é permitida pela norma. Nos elementos em serviço a degradação biológica é algo que deve ser aceite e deve-se quantificar a extensão dessa degradação e a possível deterioração da capacidade resistente do elemento estrutural;

- A aplicação rigorosa dos limites definidos nas normas relativamente às fendas irá implicar em geral, a decisão errónea de substituição de elementos de grandes secções. Este facto baseia-se no facto das normas de classificação serem elaboradas tendo por base elementos de secções bastante reduzidas ($50 \times 150 \text{ mm}^2$) comparativamente às secções que caracterizam em geral os elementos de madeira aplicados em estruturas antigas ($140 \times 160 \text{ mm}^2$ ou até mesmo $200 \times 220 \text{ mm}^2$).

Deste modo, e tendo em conta o que foi dito anteriormente, pode-se classificar a estrutura de madeira em serviço tendo apenas em consideração a existência de nós, a inclinação do fio e a taxa de crescimento. Como no caso em estudo não se teve acesso à taxa de crescimento apenas os dois

parâmetros anteriores serão considerados para a classificação visual, tanto para a NP 4305:2005 como para a BS 4978:2001, e com os mesmos limites definidos anteriormente.

A Tabela 40 apresenta, então a classificação das vigas segundo os parâmetros considerados para estruturas de madeira em serviço.

Tabela 40 - Classificação das vigas tendo em conta que se trata de uma estrutura em serviço segundo a NP 4302:2005 para Pinho bravo e a BS 4978:2007 para Casquinha

Elemento	Classe de qualidade segundo a NP 4302:2005				Classe de qualidade segundo a BS 4978:2007				
	Nós	Fio	Taxa de Crescimento	Classe Final	Nós	Fio	Taxa de Crescimento	Classe Final	
V1	Classe EE	Classe EE	Não considerado	Classe EE	Classe SS	Classe SS	Não considerado	Classe SS	
V2	Classe EE	Classe E		Classe E	Classe SS	Classe SS		Classe SS	Classe SS
V3	Classe EE	Classe EE		Classe EE	Classe SS	Classe SS		Classe SS	Classe SS
V4	Classe EE	Classe EE		Classe EE	Classe SS	Classe SS		Classe SS	Classe SS
V5	Classe EE	Classe EE		Classe EE	Classe SS	Classe SS		Classe SS	Classe SS
V6	Classe EE	Classe EE		Classe EE	Classe SS	Classe SS		Classe SS	Classe SS
V7	Classe E	Classe EE		Classe E	Classe GS	Classe SS		Classe SS	Classe GS

Deste modo conseguimos obter todas as vigas classificadas, sendo que pela norma portuguesa a viga V2 e V7 estão classificadas como para Estruturas e as restantes Especial para Estruturas. Como esta norma é para Pinho bravo, ir-se-á utilizar a norma britânica que, à exceção da viga V7, classifica todas as restantes vigas como Special Structural.

A aplicação de regras de classificação visual permite, depois definir as classes de qualidade dos elementos de madeira analisados e correspondentes classes de resistência.

A NP EN 1912:2013 lista as classes de qualidade e resistência, espécie e origens das madeiras e especifica, ainda, as classes de resistência da EN 338, nas quais estão incluídas.

Para a casquinha, espécie em estudo, a NP EN 1912:2013 confere classe de resistência C24 para a classe de qualidade SS, e C16 para a classe de qualidade GS.

Deste modo, a EN 338:2003 estabelece as classes de resistência da madeira para uso estrutural, dividindo essas classes para as resinosas e folhosas. A identificação das classes de resistência das madeiras resinosas começa com a letra C precedida do número que corresponde ao valor característico da resistência à flexão, existindo 12 classes de resistência, entre C14 e C50. Para as classes de resistência das folhosas existem 6 classes diferentes, e são identificadas pela letra D seguido, também, do número que corresponde ao valor característico da resistência à flexão, desde a D30 à D70.

Deste modo os valores apresentados na Tabela 41, são os valores característicos para a classe de resistência C24 e C16 a utilizar nos cálculos estruturais.

Tabela 41 - Valores característicos da Classe de Resistência C24 e C16 (EN 338:2003)

Valores característicos da Classe de Resistência		C24	C16
Propriedades de Resistência (N/mm²)			
valor característico da resistência à flexão	$f_{m,k}$	24	16
valor característico da resistência à tração na direção do fio	$f_{t,0,k}$	14	10
valor característico da resistência à tração perpendicular ao fio	$f_{t,90,k}$	0,5	0,5
valor característico da resistência à compressão na direção do fio	$f_{c,0,k}$	21	17
valor característico da resistência à compressão perpendicular ao fio	$f_{c,90,k}$	2,5	2,2
valor característico da resistência ao corte	$f_{v,k}$	2,5	1,8
Propriedades de Rigidez (kN/mm²)			
valor médio do módulo de elasticidade na direção do fio	$E_{0,mean}$	11	8
valor correspondente a 5% do módulo de elasticidade	$E_{0,05}$	7,4	5,4
Valor médio do módulo de elasticidade perpendicular ao fio	$E_{90,mean}$	0,37	0,27
valor médio do módulo de distorção	G_{mean}	0,69	0,5
Densidade	ρ_k	350	310
Densidade média	ρ_{mean}	420	370

6. VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA DAS VIGAS DA TRIBUNA

Após a classificação visual das vigas de casquinha da tribuna, obtendo uma classe de qualidade SS – Special Structural –, para as vigas V1, V2, V3, V4, V5 e V6 e GS – General Structural – para a viga V7, consegue-se fazer uma correspondência com as classes de resistência e assim obter parâmetros de resistência.

Como visto, no capítulo 3, para efetuar uma verificação à segurança, o Eurocódigo 5 prevê que se faça cálculos à flexão simples e ao corte para os Estados Limites Últimos e verificar a deformação para os Estados Limites de Utilização.

De forma a definir condições de serviço e ambientais é necessário atribuir uma classe de serviço. No caso em estudo foi atribuída classe de serviço 1, por se tratar de uma estrutura, situada no interior do edifício. Durante as inspeções registaram-se temperaturas interiores de 12,3 °C em Março e de 21,5 °C em Junho, tendo sido registados teores de humidade entre os 65 e os 85%.

É também importante definir a categoria de utilização, segundo o Eurocódigo 1, para se atribuir as sobrecargas a considerar no cálculo das combinações de ações. As vigas em estudo servem de suporte ao pavimento da tribuna da capela, local por onde circulam os visitantes para admirar a capela real do palácio. Deste modo estamos, sem dúvida na categoria C3. Para esta categoria o Eurocódigo 1 recomenda valores de sobrecarga entre 3,0 a 5,0 kN/m^2 . Decidiu-se, assim, utilizar uma sobrecarga de 3,50 kN/m^2 .

Para o cálculo do peso próprio das vigas recorreu-se aos ensaios elaborados pelo Resistógrafo e pelo Pylodyn para determinar a massa volúmica, conforme o estudo elaborado por Henriques, 2011. Os resultados obtidos foram os apresentados na Tabela 42.

Tabela 42 - Massa Volúmica das Vigas

Elemento	Massa volumica RM [kg/m3]	Massa Volumica Pilodyn [kg/m3]	Média MV [kg/m3]	Desvio Padrão MV	Massa Volúmica [kN/m3]
V1	458	450	454	3.70	4.45
V2			418		4.10
V3		322	322	0.00	3.16
V4	406	514	460	54.01	4.51
V5	433	418	425	7.31	4.17
V6	449	354	401	47.37	3.94
V7	382	514	448	66.06	4.39

Com os dois valores de massa volúmica obtidos pelos dois ensaios com meios auxiliares de diagnóstico diferentes, fez-se a média e o desvio padrão destes valores, para chegar a um valor de massa volúmica mais certo. Como não se efetuou nenhuma medição na viga V2, optou-se por utilizar o valor médio das massas volúmicas das outras vigas. Por fim, e para conseguir um valor nas unidades por norma mais utilizados, kN/m^2 , multiplicaram-se os valores da massa volúmica por 0,00981 kN.

Deste modo consegue-se então calcular o peso próprio das vigas, de acordo com a expressão (5). Para a determinação das sobrecargas determinou-se que estas seriam tábuas de madeira de casquinha dispostas sobre as vigas, em duas direções, fazendo uma altura total de 5 centímetros.

Por cima destas assentam ladrilhos hidráulicos. Recorrendo às Tabelas Técnicas, adotaram-se valores de massas volúmicas de $5,0 \text{ kN/m}^3$ e cinco centímetros de altura para as tábuas. Para o ladrilho hidráulico considerou-se uma massa volúmica de e de $0,9 \text{ kN/m}^2$, incluindo argamassa de assentamento, considerando-se um centímetro de altura.

6.1 VERIFICAÇÃO AOS ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS

Os cálculos de verificação aos estados limites últimos pressupõem o cálculo das combinações utilizando coeficientes parciais de segurança às ações permanentes e variáveis. O Eurocódigo 0 recomenda utilizar-se os valores de 1,35 como coeficiente parcial de segurança para as ações permanentes - γ_G - e 1,50 para o coeficiente parcial de segurança das ações variáveis - γ_Q .

O fator de modificação da resistência de um material k_{mod} que é um fator que varia em função da classe de serviço e da duração das cargas. Para a madeira maciça de classe de serviço 1, utilizar-se-á 0,6 para as ações permanentes e 0,8 para ações de média duração, que é o caso das sobrecargas.

Utilizou-se a expressão (35) para o cálculo das ações atuantes na estrutura:

$$Ed = \left(\frac{PP_{vigas} + PP_{tábuas} + PP_{revestimento}}{0,6} \right) \times 1,35 + \left(\frac{\text{Sobrecarga} \times \text{Largura de Influência}}{0,8} \right) \times 1,50 \quad (35)$$

Os resultados obtidos apresentam-se na Tabela 43.

Tabela 43 - Apresentação dos cálculos para as combinações

Elemento	Dados Geométricos					Massa Volúmica Estimada	Cargas Permanentes			Cargas Varáveis	Combinação de ações
	Base b (m)	Altura h (m)	Área da Seção (m ²)	Comprimento L (m)	Largura de Influência (m)	Massa Volúmica [kN/m ³]	PPvigas [kN/m]	PPtabuas [kN/m]	Pprevest [kN/m]	Sobrecarga [kN/m]	Ed [kN/m]
V1	0.19	0.13	0.03	5.32	0.47	4.45	0.11	0.12	0.43	1.66	4.59
V2	0.14	0.14	0.02	5.32	0.46	4.10	0.08	0.12	0.42	1.61	4.40
V3	0.16	0.14	0.02	5.32	0.48	3.16	0.07	0.12	0.43	1.68	4.53
V4	0.12	0.13	0.02	5.32	0.46	4.51	0.07	0.11	0.41	1.59	4.32
V5	0.15	0.14	0.02	5.32	0.40	4.17	0.09	0.10	0.36	1.41	3.88
V6	0.13	0.14	0.02	5.32	0.42	3.94	0.07	0.10	0.38	1.47	3.99
V7	0.13	0.14	0.02	5.32	0.42	4.39	0.08	0.11	0.38	1.47	4.03

Utilizaram-se as expressões descritas no capítulo 3, as equações (12) e para fazer a verificação à flexão e ao corte. O coeficiente parcial para as propriedades dos materiais γ_M utilizado foi de 1,3. As tabelas seguintes resumem os cálculos e resultados obtidos. A Tabela 44 apresenta a verificação à flexão simples e a Tabela 45 a verificação ao corte.

Tabela 44 - Cálculos da Verificação da Resistência à Flexão

Elemento	Msd [kN.m]	w [m ³]	$\sigma_{m,d}$ [kN/m ²]	$f_{m,d}$ [kN/m ²]	$\frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}}$	Verificação
V1	16.21	0.000544	29825.06	18461.54	1.62	Não Verifica
V2	15.53	0.000431	36000.79	18461.54	1.95	Não Verifica
V3	15.99	0.000471	33969.44	18461.54	1.84	Não Verifica
V4	12.21	0.000338	36119.34	18461.54	1.96	Não Verifica
V5	13.70	0.000490	27961.10	18461.54	1.51	Não Verifica
V6	14.08	0.000408	34474.35	18461.54	1.87	Não Verifica
V7	14.22	0.000408	34828.52	12307.69	2.83	Não Verifica

Tabela 45 - Cálculos da Verificação da resistência ao corte

Elemento	Vsd [kN]	A _v [m ²]	τ_d [kN/m ²]	$f_{v,d}$ [kN/m ²]	$\frac{\tau_d}{f_{v,d}}$	Verificação
V1	12.20	0.02	729.49	1153.85	0.63	Verifica
V2	11.69	0.01	914.41	1153.85	0.79	Verifica
V3	12.04	0.01	862.82	1153.85	0.75	Verifica
V4	11.48	0.01	1104.31	1153.85	0.96	Verifica
V5	10.31	0.01	736.51	1153.85	0.64	Verifica
V6	10.59	0.01	908.07	1153.85	0.79	Verifica
V7	10.70	0.01	917.40	830.77	1.10	Não Verifica

Com as escolhas feitas anteriormente, conclui-se que as vigas não verificam aos esforços de flexão, mas verificam a esforços ao corte, à exceção da Viga V7.

Sabendo que se está a elaborar uma verificação estrutural para madeira com muitos anos em serviço, é sabido que não se pode exigir que esta tenha o desempenho de uma estrutura nova, para a qual são concebidos os Eurocódigos. Assim, ir-se-á efetuar um cálculo para saber qual o número aconselhado de pessoas a estar ao mesmo tempo na tribuna, para que a estrutura verifique a segurança.

Admitindo, que o peso de cada pessoa é em média 80 kg e sabendo que a área do pavimento é de 35 m², obtemos um valor da sobrecarga uniformemente distribuída exercida por cada pessoa no pavimento, de 0,022 kN/m². Com várias iterações feitas aumentando o número de pessoas na tribuna, conclui-se que, para que todas as vigas verifiquem à flexão simples e ao corte, o número máximo aconselhado de pessoas a estar na tribuna ao mesmo tempo são 9 pessoas.

As tabelas seguintes mostram então os resultados obtidos para uma sobrecarga de 9 pessoas no local, em que a Tabela 46 apresenta a verificação à flexão simples e a Tabela 47 apresenta os resultados da verificação ao corte.

Tabela 46 - Cálculos da Verificação da Resistência à Flexão diminuindo a sobrecarga

Elemento	Ed [kN/m]	Msd [kN.m]	w [m ³]	$\sigma_{m,d}$ [kN/m ²]	$f_{m,d}$ [kN/m ²]	$\frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}}$	Verificação
V1	1,66	5,85	0,000544	10770.05	18461,54	0,58	Verifica
V2	1,54	5,46	0,000431	12648.21	18461,54	0,68	Verifica
V3	1,57	5,54	0,000471	11763.77	18461,54	0,64	Verifica
V4	1,51	4,26	0,000338	12602.02	18461,54	0,68	Verifica
V5	1,39	4,91	0,000490	10023.15	18461,54	0,54	Verifica
V6	1,40	4,93	0,000408	12079.76	18461,54	0,65	Verifica
V7	1,42	5,02	0,000408	12300.23	12307,69	1,00	Verifica

Tabela 47 - Cálculos da Verificação da resistência ao corte diminuindo a sobrecarga

Elemento	Ed [kN/m]	Vsd [kN]	Av [m ²]	τ_d [kN/m ²]	$f_{v,d}$ [kN/m ²]	$\frac{\tau_d}{f_{v,d}}$	Verificação
V1	1,66	4.41	0.02	263.43	1153,85	0,23	Verifica
V2	1,54	4.11	0.01	321.26	1153,85	0,28	Verifica
V3	1,57	4.17	0.01	298.80	1153,85	0,26	Verifica
V4	1,51	4.01	0.01	385.29	1153,85	0,33	Verifica
V5	1,39	3.70	0.01	264.02	1153,85	0,23	Verifica
V6	1,40	3.71	0.01	318.19	1153,85	0,28	Verifica
V7	1,42	3.78	0.01	323.99	830,77	0,39	Verifica

Se se olhar para os valores da relação entre as cargas atuantes e a resistência, pode-se concluir que a condicionante neste cálculo foi a viga V7, no cálculo de resistência à flexão simples, estando todos os outros valores ainda muito longe dos seus valores limite. Este resultado está relacionado com a classe de resistência atribuída pela classificação visual.

Admitindo então esta situação, e continuando as iterações até chegar a um número de pessoas mais plausível, chegou-se a um valor de 40 pessoas ao mesmo tempo na tribuna, e todas as vigas (com exceção da viga V7) verificam a segurança à flexão simples e ao corte. Este é um valor que na prática é pouco provável que ocorra e por isso estamos pela segurança.

Assim, recomenda-se que:

- a viga 7 seja reforçada estruturalmente;
- não seja ultrapassado o número de 40 pessoas em simultâneo no piso 1 da tribuna.

6.2 VERIFICAÇÃO AOS ESTADOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO

Da mesma forma que se efetuou para a verificação aos Estados Limites Últimos, aqui também é necessário elaborar os cálculos para a combinação de ações. Aqui efetuar-se-á uma verificação à deformação das vigas por fluência. Neste cálculo utiliza-se o coeficiente de fluência, k_{def} , que depende do material e da classe de serviço.

Esta verificação é feita, calculando a flecha final (w_{fin}) de cada viga e confirmar se se encontra dentro do limite de flecha admitida. Com as expressões definidas no subcapítulo 3.3.2.1, pode-se calcular a deformação final devido às cargas permanentes e a deformação final devido à sobrecarga e verificar se estas se encontram dentro dos limites definidos na Tabela 9 para vigas simplesmente apoiadas.

A Tabela 48 apresenta os resultados da verificação da deformação por fluência, considerando a sobrecarga definida pelo Eurocódigo 1, de $3,50 \text{ kN/m}^2$, e que o intervalo limite de deformação se encontra entre $L/150$ e $L/300$, tal como referido na Tabela 9.

Tabela 48 - Apresentação dos Cálculos para a Verificação à Deformação por Fluência

Elemento	Verificação à Deformação por Fluência						Verificação
	$I \text{ [m}^4\text{]}$	$w_{int,G} \text{ [m]}$	$w_{int,} \text{ [m]}$	$w_{fin,G} \text{ [m]}$	$w_{fin,Q} \text{ [m]}$	$w_{fin} \text{ [m]}$	
V1	3,53E-05	0,018	5,67E-09	0,028	8,05E-09	0,028	Verifica
V2	2,60E-05	0,022	3,93E-09	0,035	5,58E-09	0,035	Verifica
V3	3,18E-05	0,018	5,69E-09	0,029	8,07E-09	0,029	Verifica
V4	2,20E-05	0,026	3,17E-09	0,041	4,50E-09	0,041	Não Verifica
V5	3,43E-05	0,015	2,90E-09	0,024	4,12E-09	0,024	Verifica
V6	2,86E-05	0,018	2,93E-09	0,029	4,16E-09	0,029	Verifica
V7	2,86E-05	0,019	2,96E-09	0,030	4,21E-09	0,030	Verifica

Conclui-se que as vigas verificam a segurança à deformação por fluência, à exceção da viga V4. Recomenda-se, para este caso o reforço estrutural das fibras inferiores.

6.3 VERIFICAÇÃO AO FOGO

A verificação ao fogo centra-se na determinação de uma profundidade de carbonização de uma peça de madeira, conforme o tempo de exposição a um incêndio e verificar se a secção residual, resiste às ações atuantes.

Inicialmente é necessário determinar os valores de cálculo da resistência ao fogo. $f_{d,fi}$. Como já dito anteriormente, o fator de modificação ($k_{mod,fi}$) recomendado é de 1,0 e coeficiente de segurança da madeira sob fogo ($\gamma_{M,fi}$) recomendado é também de 1,0. Para o cálculo do quantilho inferior a 20% utilizei o fator $k_{fi} = 1,25$. Assim pode-se calcular de acordo com as equações (27) e (28) :o valor de cálculo da resistência à flexão, após fogo.

Após isto deve-se calcular a profundidade de carbonização, para um tempo de incêndio de 30 minutos. A taxa de carbonização adotada, que tem em conta o tipo de madeira, foi de 0,8, que é o recomendado para madeira maciça resinosa. O fator k_0 será igual a 1,0, pois o tempo de exposição ao fogo é maior que 20 minutos, e d_0 é, então, igual a 7 milímetros. Assim, a profundidade de carbonização efetiva, é calculada com a equação (33):

$$d_{ef} = 0,8 \times 30 + 1 \times 7 = 31 \text{ mm}$$

Que é a soma entre a camada carbonizada e a zona aquecida, que dá, então, 31 milímetros. Agora retira-se este valor nas dimensões das secções. Considerei apenas três faces expostas ao fogo, pois a face superior estar em contacto com as tábuas do pavimento. Assim, a área da secção residual foi calculada de acordo com a expressão (36):

$$A_{\text{secção residual}} = (b - 2 \times d_{ef}) \times (a - d_{ef}) \quad (36)$$

Após ter as áreas da secção residual, faz-se os cálculos para os Estados Limites Últimos considerados, a flexão simples e o corte como anteriormente. A Tabela 49 mostra os cálculos elaborados para todas as vigas, da verificação da resistência à flexão simples com a secção reduzida.

Tabela 49 - Apresentação dos cálculos para a verificação da resistência à flexão simples após incêndio

Elemento	Base b (m)	Altura h (m)	Área de Secção residual [m²]	PP vigas [kN/m]	Ed [kN/m]	f m,d,fi [kN/m²]	Msd [kN.m]	w [m³]	$\sigma_{m,d}$	Verificação
V1	0,131	0,099	0,013	0,010	1,427	30000,0	5,040	0,0002140	14132,37	Verifica
V2	0,080	0,104	0,008	0,000	1,366	30000,0	4,825	0,0001442	20075,07	Verifica
V3	0,093	0,104	0,010	0,000	1,418	30000,0	5,008	0,0001676	17924,07	Verifica
V4	0,058	0,099	0,006	0,331	2,092	30000,0	7,387	0,0000947	46784,45	Não Verifica
V5	0,088	0,109	0,010	0,084	1,382	30000,0	4,879	0,0001743	16800,26	Verifica
V6	0,063	0,109	0,007	0,325	1,972	30000,0	6,965	0,0001248	33498,52	Não Verifica
V7	0,063	0,109	0,007	0,454	2,269	20000,0	8,011	0,0001248	38529,74	Não Verifica

Conclui-se que, após um incêndio de 30 minutos e nas mesmas condições de cálculo para a verificação à flexão simples, (com uma sobrecarga considerando nove pessoas na tribuna ao mesmo tempo), apenas as vigas V1, V2, V3 e V5 continuam a desempenhar a sua função de resistência à flexão simples. A viga V4 apresenta um valor de tensão atuante bastante mais elevada que as restantes, facto esse que se pode dever há já reduzida secção que esta viga tem.

Para este cálculo não é plausível reduzir mais a sobrecarga para que todas as vigas verifiquem a segurança ao fogo e por isso ir-se-á assumir estes valores de não verificação.

O mesmo cálculo deve ser feito para verificar a resistência ao corte. Deste modo calculou-se o valor de cálculo da resistência ao corte de acordo com a equação (37).

$$f_{v,d,fi} = \gamma_M \times \frac{k_{fi} \times f_{v,k}}{k_{mod,fi}} \quad (37)$$

A Tabela 50 apresenta os resultados para a verificação ao corte da estrutura, após fogo, nas mesmas condições referidas anteriormente. Neste caso todas as vigas estão em segurança.

Tabela 50 - Apresentação dos cálculos para a verificação da resistência ao corte após incêndio

Elemento	Vsd [kN]	Av [m ²]	Td	f _{v,d,ki} [kN/m ²]	Verificação
V1	3,793	0,009	438,728	3125,000	Verifica
V2	3,631	0,006	654,690	3125,000	Verifica
V3	3,769	0,006	584,542	3125,000	Verifica
V4	5,560	0,004	1452,386	3125,000	Verifica
V5	3,672	0,006	574,233	3125,000	Verifica
V6	5,242	0,005	1144,979	3125,000	Verifica
V7	6,029	0,005	1316,946	2250,000	Verifica

6.4 CONCLUSÃO

Tal como na classificação visual elaborada no capítulo anterior, também para uma verificação de segurança estrutural é preciso ter em conta que as normas existentes estão definidas para madeira a aplicar em construção nova, tendo coeficientes de segurança e limites de verificação mais rígidos. Este facto levou a um desvio na consideração dos valores de sobrecarga a aplicar, não se seguindo o preconizado no Eurocódigo 1.

Segundo este, as vigas existentes não verificam a segurança a esforços de flexão simples. Porém procurou-se determinar um valor mínimo de sobrecarga (que no caso é o peso dos visitantes ao mesmo tempo, presentes na tribuna) que todas as vigas conseguem suportar, tendo chegado a nove pessoas ao mesmo tempo.

A viga V7 limita este valor de pessoas aconselhado, por estar classificada com uma classe de resistência menor. Assumindo esta não conformidade e aumentando o número de pessoas na tribuna, chegou-se a 40 pessoas com as restantes vigas a suportar esta sobrecarga. Recomenda-se o reforço ou substituição da viga V7, já que esta também apresentou indícios de degradação por caruncho grande, durante a inspeção.

Por outro lado, no presente trabalho não foram considerados os efeitos de segunda ordem que os tarugos conferem na deformação por fluência e na resistência à flexão, pelo que, as conclusões obtidas são conservativas.

Já no cálculo de segurança da estrutura após um incêndio, pode-se constatar que as vigas V4, V6 e V7 não verificam a segurança à flexão simples, considerando a sobrecarga de apenas nove pessoas. Este facto pode dever-se à área da secção destas vigas, pois são menores, em especial a viga V4. Recomenda-se aqui também o reforço desta viga V4, já que, também nela foi encontrada degradação na sua face superior e também da viga V6.

Todos estes resultados devem ter em consideração que foram elaborados utilizando coeficientes de segurança muito conservativos, podendo estes resultados estarem muito pelo lado da segurança.

7. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho, foi uma excelente experiência de aprendizagem e de colocação em prática do que se aprendeu, colocando à vista as dificuldades de uma inspeção em edifícios antigos e que a falta de um planeamento detalhado condiciona à *posteriori* o tratamento de dados e a consequente retirada de conclusões.

Numa primeira fase do estudo, conseguiu-se conhecer a madeira e suas propriedades como material de construção e como este é classificado, assim como estudar as causas de degradação da madeira em serviço. O estudo feito sobre técnicas e metodologias de inspeção a um edifício antigo, foi também muito útil para reconhecer a importância de um planeamento aquando de uma inspeção e para conhecer técnicas não destrutivas ou semi-destrutivas para recolher mais informações sobre os elementos em estudo.

Este estudo foi realizado em dois locais diferentes da capela e com objetivos distintos. O primeiro foi o estudo no revestimento e cobertura da capela, onde se procurou reconhecer degradação por agentes biológicos e onde a utilização do resistógrafo foi determinante para encontrar a localização dos montantes e comprovar a existência de degradação. Neste local foi encontrada a entrada de água pela cobertura, facto que muito possivelmente levou ao surgimento de fungos. É também evidente o ataque por térmitas. A acumulação de lixo, detritos e poeiras por de trás do revestimento de madeira da cobertura leva também à degradação dos montantes. Os teores em água medidos à superfície não são elevados, existindo alguns valores mais elevados na medição com higrómetro de agulhas, porém, não ultrapassando os 20%. Na análise com o resistógrafo encontrou-se alguns montantes com degradação por térmitas subterrâneas, nomeadamente nos montantes 6 e 7 no painel Sul, e no montante 4 e 9 do painel Norte.

Para uma intervenção em maior detalhe e precisão, recomenda-se a remoção dos painéis de revestimento, para limpeza do espaço entre este e a parede de alvenaria, já que esta apresenta muita acumulação de poeiras. Deverá ser aplicada na estrutura um produto biocida como tratamento curativo e procurar a consolidação dos montantes degradados no painel Sul, por exemplo, com a utilização de resinas epóxi. Nenhum destes tratamentos será eficaz sem antes resolver o problema da entrada de água pela cobertura, rever o sistema de drenagem de águas pluviais e procurar soluções de impermeabilização de zonas sensíveis, como encontros com chaminés ou paredes mais elevadas, garantindo uma boa ventilação do espaço.

Este estudo, teve como principal condicionante o acesso à estrutura da cobertura, e por isso ficou-se condicionado com os ensaios pelo revestimento. O facto de se estar a estudar uma estrutura em serviço, e sendo esta um património histórico e cultural, está-se também condicionado ao número e tipo de ensaios, não sendo possível determinar com exatidão onde haverá mais degradação e que tipo de degradação é. Não esquecendo, porém, que este estudo tem apenas carácter académico, num estudo real talvez fosse possível considerar uma outra abordagem e conseguir outros tipos de acesso. Assim seria exequível mais estudos e ensaios, não só *in situ* mas também a remoção de amostras para ensaios em laboratório.

O segundo local estudado, foram as vigas de suporte ao pavimento da tribuna, às quais se teve acesso pelo piso inferior da capela, tendo sido retirado parte das tábuas de revestimento destas. Aqui, foi elaborado um levantamento geométrico detalhado e foram identificados todos os defeitos visuais para posterior classificação de qualidade de acordo com as normas portuguesas e britânicas de classificação visual. Como se teve acesso a toda a viga V1, nesta conseguiu-se fazer mais ensaios, porém a face superior, desta e das restantes vigas, estava inacessível por estarem com o revestimento do pavimento sobre elas. Foi também possível recorrer a meios auxiliares de

diagnóstico para ensaiar *in situ* os elementos em estudo e daí retirar valores úteis para a posterior verificação estrutural. Utilizou-se o resistógrafo para detetar alguma degradação ou profundidade das fendas existentes, e o pylodin para verificar a dureza do material. Com estes dois ensaios foi possível correlacionar os dados obtidos com a massa volúmica dos elementos, graças ao estudo de Henriques (2011). Com os ensaios elaborados com o resistógrafo encontrou-se alguma degradação no interior das vigas V4, V5 e V7. A viga V1 apresenta uma grande fissura, porém esta desenvolve-se num plano quase horizontal e que solicitada à flexão, esta acaba por fechar e não ter grande impacto negativo na sua perda de resistência à flexão simples.

De um modo geral reconhece-se que houve grande cuidado na escolha de materiais para a construção da capela real, não só pela escolha do tipo de madeira, mas pela forma como esta é cortada, colocando na estrutura vigas praticamente sem nós, sem descaio, e, pela forma que apresenta o fio e as fissuras, parecem todas conter medula. Não se sabe ao certo a data desta estrutura, mas se é a original deve ter mais de 600 anos e não apresenta grandes vestígios de degradação biológica.

As medidas resistográficas resultantes dos ensaios dos montantes da cobertura, apresentam valores mais elevados do que nas vigas do pavimento da cobertura, ou seja, os montantes têm maior resistência à penetração que as vigas da tribuna e por conseguinte, maior massa volúmica. Daqui pode-se hipotisar que na altura da construção se daria primazia a materiais de melhor qualidade para a construção de estruturas de cobertura do que a estruturas que ficariam no interior.

O restante trabalho elaborado incidiu apenas nas vigas da tribuna. Depois da inspeção o com o levantamento e localização de todos os defeitos da madeira, passou-se a uma classificação visual que se revela de extrema importância para a caracterização de elementos em serviço. Utilizou-se a norma portuguesa NP 4305:1995 (Madeira serrada de pinho bravo para estruturas – Classificação Visual) como exercício de sensibilização, porém, esta norma foi elaborada para avaliar elementos de madeira de Pinho bravo. Após esta classificação, resolveu-se aplicar a norma britânica BS 4978:2007 (Visual strength grading of softwood – Specification) que é também bastante completa, analisando vários parâmetros (nós, inclinação do fio, taxa de crescimento, fendas, descaio, empenos, bolsas de resina e casca inclusa e a degradação biológica). Esta norma foi elaborada para madeiras resinosas, onde a Casquinha se inclui e revelou-se menos conservativa.

Estas duas normas são aplicadas a madeira para construção nova, não sendo aceitável a sua utilização em madeira em serviço. Deste modo decidiu-se adaptar esta classificação, tal como é referido em (Dias, Cruz, Machado, Custódio, & Palma, 2009) e avaliar apenas os parâmetros, “nós”, “inclinação do fio” e “taxa de crescimento”. Assim obtiveram-se todas as vigas com uma classificação SS (Special Structural), à exceção da viga V7 que ficou classificada como GS (General Structural)

Este tipo de avaliação revela-se um pouco subjetivo, pois depende muito dos conhecimentos e experiência do técnico que faz o levantamento e que depois analisa os dados recolhidos. A análise elaborada a este nível revela-se insuficiente, pois não se consegue observar todas as partes dos elementos em estudo e por isso não se pode fazer avaliar alguns parâmetros, como foi o caso da taxa de crescimento.

Foi também possível estabelecer uma relação entre a classe de qualidade atribuída e as classes de resistência, de acordo com a norma NP EN 1912:2013 (Madeira para estruturas – Classe de resistência: Atribuição de classes de qualidade e espécies) que detalha as classes de qualidade e resistência, espécie e origens das madeiras e especifica ainda as classes de resistência da BS EN 338:2003 (Structural timber – Strength classes). Chegamos à conclusão que a classe de resistência é a C24 e C16 para a viga V7. Daí pôde-se consultar os valores característicos da madeira que serviram para os cálculos estruturais.

Este trabalho não ficaria completo sem uma verificação estrutural às vigas da tribuna. Depois de conhecer a classe de resistência e de determinar a massa volúmica pelos ensaios realizados, seguiu o Eurocódigo 5, dedicado às estruturas de madeira, e com o apoio dos Eurocódigos 0 e 1 realizaram-se cálculos de verificação estrutural. Fez-se a verificação aos Estados Limites Últimos e aos Estados Limites de Utilização.

Para os Estados Limites Últimos fez-se a verificação da resistência das vigas à flexão e ao corte. Com as hipóteses definidas para os cálculos, utilizou-se uma sobrecarga de $3,5 \text{ kN/m}^2$ que está dentro dos limites definidos pelo Eurocódigo 1 para a categoria de utilização C3. Porém, com esta sobrecarga, as vigas não resistem à flexão simples. Assim, pensou-se em determinar um número de pessoas mínimo aconselhável a estar ao mesmo tempo na tribuna, tendo-se chegado a nove pessoas. Porém, e sabendo que os Eurocódigos são elaborados para estruturas novas e por isso estão sobredimensionados, e sendo a limitação a viga V7, admitiu-se esta não verificação, continuando a aumentar o número de pessoas como sobrecarga, tendo chegado ao valor de 40 pessoas, e a segurança à flexão simples a verificar-se. Recomenda-se aqui o reforço ou substituição da viga V7, já que aliada à não verificação da segurança à flexão simples, esta revelou a existência de degradação por caruncho grande e um grande número de defeitos visuais, levando à sua classificação de resistência C16.

Para os Estados Limites de Utilização, verificou-se a deformação por fluência, calculando a deformação final e concluiu-se que todas as vigas têm a deformação dentro dos limites admissíveis.

Foi ainda possível fazer uma verificação de resistência ao fogo, também definido pelo Eurocódigo 5 parte 1 – 2 (General rules – Structural Fire Design), determinando a profundidade de madeira carbonizada das vigas expostas ao fogo, por um tempo que se definiu, para este trabalho, de 30 minutos. Após reduzir a secção, retirando a profundidade calculada à secção inicial, fez-se a verificação à flexão simples e ao corte, como anteriormente, aplicando fatores de correlação próprios. Neste cálculo concluiu-se que as vigas V4, V6 e V7, após estarem expostas a um fogo durante trinta minutos, não resistem à flexão simples, pois estas são as vigas que apresentam menor área de secção. Recomenda-se o seu reforço com aumento de secção ou a aplicação de um produto ignífugo.

Em todas as verificações, a viga V4 é a que apresenta valores de segurança mais reduzidos, este facto pode dever-se, entre outros fatores, aos menores valores da secção, nomeadamente a sua altura. Seria recomendável o reforço das vigas V4, V6 e V7. Recomenda-se também a limitação a 40 do número de visitantes na tribuna ao mesmo tempo.

Apesar dos resultados serem positivos, mesmo não cumprindo o Eurocódigo 1 na sobrecarga utilizada, deve-se contabilizar o efeito que a existência de tarugos tem na estrutura, uma vez que, funcionam como travamento, permitem reduzir a encurvadura lateral das vigas e funcionam como meio de distribuição de cargas do conjunto do vigamento face a ações concentradas sobre uma viga isolada.

Apesar de se ter atingido os objetivos propostos, este estudo teve algumas limitações que condicionaram uma perfeita e rigorosa análise, dos quais se destacam:

- A in experiência no manuseamento dos meios auxiliares de diagnóstico que podem ter levado a erros de leitura, ou más medições. O facto do resistógrafo ser demasiado pesado dificultou na execução de medições corretas;
- A inacessibilidade aos elementos estruturais, como no caso da estrutura da cobertura, bem como nas vigas da tribuna, onde não se conseguiu observar o comprimento total das vigas (à exceção da viga V1);
- O facto de não ter feito um planeamento dos ensaios a realizar e onde, levou a que no momento da inspeção não realizasse medições na viga V2 com o Pylodin e Resistógrafo,

e por isso teve de se realizar uma média com os valores das outras vigas. Na viga V3 não se realizou nenhum ensaio com o Resistógrafo;

- Por se tratar de um edifício histórico, os ensaios a realizar devem ter em conta que se deve preservar sempre o existente, fazendo as inspeções de forma a fazer o mínimo de danos na estrutura, por isso o número de ensaios foi limitado.

7.2 ESTUDOS FUTUROS

Após a realização deste trabalho, foram encontradas algumas dificuldades devido à falta de estudos existentes em Portugal, deste modo penso que poderão ser trabalhos com interesse de desenvolvimento os seguintes;

- A realização de uma norma de classificação visual para elementos de madeira em serviço, em edifícios antigos, para aplicação *in situ*;
- Aplicação da NP 4305:1995 a peças de madeira novas e a peças de madeira de edifícios antigos, de modo a poder estabelecer uma correlação mais aproximada do real;
- Realizar estudos de correlação entre os ensaios com meios de diagnóstico, como o resistógrafo e o pylodin, com valores de massa volúmica (tal como o estudo de Henriques, (2011)), mas aplicado a outras madeiras utilizadas nas construções portuguesas;
- Desenvolver um guia prático que auxilie na realização de inspeções, detalhando que medições realizar, que ensaios são os mais adequados e a quantidade de ensaios.

LISTA DE REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcaparra, M. C.; Martins, A. O.; Esteves, A. (2017). *Parques e monumentos de sintra - Parks and monuments of sintra* (5ª edição). Parques de Sintra - Monte da Lua. Sintra.
- Almeida, T. L. de. (1980). *Palácio Nacional de Sintra*. Gráfica Sintrense. Sintra.
- Arriaga, F. et. al. (2002). *Intervencion en Estructuras de Madera*. AITIM.
- Bertolini, M. da S., Almeida, D. H. de, Macedo, L. B. de, Icimoto, F. H., Ferro, F. S., Christoforo, A. L., & Lahr, F. A. R. (2014). Emprego de resina epóxi em vigas danificadas de madeira de Pinus elliottii. *Ambiente Construído*, 14(3), 121–129.
- Branco, J., Santos, A., & Cruz, P. (2008). Asnas Tradicionais de Madeira : Comportamento e Reforço com Materiais Compósitos. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, 3(d), 5–18.
- Calderoni, C., De Matteis, G., Giubileo, C., & Mazzolani, F. M. (2010). Experimental correlations between destructive and non-destructive tests on ancient timber elements. *Engineering Structures*, 32(2), 442–448.
- Carvalho, A. de. (1996). *Madeiras portuguesas: estrutura anatómica, propriedades, utilizações. Vol I: ELO, Publicidade e Artes Gráficas, Lda*. Lisboa.
- Carvalho, A. de. (1997). *Madeiras portuguesas: estrutura anatómica, propriedades, utilizações. Vol II: L. SCARPA*. Lisboa.
- Castro, A. de. (2005). *Descrição do Palácio Real na Vila de Sintra, que ali têm os Senhores de Portugal; Memória Histórica Sobre a Origem da Fundação do Real Mosteiro de N.A S.A da Pena; Investigação ao Castelo, Situado na Serra de Sintra - Reimpressão* (Original): Câmara Municipal de Sintra. Sintra
- Coleman, G. R. (2003). Conheça os Fungos da Podridão da Madeira (Traduzido, pp. 1–10). IST. Lisboa
- Correia, A. M. (1993). *Palácio Nacional de Sintra*. Mafra: ELO - Publicidade e Artes Gráficas. Mafra
- Cruz, H.; Nunes, L. (2005). *Madeira. Materiais de construção - Guia de utilização*. Lisboa: Núcleo de Estruturas de Madeira, Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa
- Cruz, H. (2011). Inspeção, Avaliação e Conservação de Estruturas de Madeira. *1ªs Jornadas de Materiais Na Construção*, 215–227.
- Cruz, H. et. al. (2000). *Estruturas de Madeira Reabilitação e Inovação*. Lisboa: GECORPA. <https://doi.org/156334>
- Dias, A., Cruz, H., Machado, J. S., Custódio, J. E. P., & Palma, P. M. C. (2009). *Avaliação, Conservação e Reforço de Estruturas de Madeira* (1ª Edição). Verlag Dashofer, Edições Pessoais, Unip., Lda. Lisboa.
- Feio, Artur O.; Machado, José S.; Cunha, V. (2011). Reforço de Estruturas de Madeira por Recurso a Elementos de Betão Armado e Metálicos. In *CIMAD 11 - 1º Congresso Ibero-Latino da Madeira na Construção* (pp. 7–9). Coimbra.
- Franco, M. (1987). *O Palácio Nacional de Sintra - Residência Querida de D. João I e D. Filipa de Lencastre*. Palácio Nacional de Sintra : The British Historical Society of Portugal : Loyds Bank plc. Sintra
- Gazzola, P. et al. (1964). Carta de Veneza - Sobre a conservação e restauro dos monumentos e dos sítios. Veneza.
- Henriques, D. F. (2011). *Tratamento e Consolidação de Madeira de Pinho degradada em elementos estruturais de Edifícios Antigos*. Tede de Doutoramento. Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa
- Henriques, D. F.; Appleton, V. (2018). Reabilitar madeira estrutural de edifícios antigos. In *3º Congresso Luso-Brasileiro Materiais de Construção Sustentáveis*. Coimbra.
- Henriques, D., Nunes, L., Machado, J., & Brito, J. de. (2011). Timber in buildings : Estimation of some properties using Pilodyn ® and Resistograph ® Timber in buildings : Estimation of some properties using Pilodyn ® and Resistograph ®. In *International Conference on Durability of Building Materials and Components* (pp. 1–8). Porto. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1363.5603>
- Henriques, M. D. (2018). Madeira em Edifícios Antigos: Conservar, Reforçar ou Substituir? In *Conferência Internacional sobre Reabilitação de Estruturas Antigas de Alvenaria - CIRea2018* (p. 12). Lisboa.
- LNEC. (1997a). *Madeira para Construção - MC1 - Especificação de madeiras para estruturas*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- LNEC. (1997b). *Madeira para Construção - MC2 - Pinho Bravo para Estruturas*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- LNEC. (1997c). *Madeira para Construção - MC9 - Humidade da Madeira*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Lourenço, P. B., & Branco, J. M. (2014). *Coberturas tradicionais de madeira. Caracterização, inspeção e classificação*. ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães

- Mannucci, M. (2001). Diagnosi dello stato di conservazione di strutture di legno massiccio e lamellare. *Legno DOC*, 8.
- Martins, J. (2008). *Tectos Portugueses Do Sec. XV ao Sec. XIX*. Instituto Superior Técnico. Lisboa
- NCREP. (2013). Case Study - Ataques de Agentes Biológicos em Estruturas de Madeira. *Construir*, 31–34.
- Neves, André; Henriques, D. F. (2014). *AVALIAÇÃO LOCAL DA CAPACIDADE MECÂNICA DE ELEMENTOS DE MADEIRA*. Lisboa.
- Nunes, L.; Valente, A. (2007). Degradação da madeira aplicada na construção: a acção dos fungos. *Construção Magazine Nº 20*. LNEC. Lisboa.
- Nunes, L. (2013). Bases para a monitorização do risco de degradação na construção de casas de madeira (pp. 29–38). FCT - MONITOR. Lisboa.
- Raposo, P. C., Andrade, M., Correia, J., Salavessa, M. E., Reis, C., Oliveira, C., & de Jesus, A. (2017). Non-Destructive Structural Wood Diagnosis of a Medieval Building. *Procedia Structural Integrity*, 5, 1147–1152.
- Resumo Introdução Hstórica Capela Palatina. (s.d.).
- Sabugosa, C. de. (1903). *O Paço de Cintra*. Imprensa Nacional.
- Schober, K. U., Harte, A. M., Kliger, R., Jockwer, R., Xu, Q., & Chen, J. F. (2015). FRP reinforcement of timber structures. *Construction and Building Materials*, 97, 106–118.
- Silva, J. C. V. (2002). *O Palácio Nacional de Sintra*. SCALA. Londres.

WEBGRAFIA

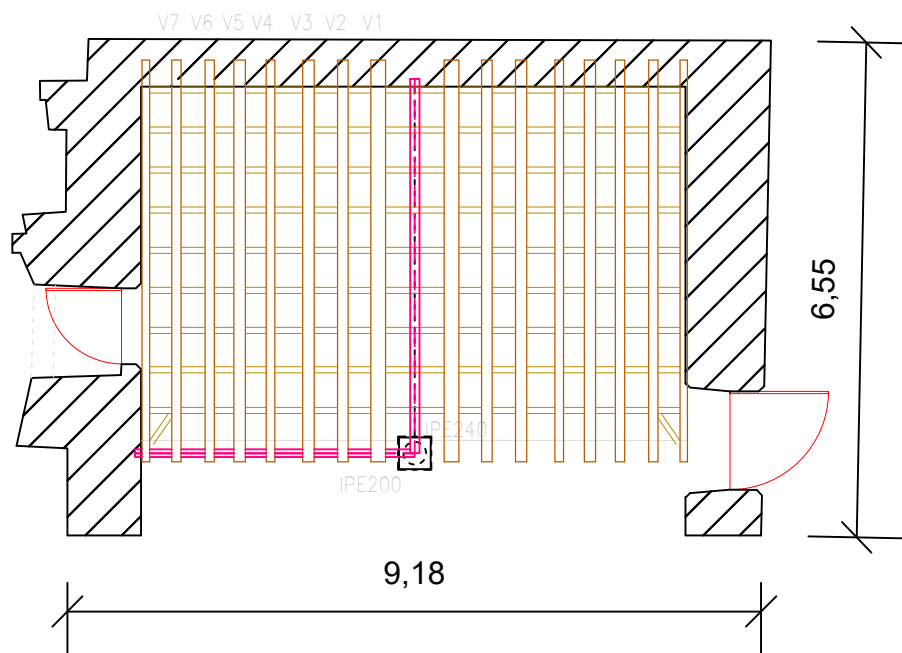
- Cruz, M. (2018). Monumentos e parques de Sintra receberam mais de três milhões de visitantes. Disponível em <https://observador.pt/2018/01/17/monumentos-e-parques-de-sintra-receberam-mais-de-tres-milhoes-de-visitantes/>, consultado em Julho de 2018.

Referências Normativas:

- NP 614:1973 – Madeiras – Determinação do teor em água (1973), Lisboa: IGPAI – Repartição de Normalização
- NP 616:1973 – Madeiras – Determinação da massa volúmica (1973), Lisboa: IGPAI – Repartição de Normalização
- NP 4305: 1995 - Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas. Classificação visual. (1995). Caparica: IPQ.
- NP EN 335-1 - Durabilidade da madeira e de produtos derivados. (2011). Caparica: IPQ.
- EN 338:2009 – Structural timber; Strength classes, Bruxelas: CEN, 2009;
- EN 351-1:2007 – Durability of wood and wood-based products; Preservative treated solid wood; Part 1: Classification of preservative penetration and retention, Bruxelas: CEN, 2007;
- EN 1995:2004 -.Design of Timber Structures – Eurocódigo 5, Bruxelas: CEN, 2004;
- EN 335-1:2013- Durability of wood and wood-based products. Use classes: definitions, application to solid wood and wood-based products. Part 1. Bruxelas: CEN, 2013;
- EN 335-2:2013- Durability of wood and wood-based products. Use classes. Definitions application to solid wood and wood-based products. Part 2. Bruxelas: CEN, 2013;
- NP EN 350-1:2008 Durabilidade da madeira e de produtos derivados; Durabilidade natural da madeira; Parte 1: Guia dos princípios de ensaio e classificação da durabilidade natural da madeira, Lisboa: IPQ, 2008;
- NP EN 350-2:2008 Durabilidade da madeira e de produtos derivados; Durabilidade natural da madeira; Parte 2: Aplicação à madeira maciça, Lisboa: IPQ, 2008;
- NP 460:1995 – Durabilidade da madeira e de produtos derivados. Durabilidade natural da madeira maciça. Guia de exigências de durabilidade das madeiras na sua utilização segundo as classes de risco, Lisboa: IPQ, 1995;
- NP EN 1990:2009 – Bases para o projeto de estruturas – Eurocódigo 0, Lisboa: IPQ, 2009;
- NP EN 1991-1-1:2009 - Ações em estruturas – Eurocódigo 1. Parte 1-1: Ações gerais. Pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios, Lisboa: IPQ, 2009;
- NP 1912:2013- Madeira para estruturas. Classes de resistência. Atribuição de classes de qualidade e espécies, Lisboa: IPQ, 2013;
- BS 4978_2007 – Visual strength grading of softwood – Specification, London, BSI, 2007

ANEXOS

ANEXO A



ISEL - Instituto Superior de
Engenharia de Lisboa

Nome: Vânia Sofia Simões Baptista
Número: 42426

Trabalho Final de Mestrado
Capela Real do Palácio Nacional de Sintra:
Estudo em Elementos de Madeira

Escala
1:100

Formato
A4

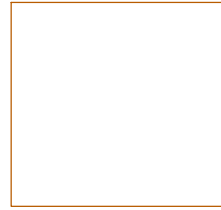
Esquema das Vigas da Tribuna

Data
Outubro de 2018

Desenho n°
1



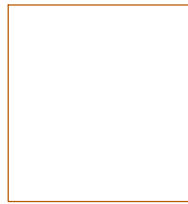
V1
19,5x13 cm



V2
14,2x13,5 cm



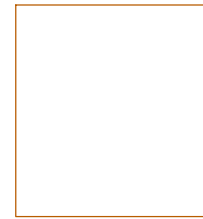
V3
15,5x13,5
cm



V4
12x13 cm



V5
15x14 cm



V6
12,5x14
cm

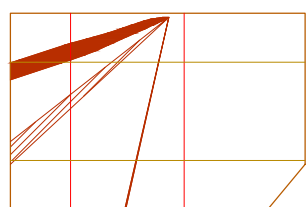
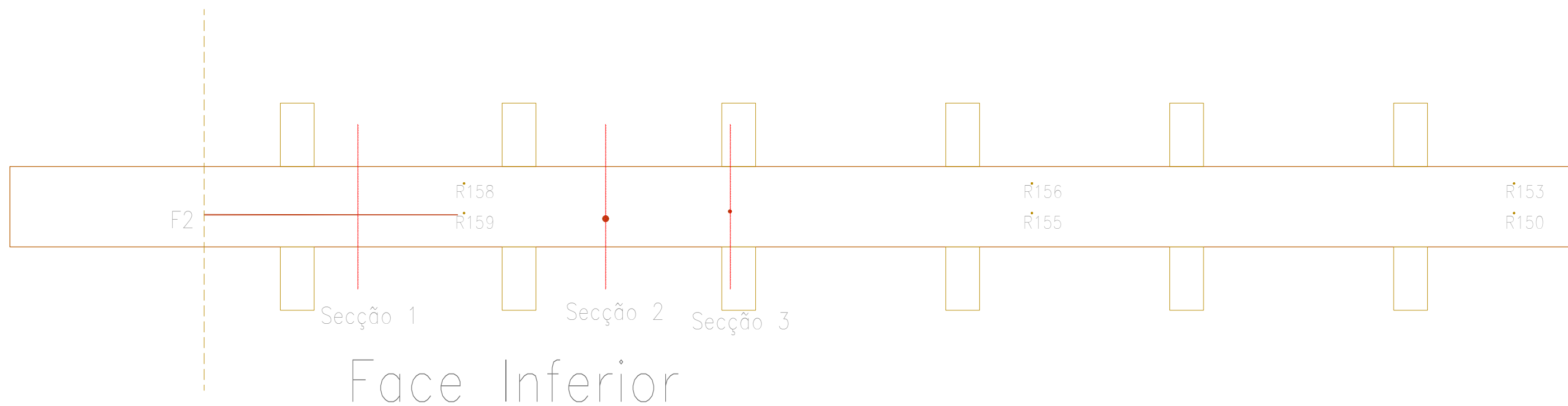
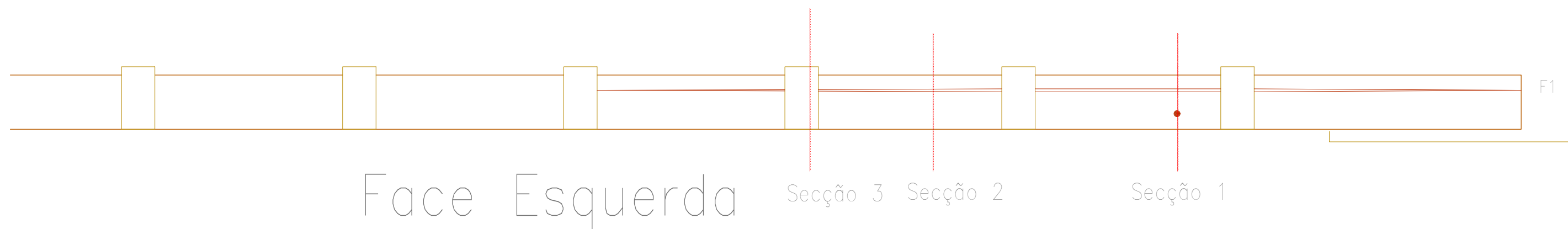


V7
12,5x14 cm



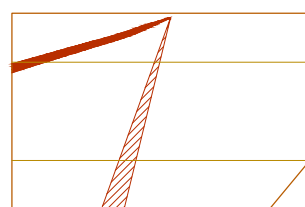
Tarugos
8x15 cm

ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa		Nome: Vânia Sofia Simões Baptista Número: 42426	
Trabalho Final de Mestrado Capela Real do Palácio Nacional de Sintra: Estudo em Elementos de Madeira		Escala 1:5	Formato A4
Secções das Vigas da Tribuna		Data Outubro de 2018	Desenho nº 2

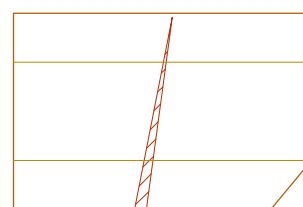


R158 R159

Secção 1



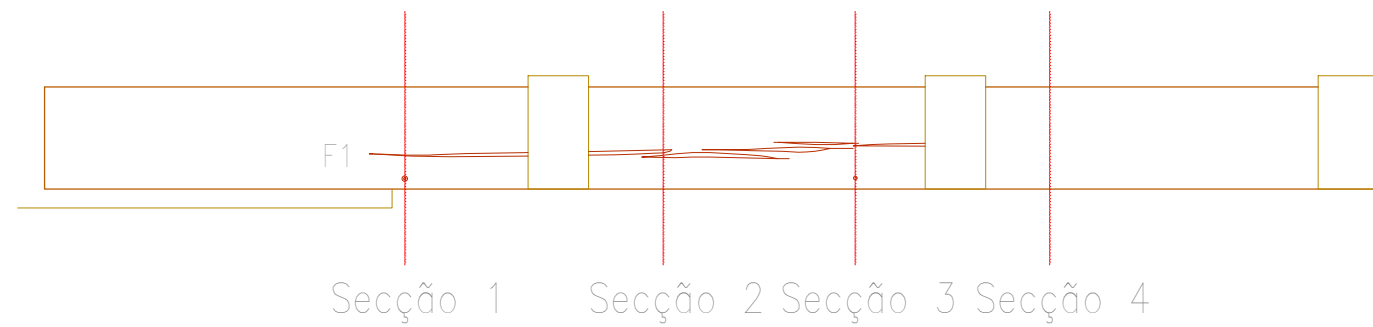
Secção 2



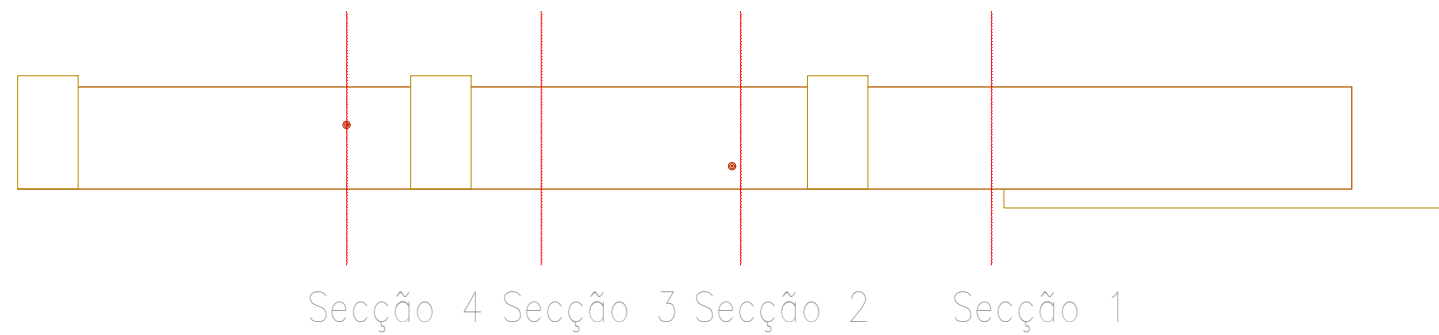
Secção 3

Escala 1:5

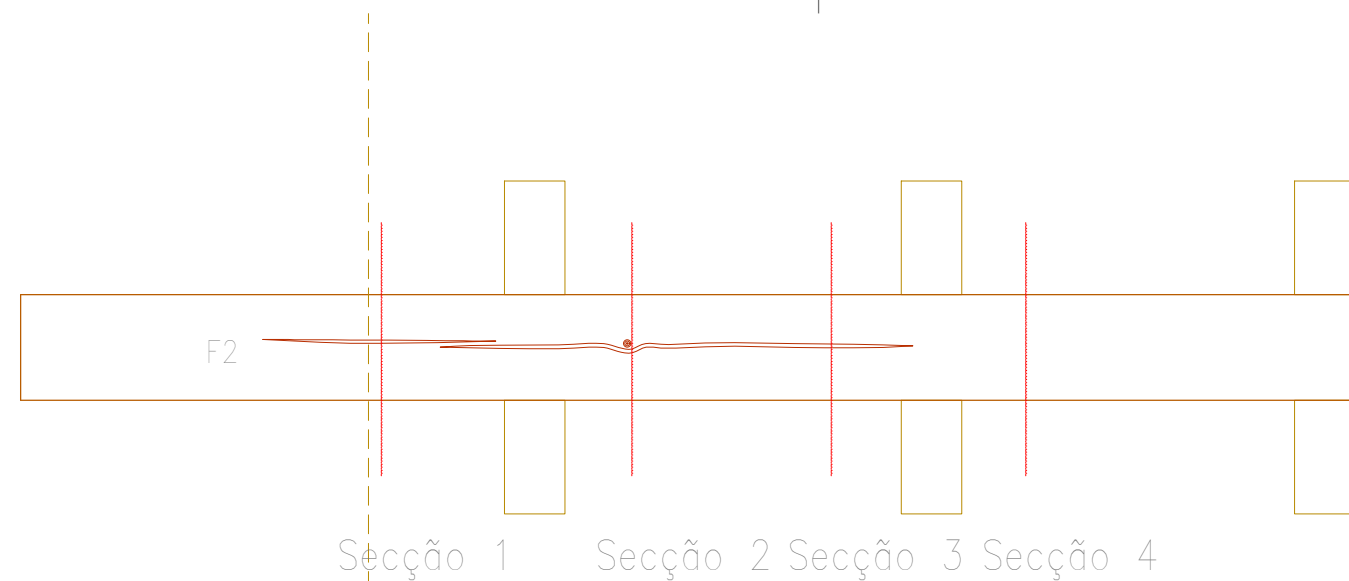
ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa		Nome: Vânia Sofia Simões Baptista Número: 42426	
Trabalho Final de Mestrado Capela Real do Palácio Nacional de Sintra: Estudo em Elementos de Madeira		Escala 1:10	Formato A3
Representação das faces e secções da viga V1, com nós e fendas		Data Outubro de 2018	Desenho nº 3



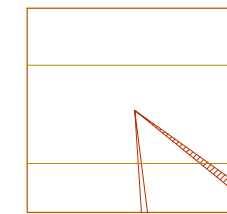
Face Direita



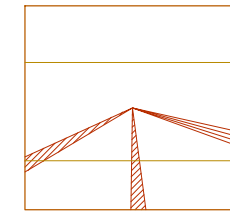
Face Esquerda



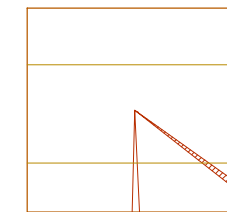
Face Inferior



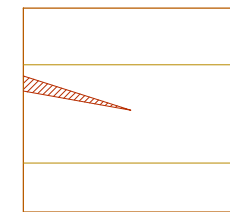
Secção 1



Secção 2



Secção 3



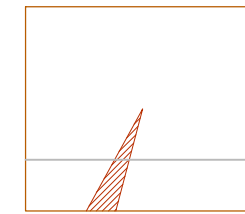
Secção 4

Escala 1:5

ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa		Nome: Vânia Sofia Simões Baptista Número: 42426	
Trabalho Final de Mestrado Capela Real do Palácio Nacional de Sintra: Estudo em Elementos de Madeira		Escala 1:10	Formato A3
Representação das faces e secções da viga V2, com nós e fendas		Data Outubro de 2018	Desenho nº 4



Face Direita

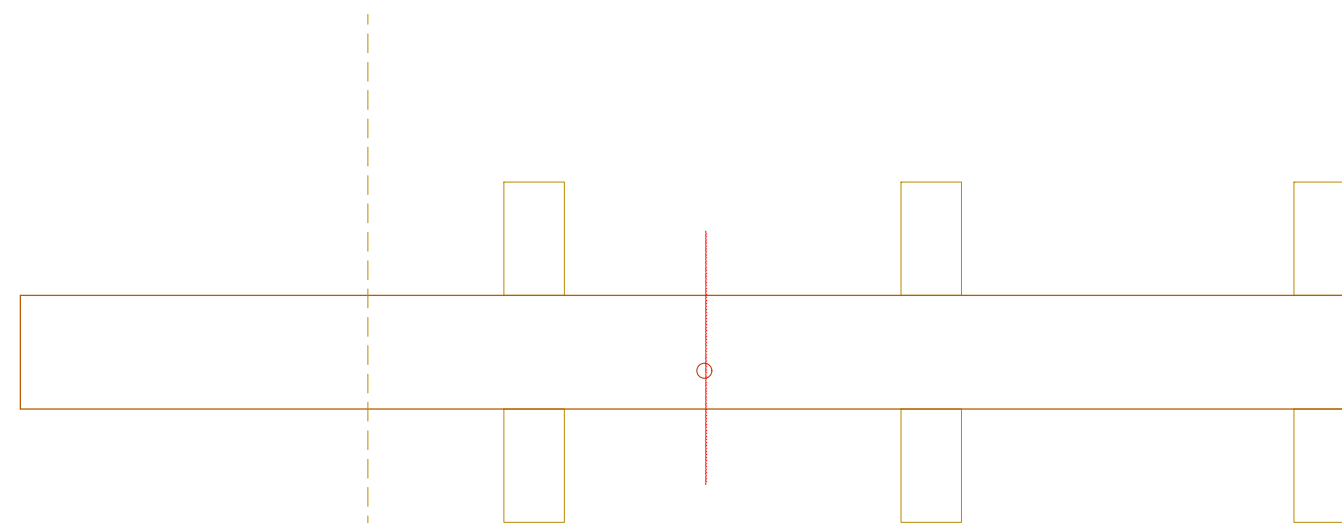


Secção 1

Escala 1:5



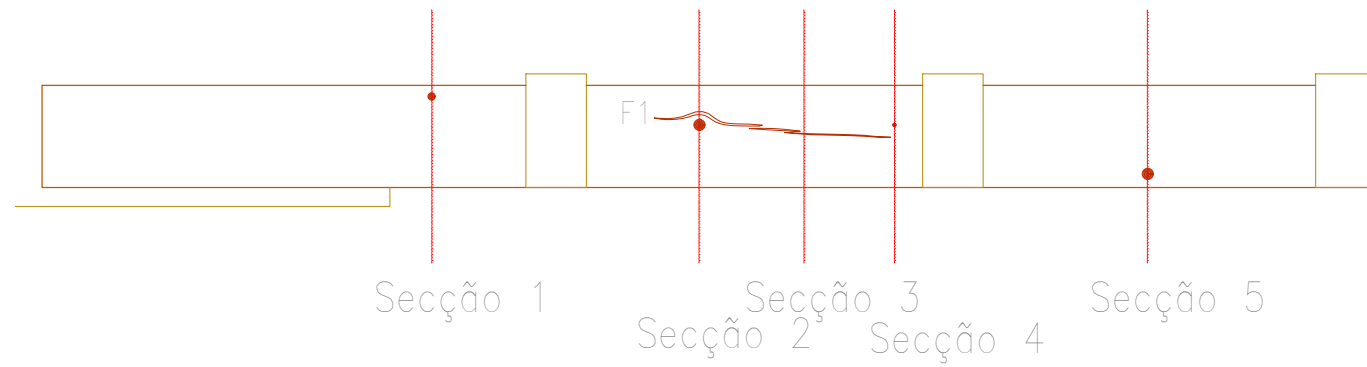
Face Esquerda



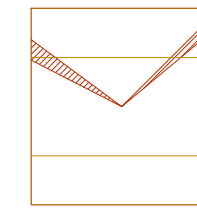
Secção 1

Face Inferior

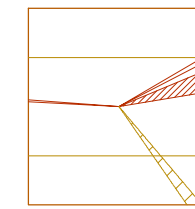
ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa		Nome: Vânia Sofia Simões Baptista Número: 42426	
Trabalho Final de Mestrado Capela Real do Palácio Nacional de Sintra: Estudo em Elementos de Madeira		Escala 1:10	Formato A3
Representação das faces e secções da viga V3, com nós e fendas		Data Outubro de 2018	Desenho nº 5



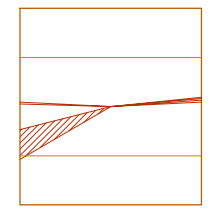
Face Direita



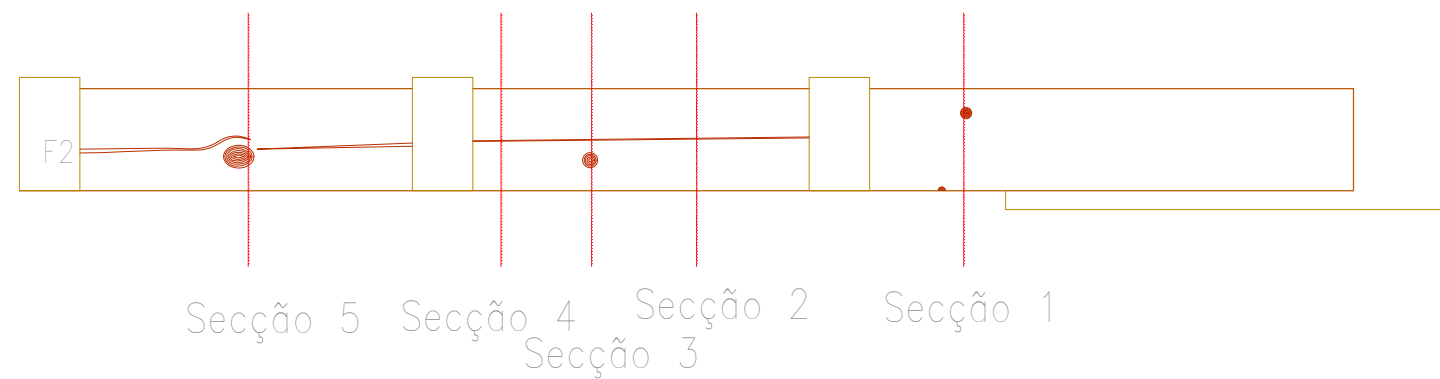
Secção 1



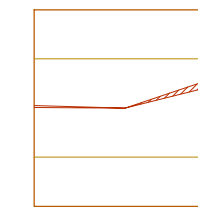
Secção 2



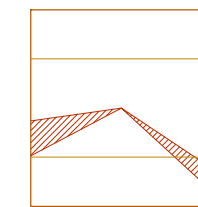
Secção 3



Face Esquerda

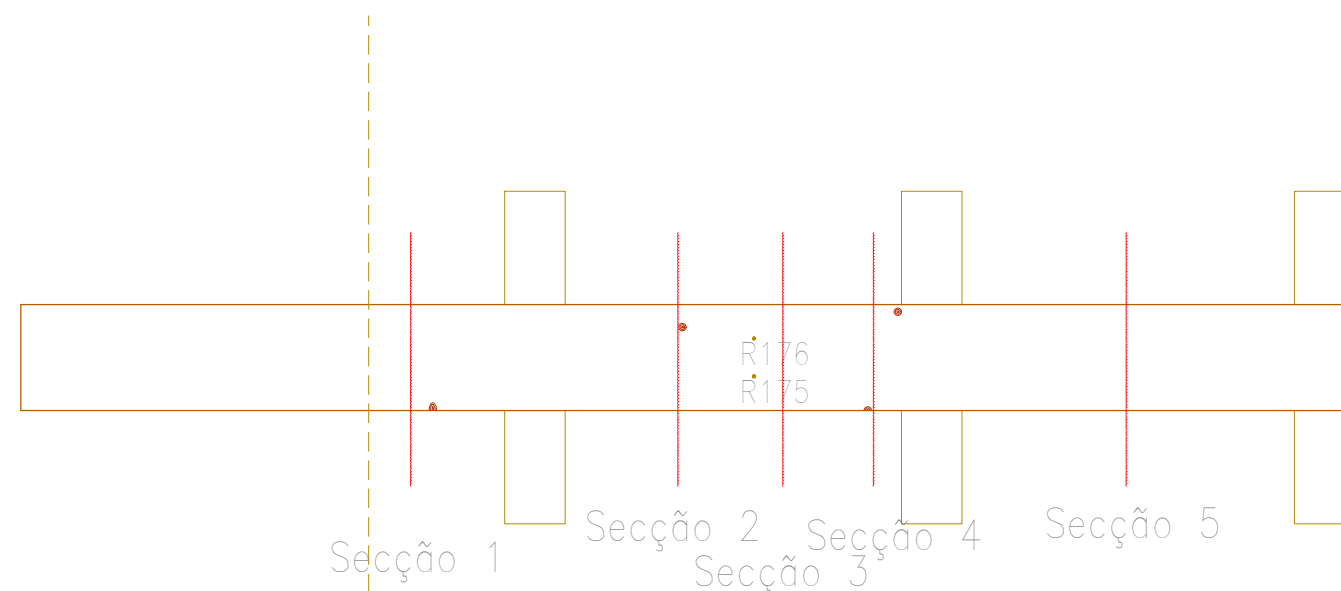


Secção 4



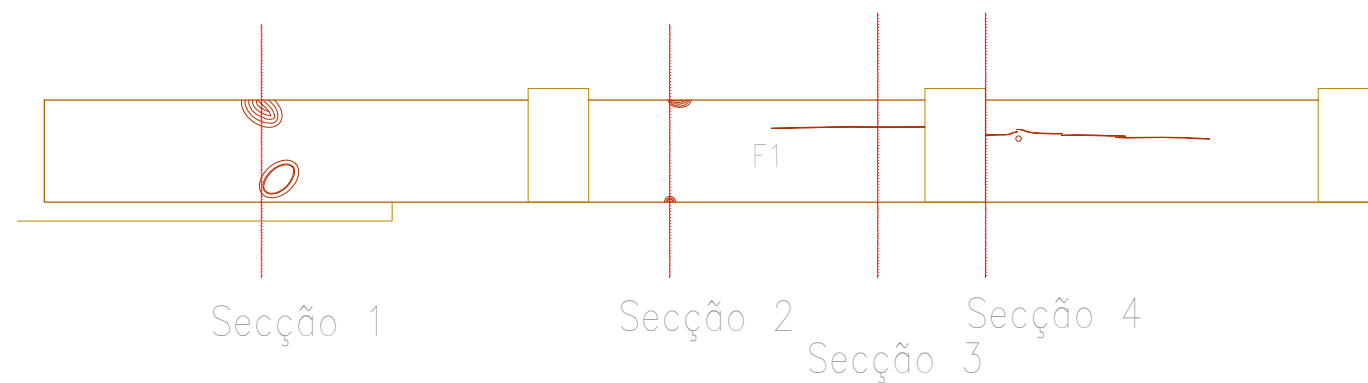
Secção 5

Escala 1:5

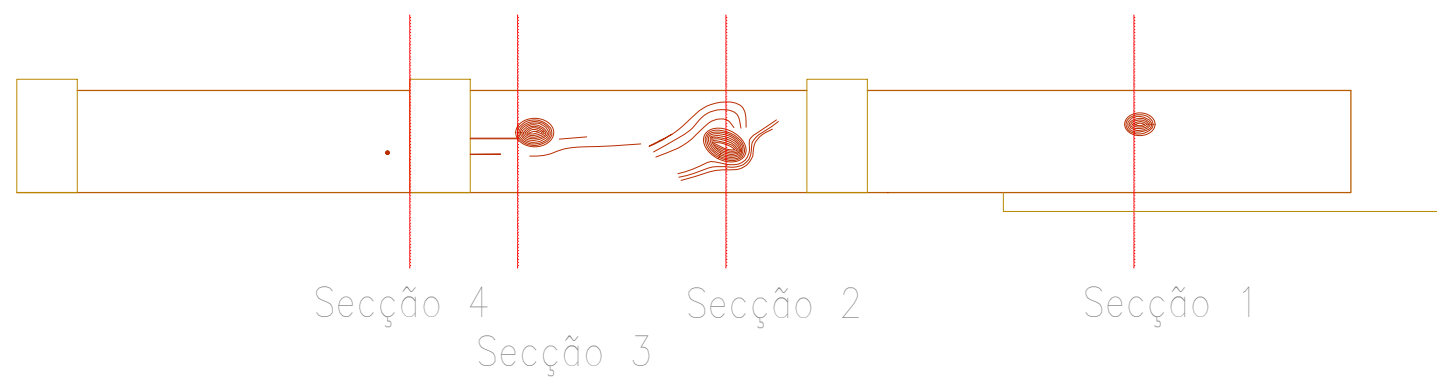


Face Inferior

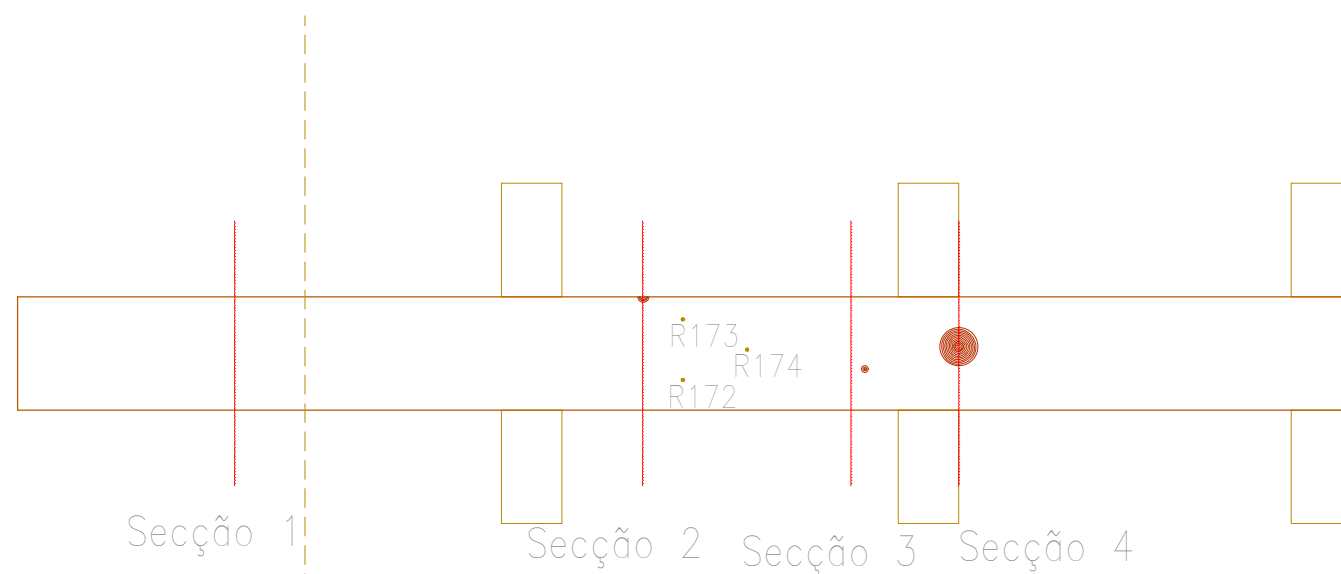
ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa		Nome: Vânia Sofia Simões Baptista Número: 42426	
Trabalho Final de Mestrado Capela Real do Palácio Nacional de Sintra: Estudo em Elementos de Madeira		Escala 1:10	Formato A3
Representação das faces e secções da viga V4, com nós e fendas		Data Outubro de 2018	Desenho nº 6



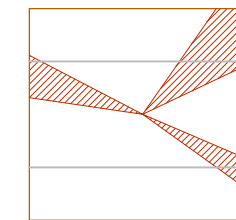
Face Direita



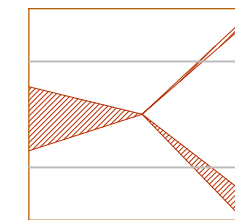
Face Esquerda



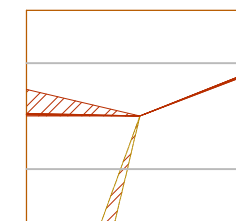
Face Inferior



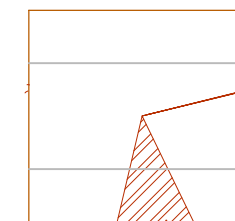
Secção 1



Secção 2



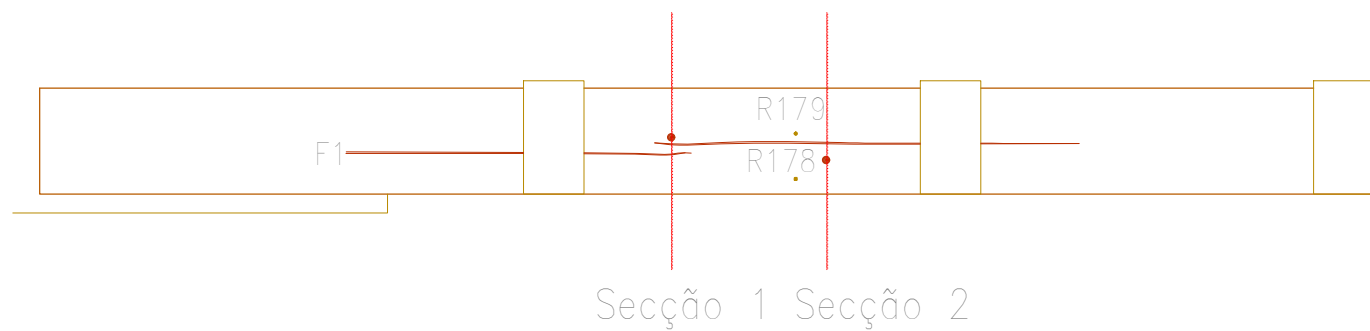
Secção 3



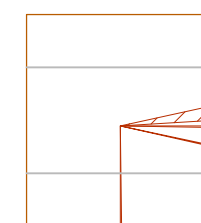
Secção 4

Escala 1:5

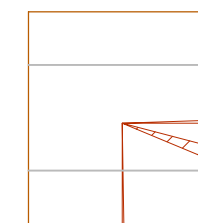
ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa		Nome: Vânia Sofia Simões Baptista Número: 42426	
Trabalho Final de Mestrado Capela Real do Palácio Nacional de Sintra: Estudo em Elementos de Madeira		Escala 1:10	Formato A3
Representação das faces e secções da viga V5, com nós e fendas		Data Outubro de 2018	Desenho nº 7



Face Direita

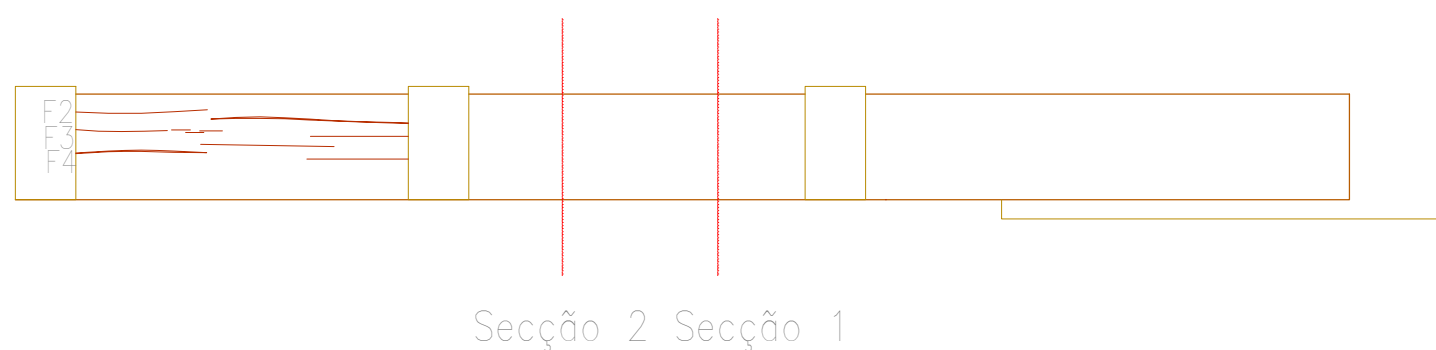


Secção 1

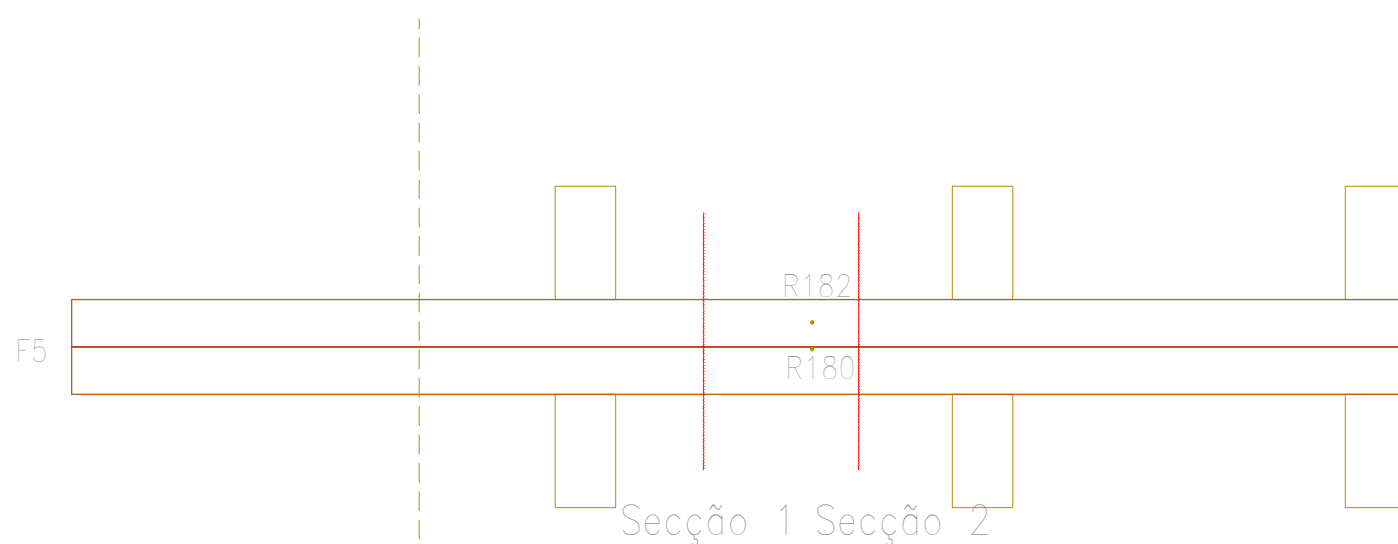


Secção 2

Escala 1:5

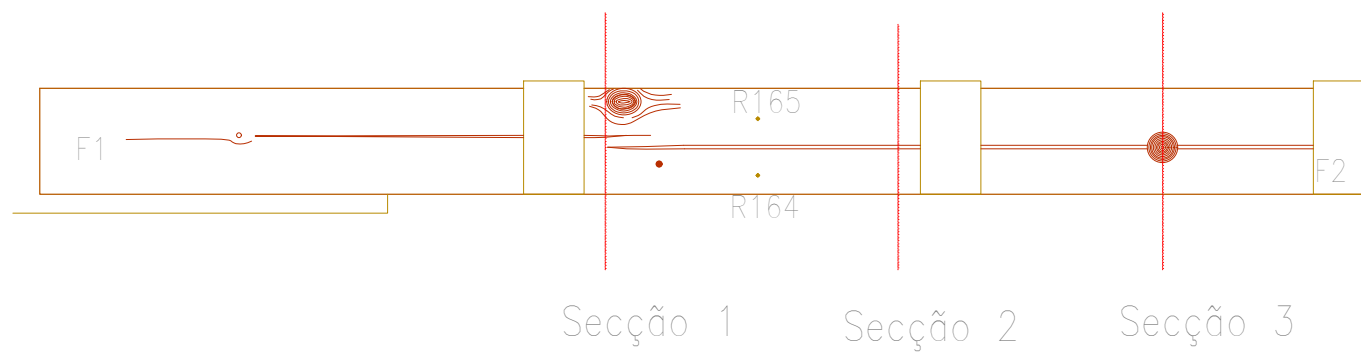


Face Esquerda

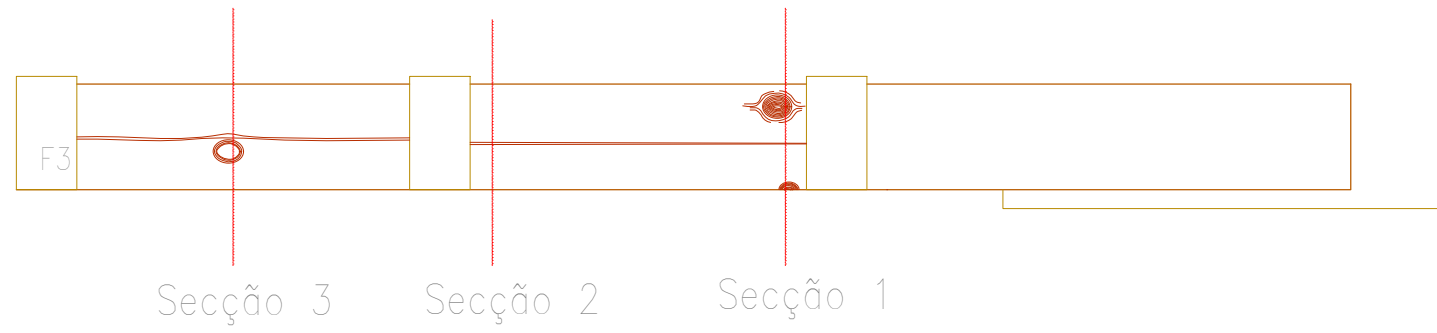


Face Inferior

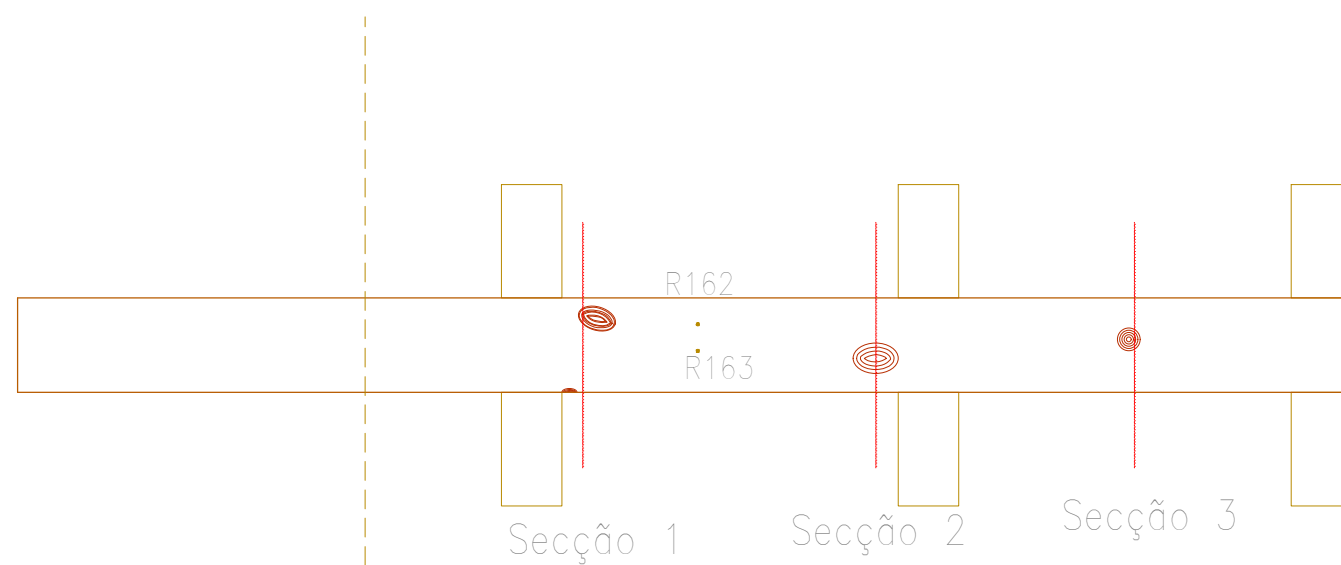
ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa		Nome: Vânia Sofia Simões Baptista Número: 42426	
Trabalho Final de Mestrado Capela Real do Palácio Nacional de Sintra: Estudo em Elementos de Madeira		Escala 1:10	Formato A3
Representação das faces e secções da viga V6, com nós e fendas		Data Outubro de 2018	Desenho nº 8



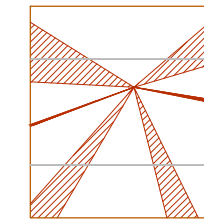
Face Direita



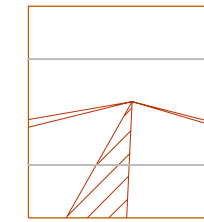
Face Esquerda



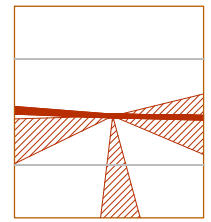
Face Inferior



Secção 1



Secção 2



Secção 3

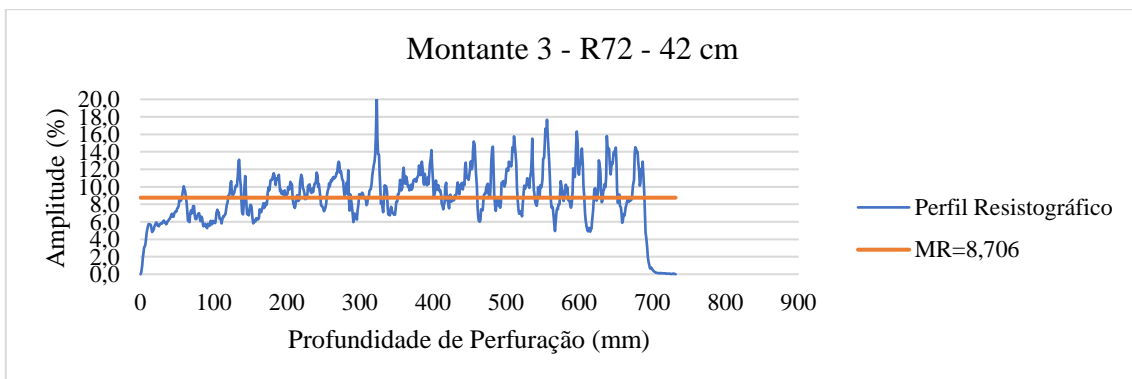
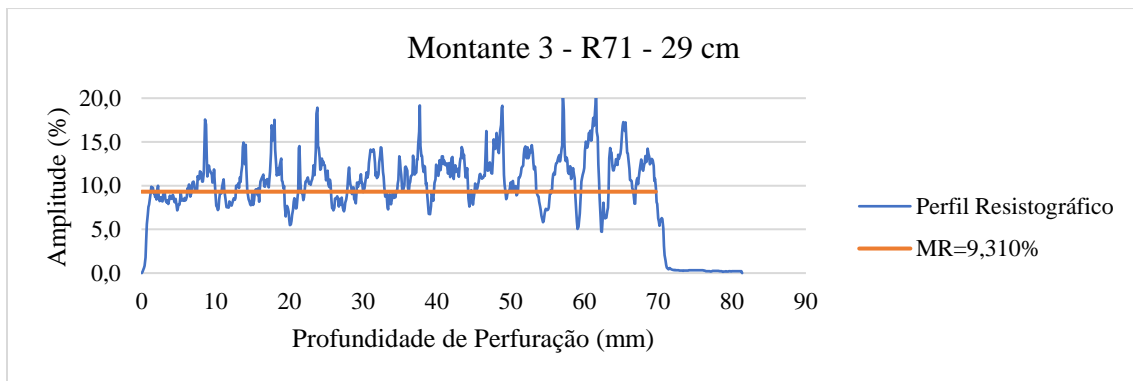
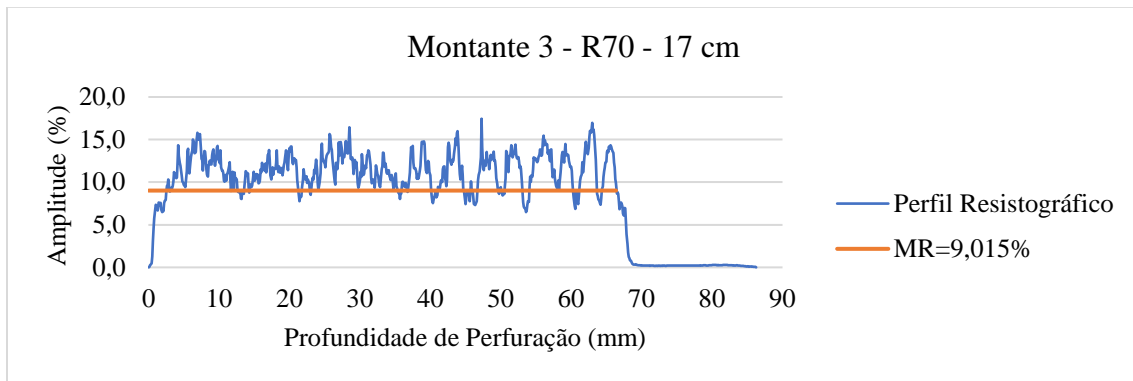
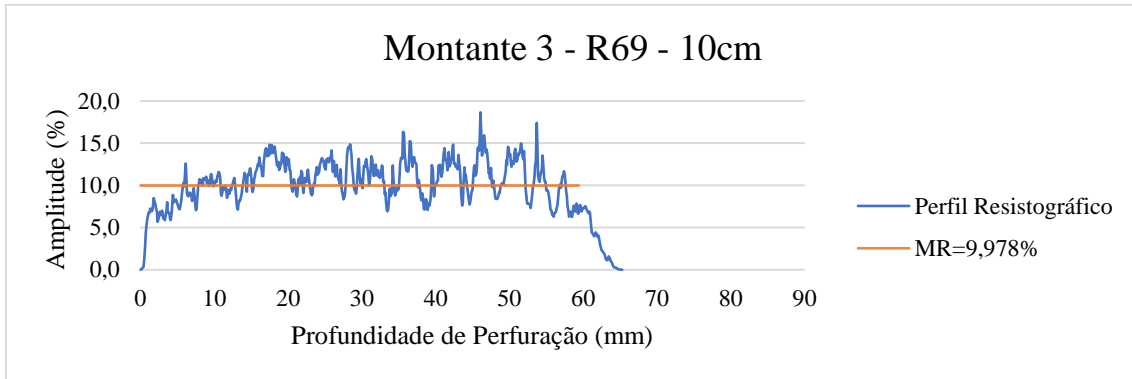
Escala 1:5

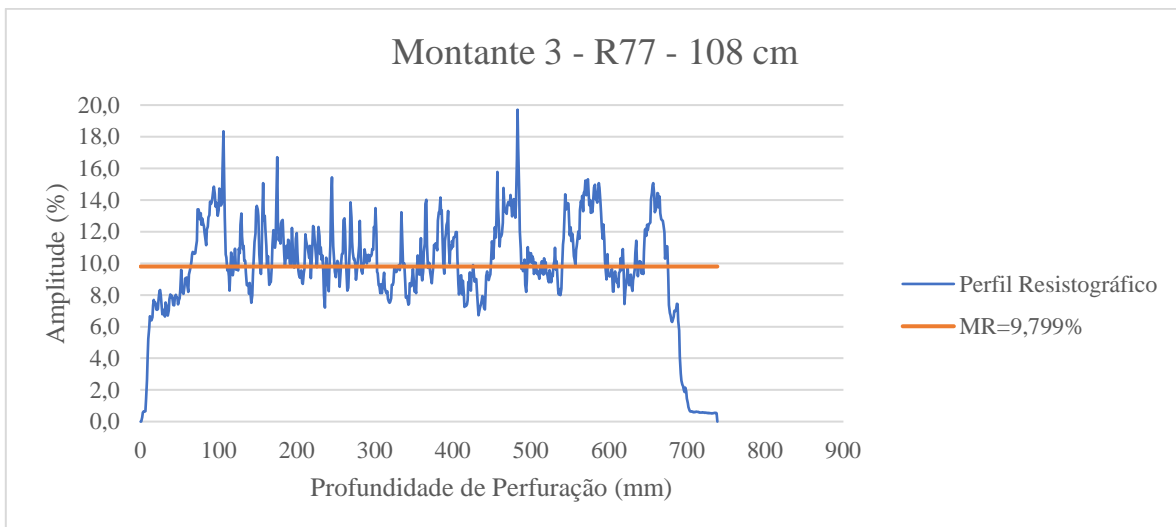
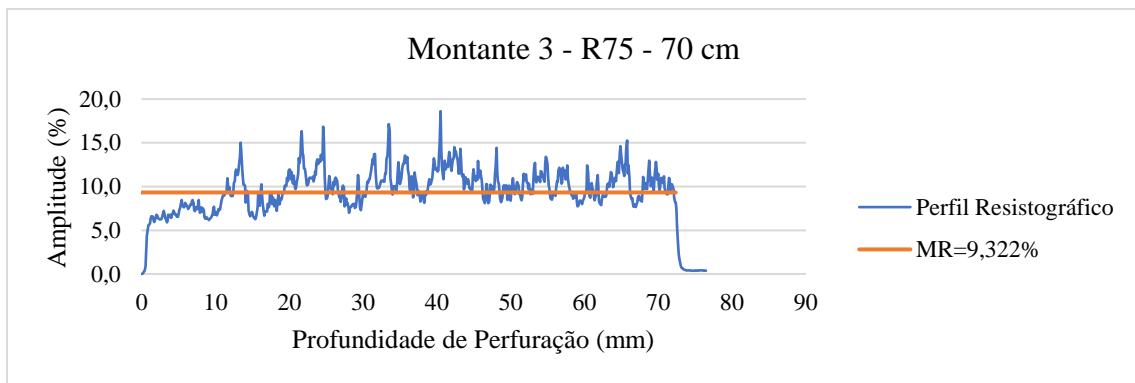
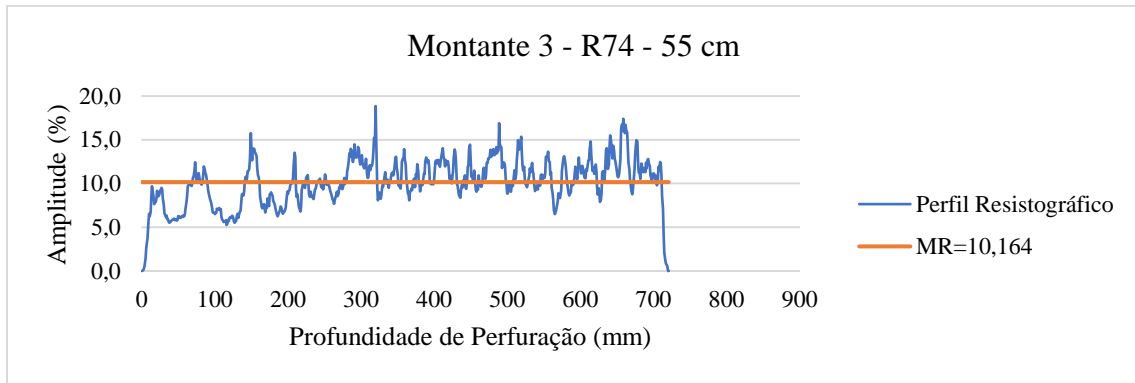
ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa		Nome: Vânia Sofia Simões Baptista Número: 42426	
Trabalho Final de Mestrado Capela Real do Palácio Nacional de Sintra: Estudo em Elementos de Madeira		Escala 1:10	Formato A3
Representação das faces e secções da viga V7, com nós e fendas		Data Outubro de 2018	Desenho nº 9

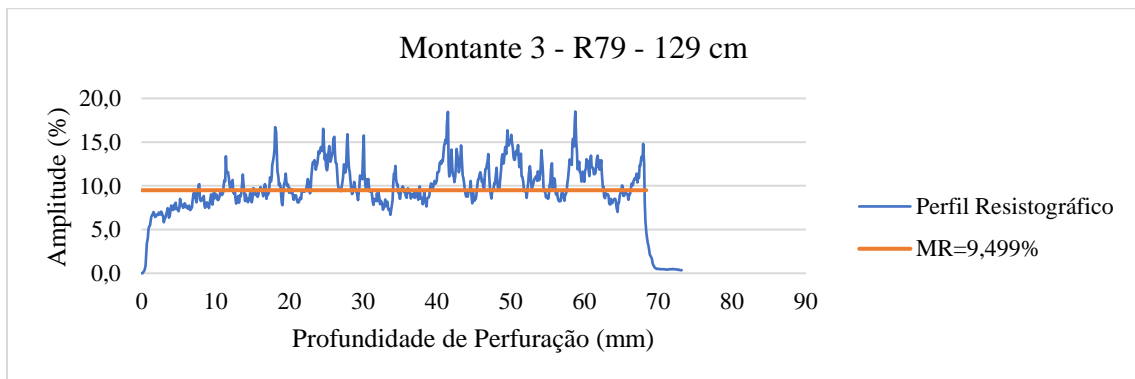
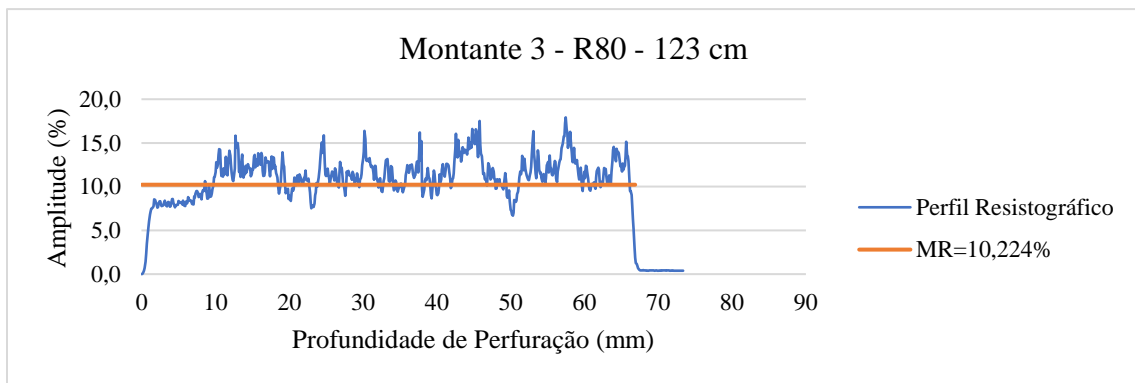
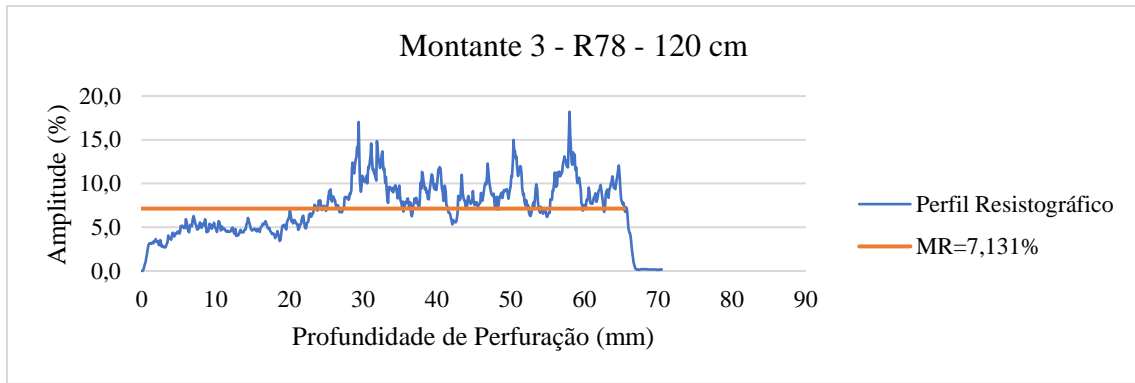
ANEXO B

PAINEL NORTE

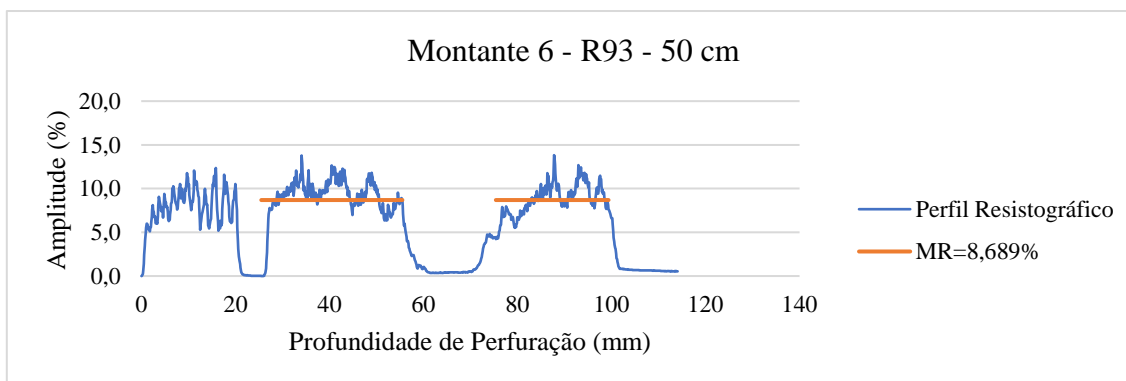
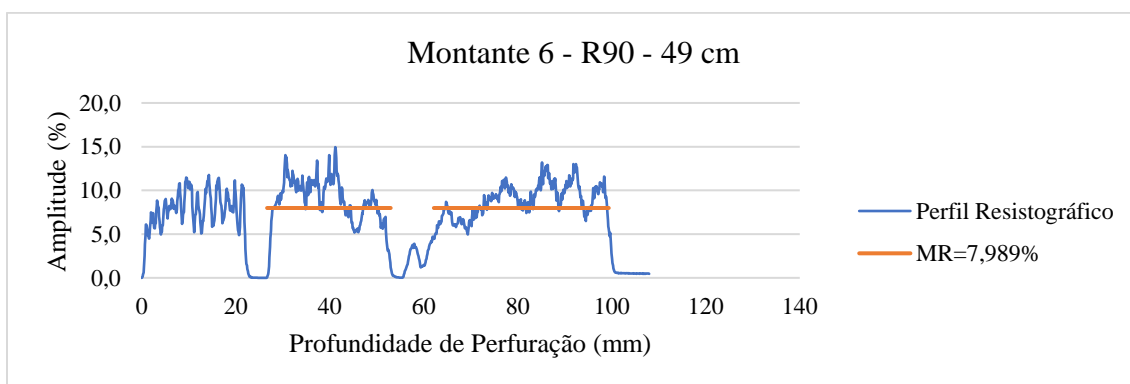
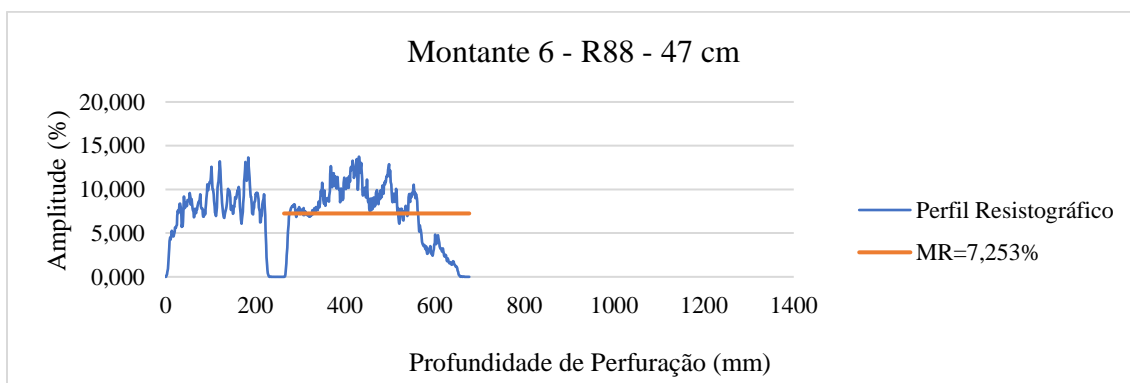
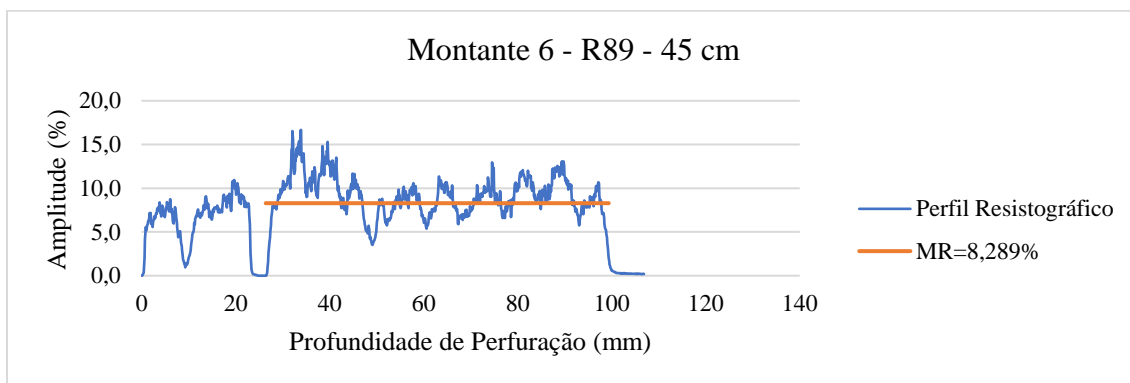
Montante 3

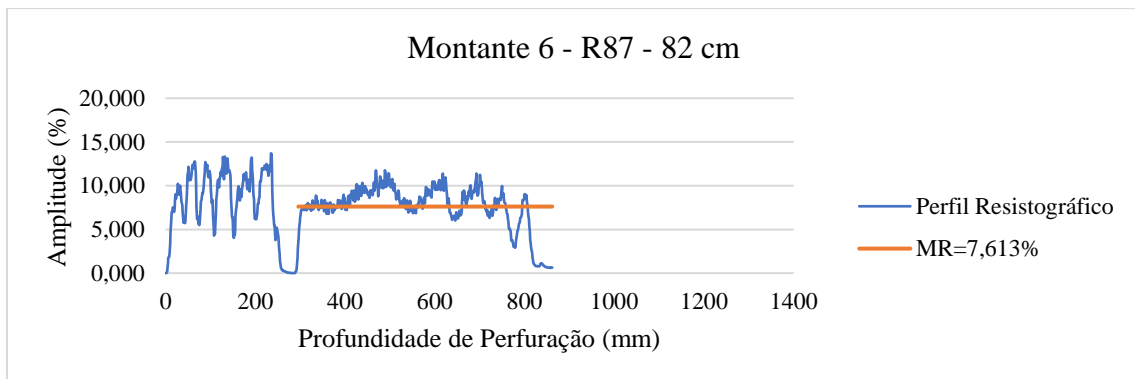
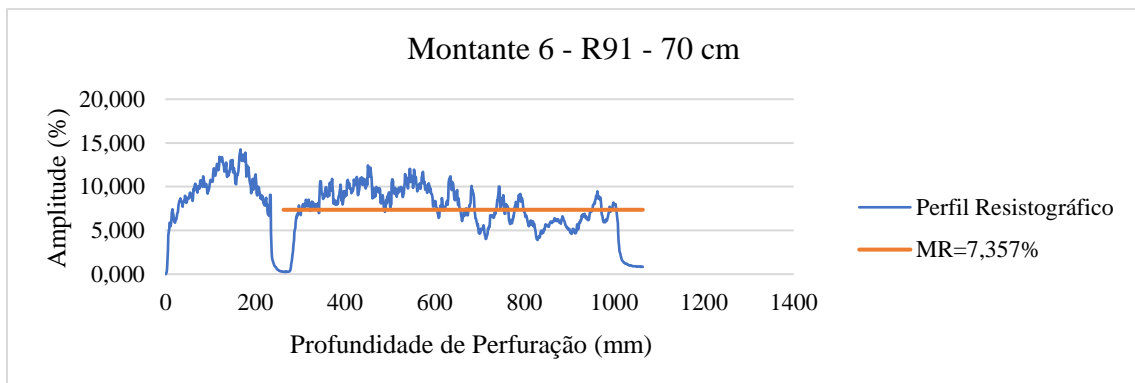
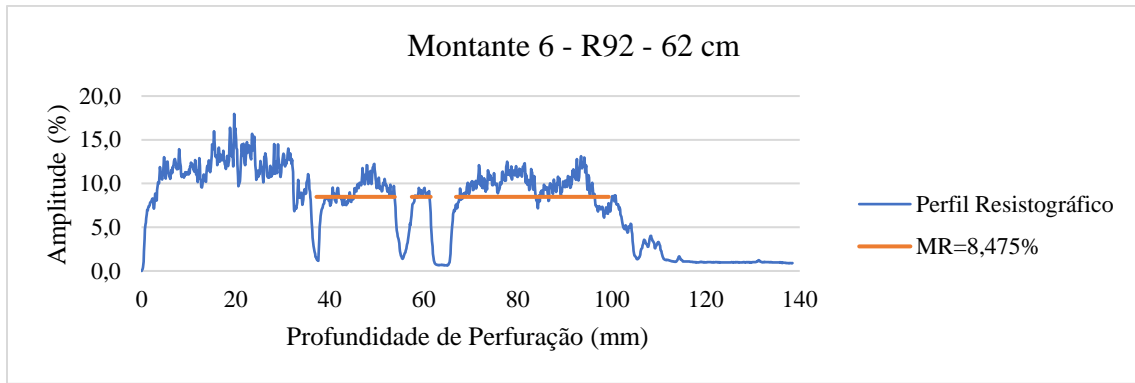


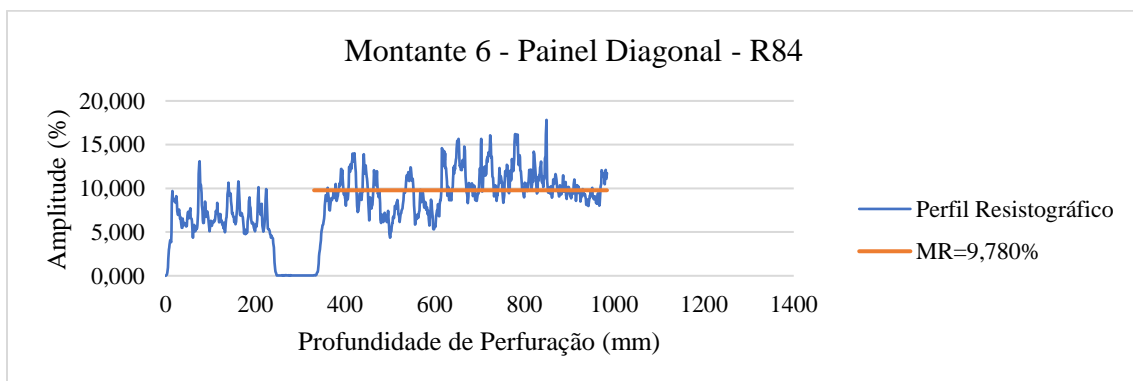
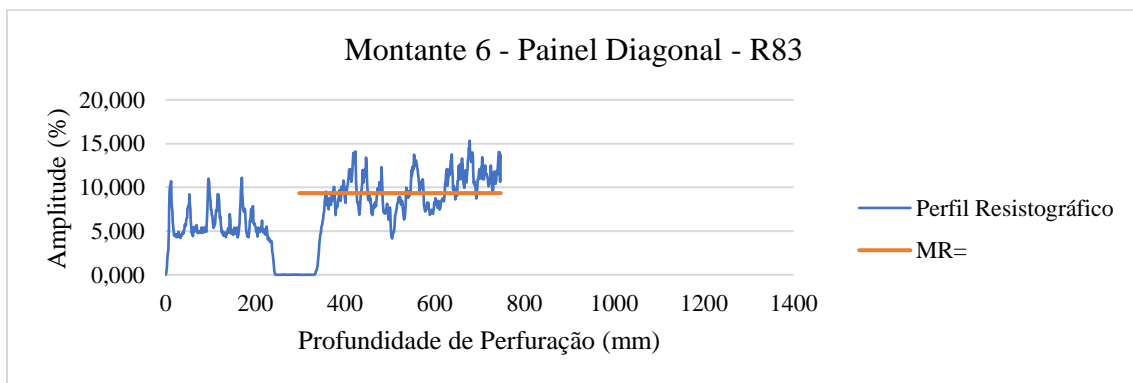
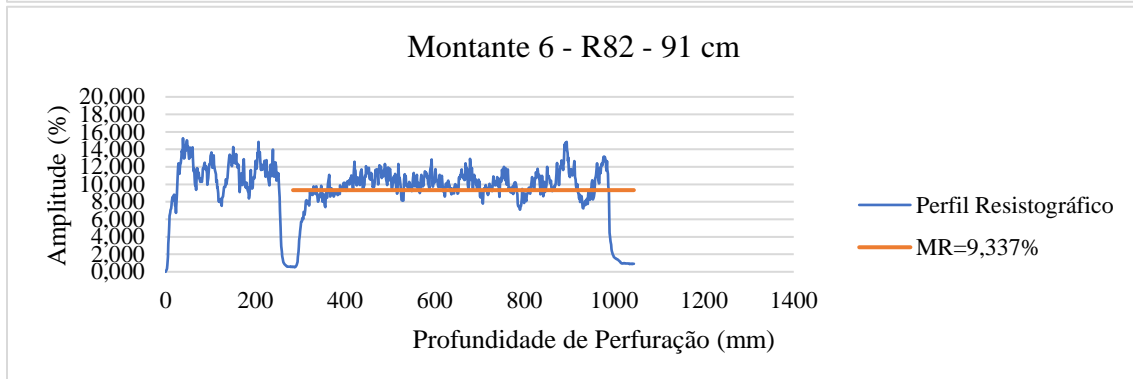
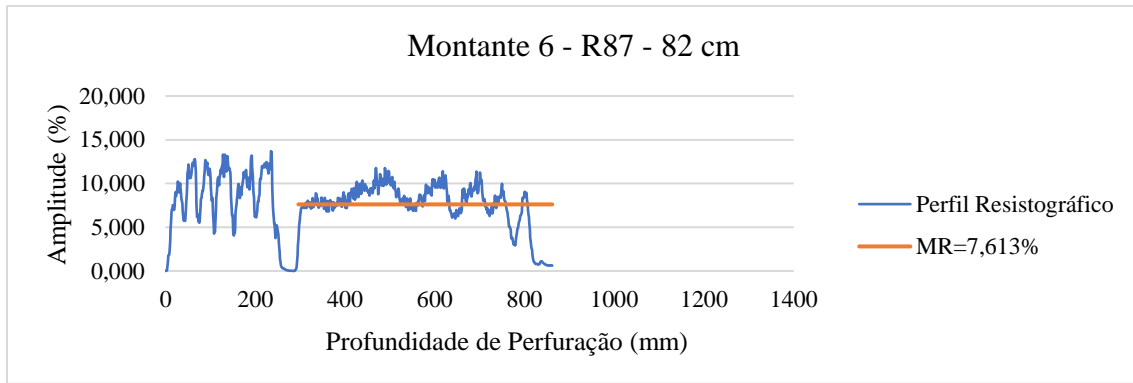




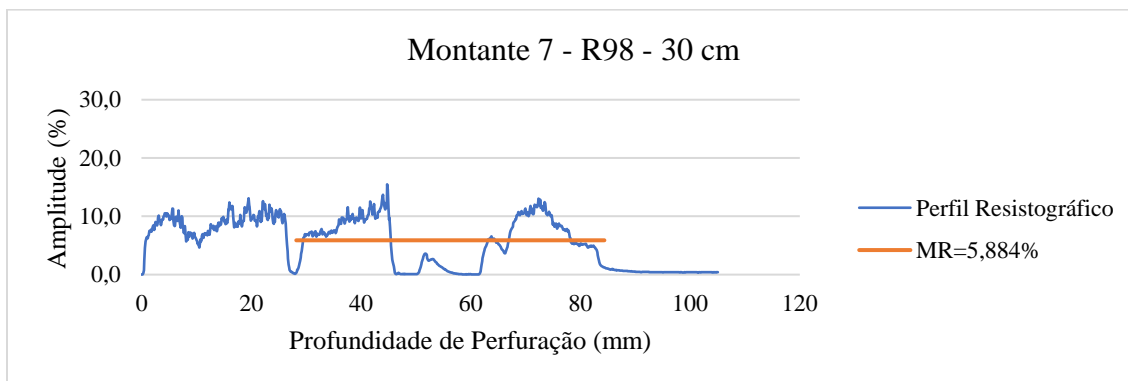
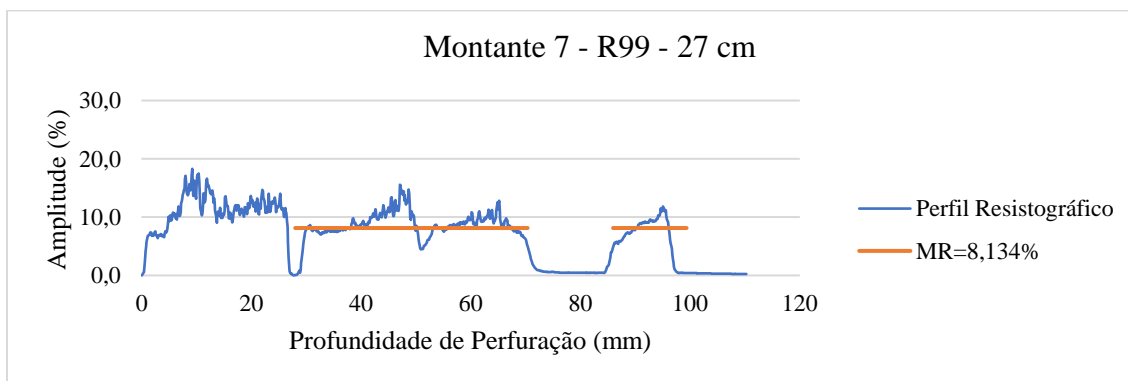
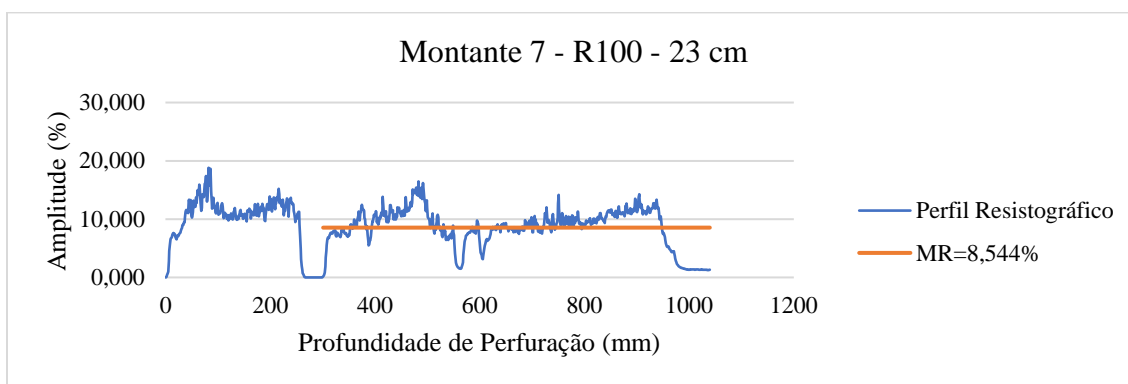
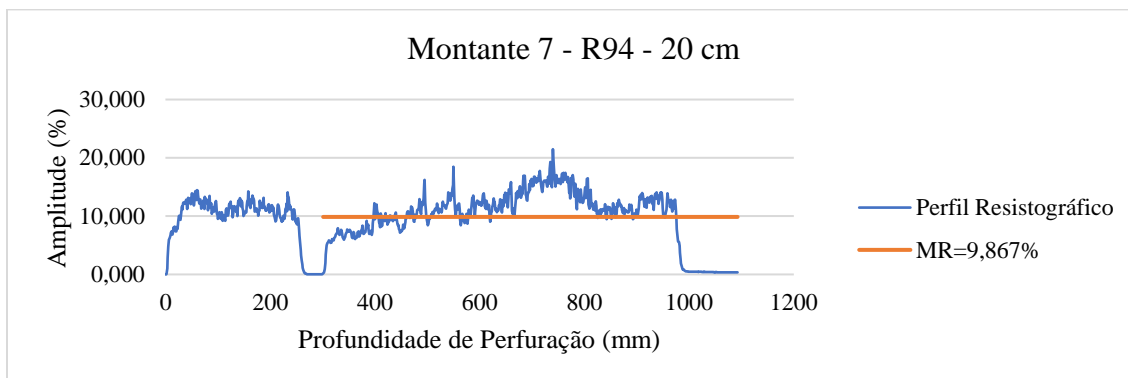
Montante 6

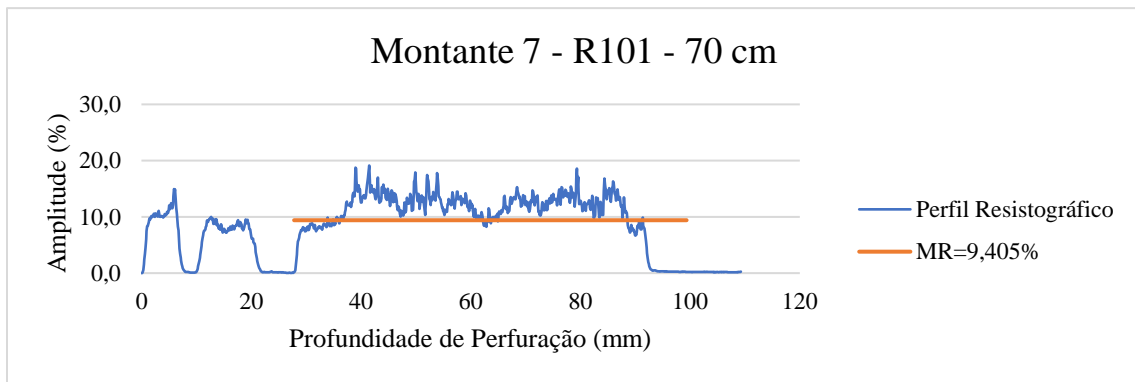
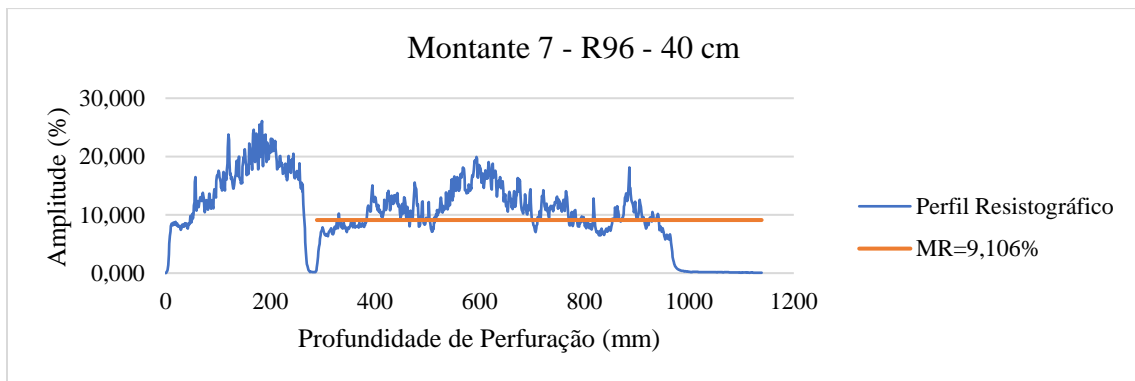
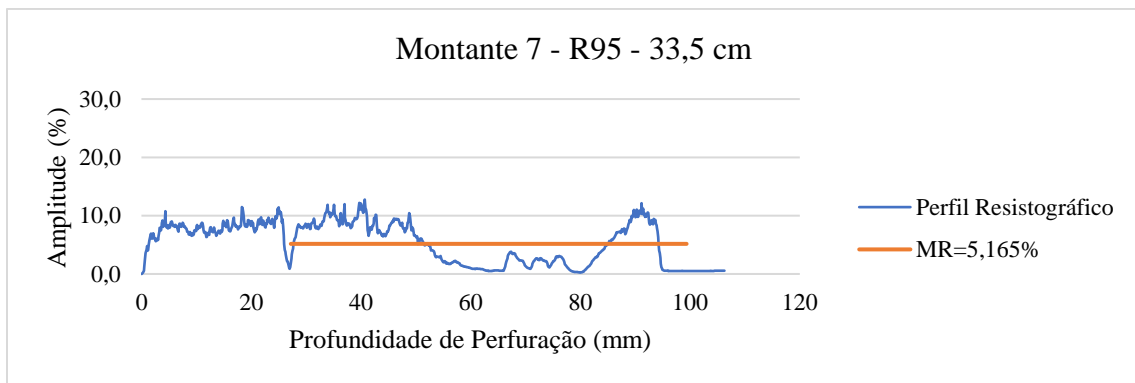
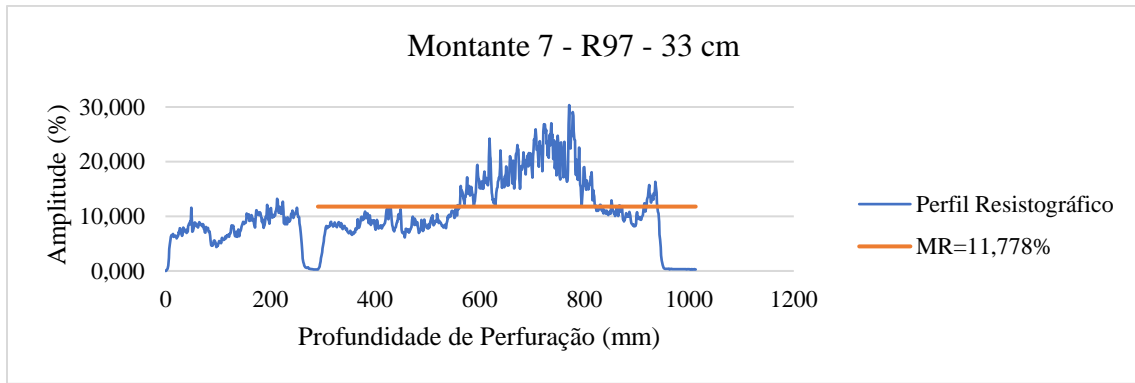






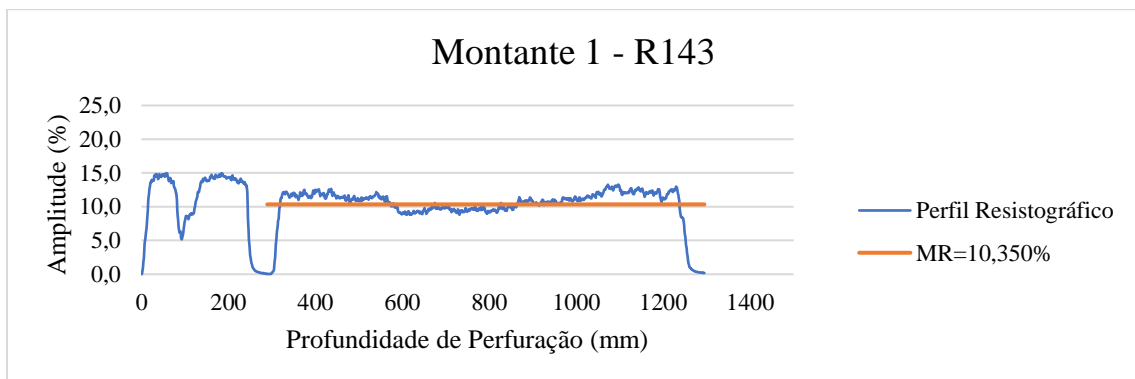
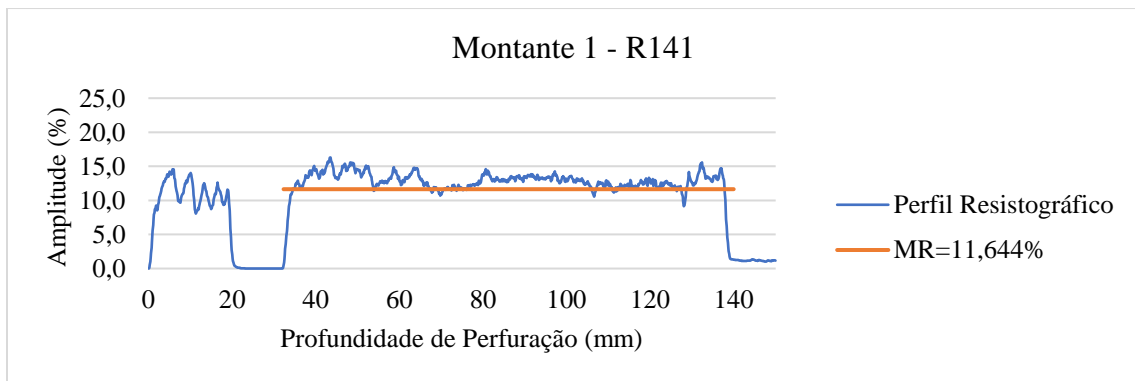
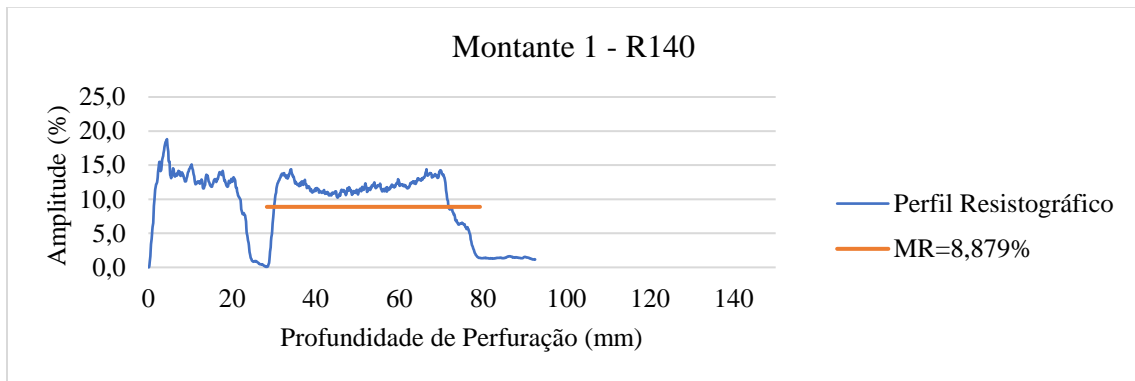
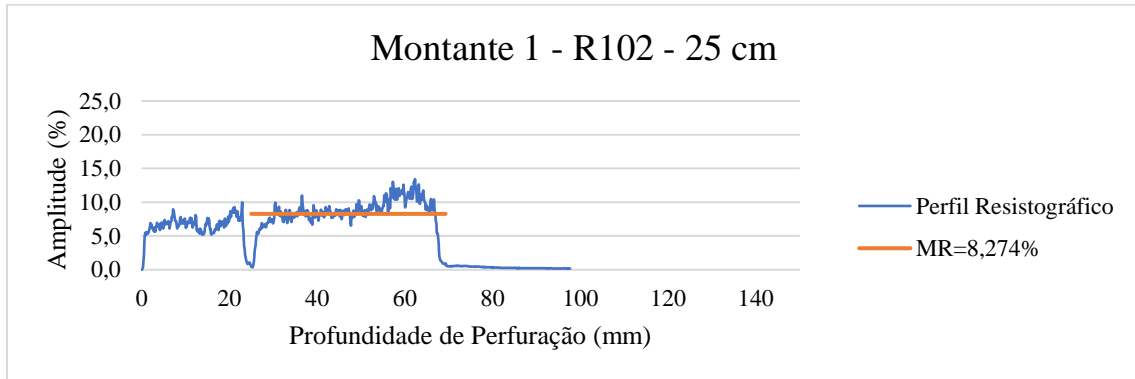
Montante 7



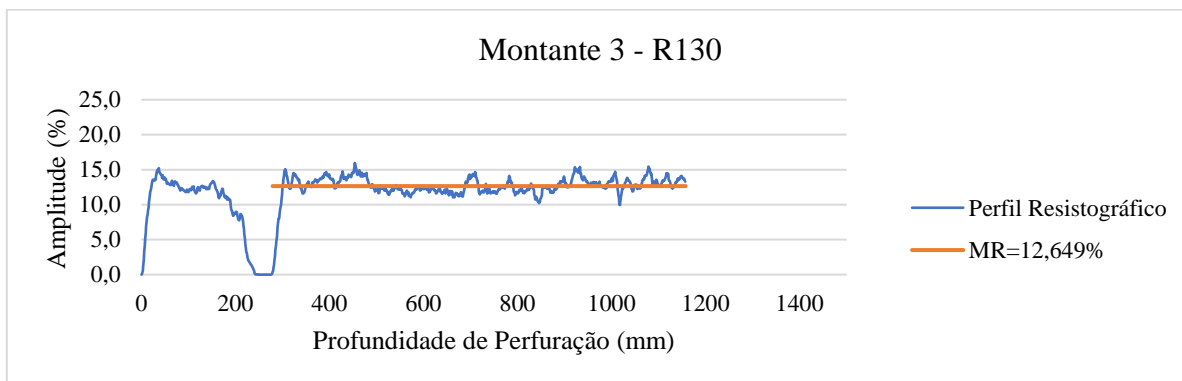
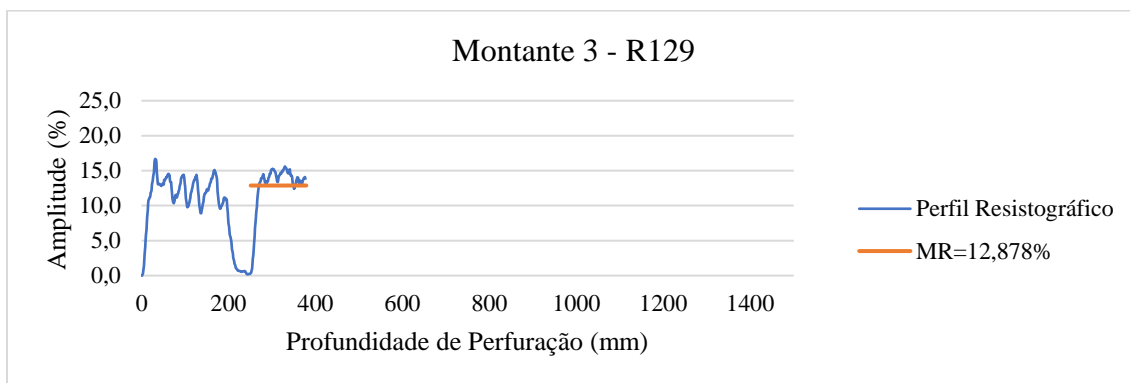
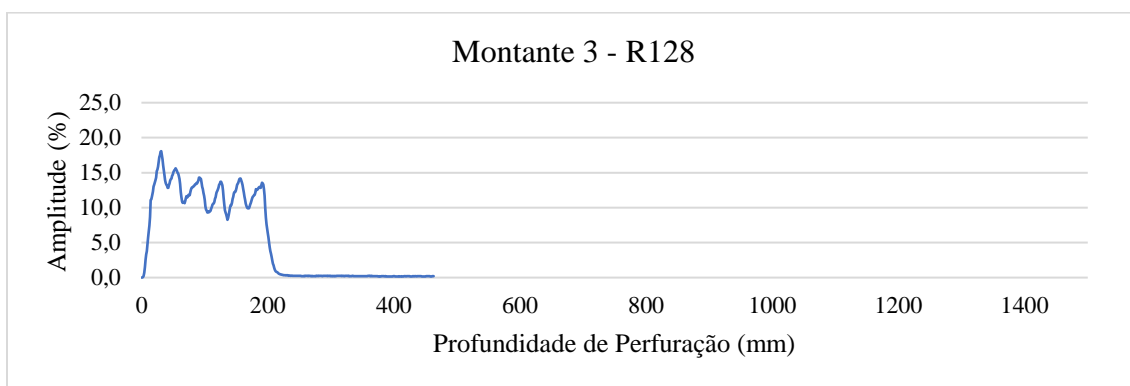
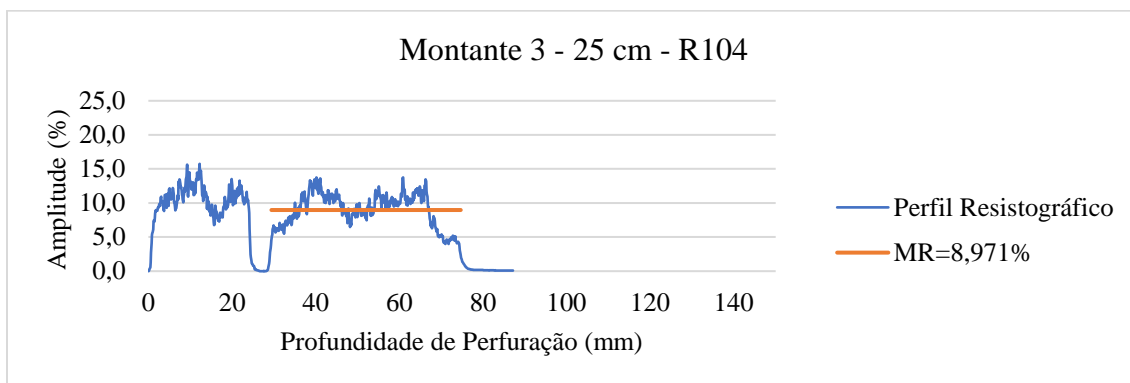


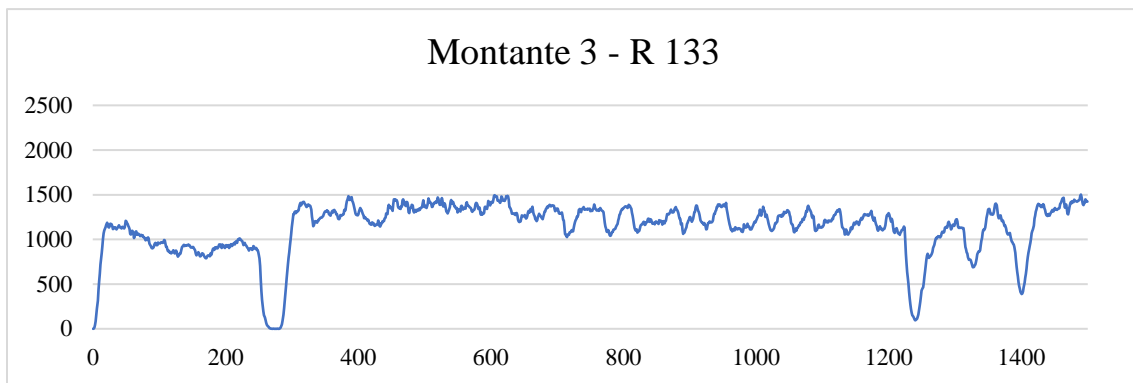
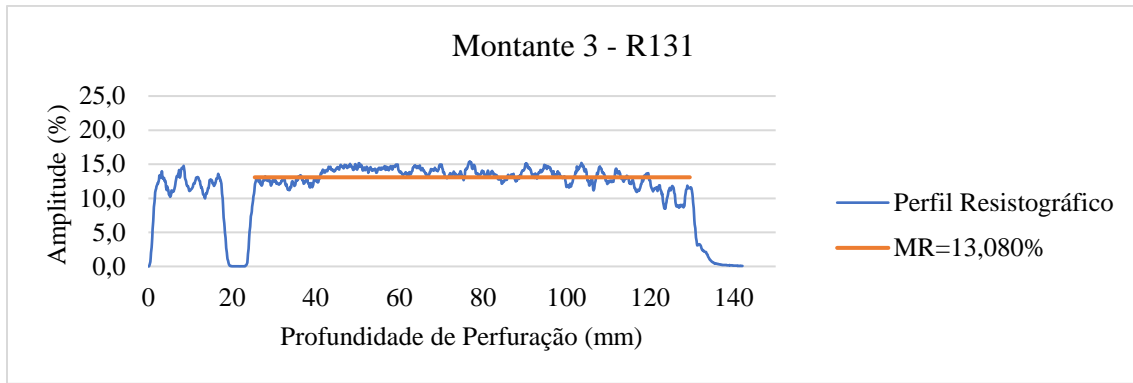
PAINEL SUL

Montante 1

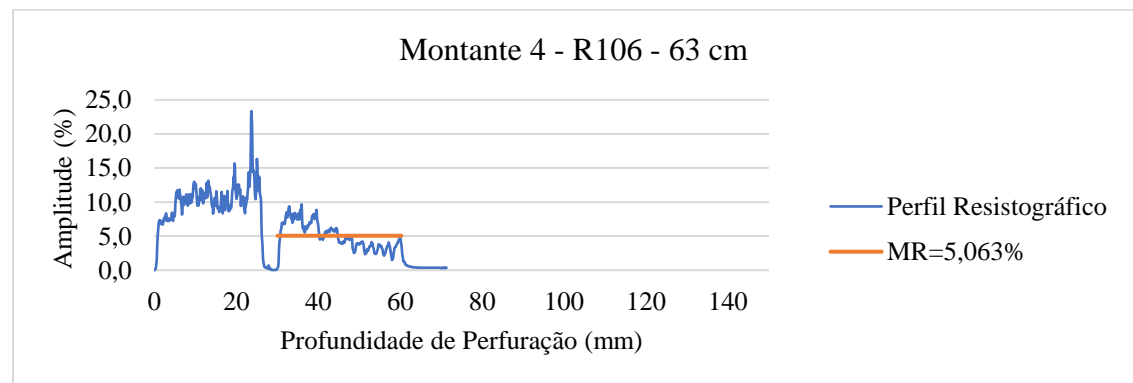
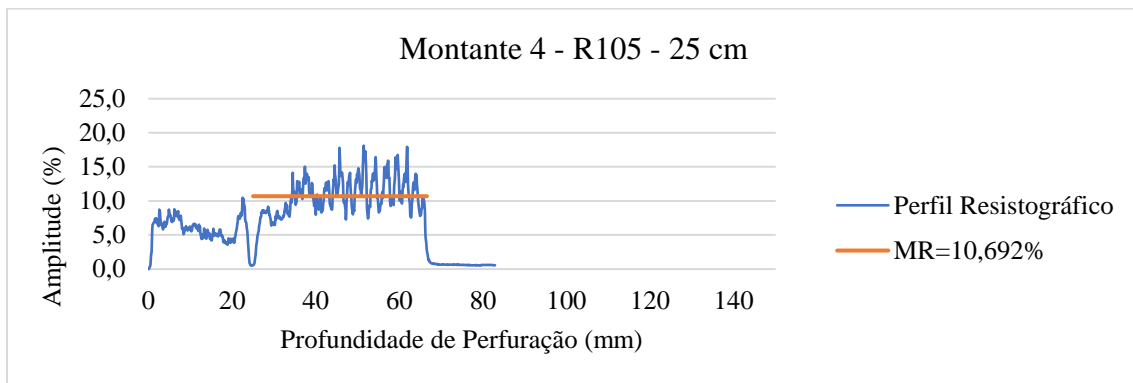


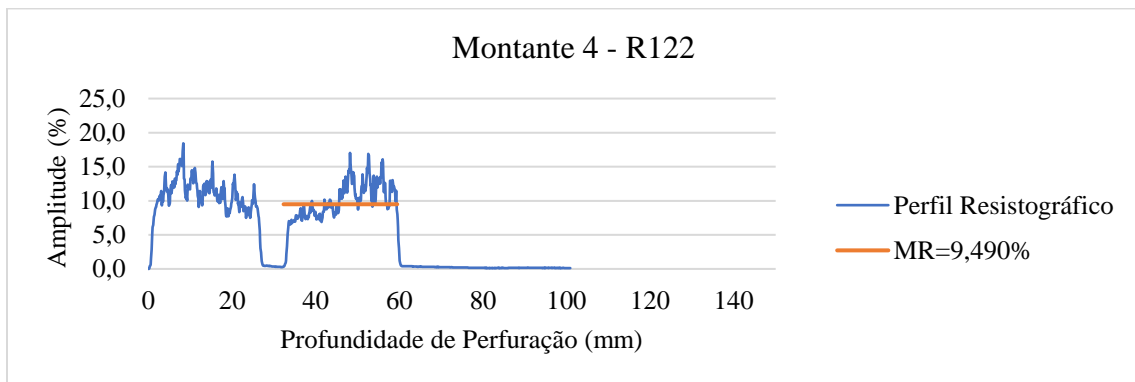
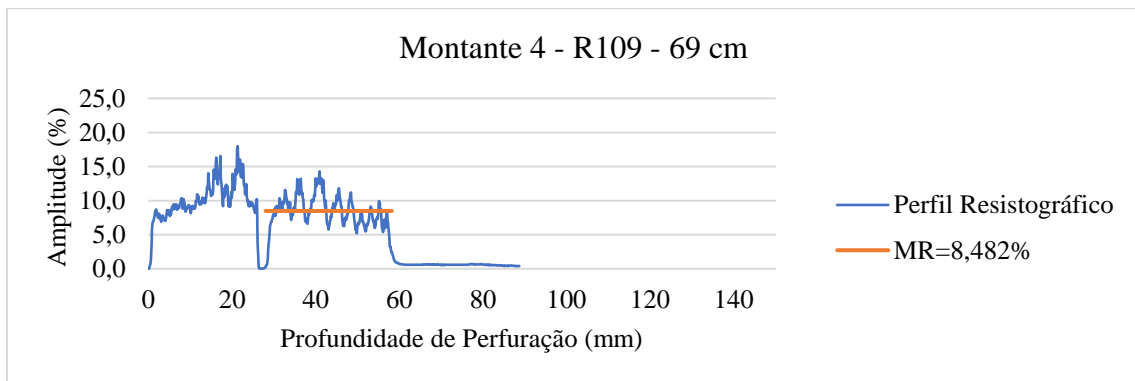
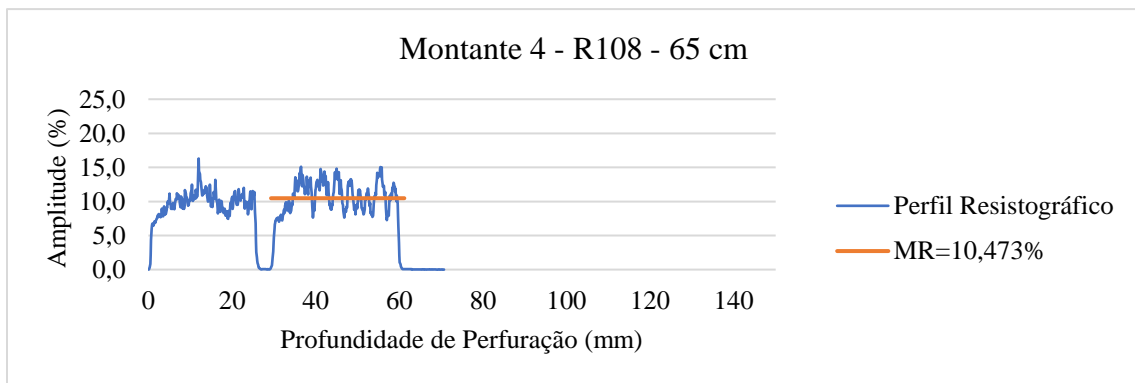
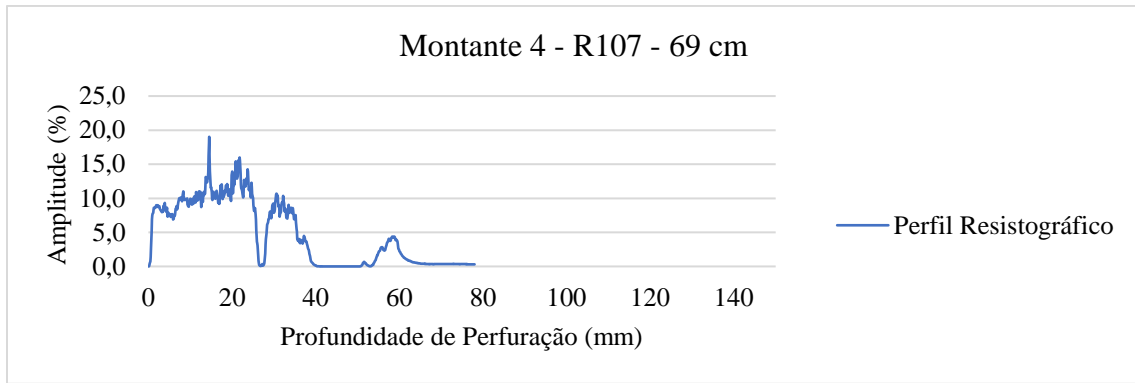
Montante 3

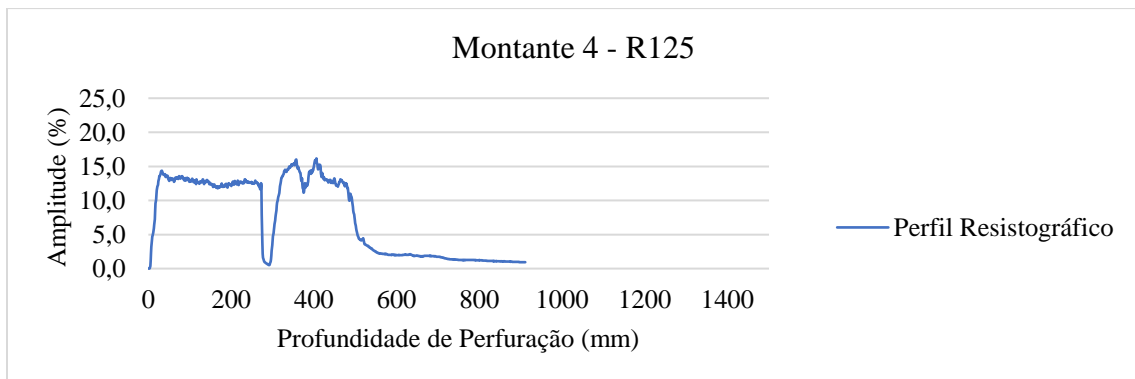
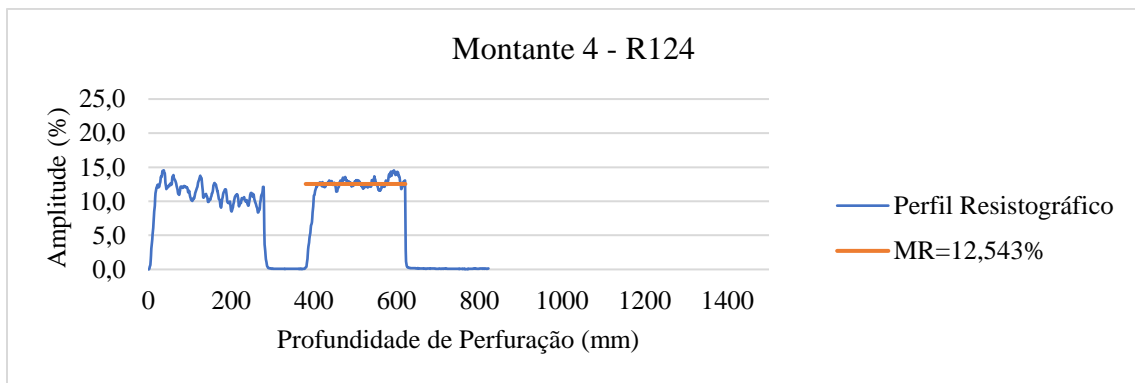
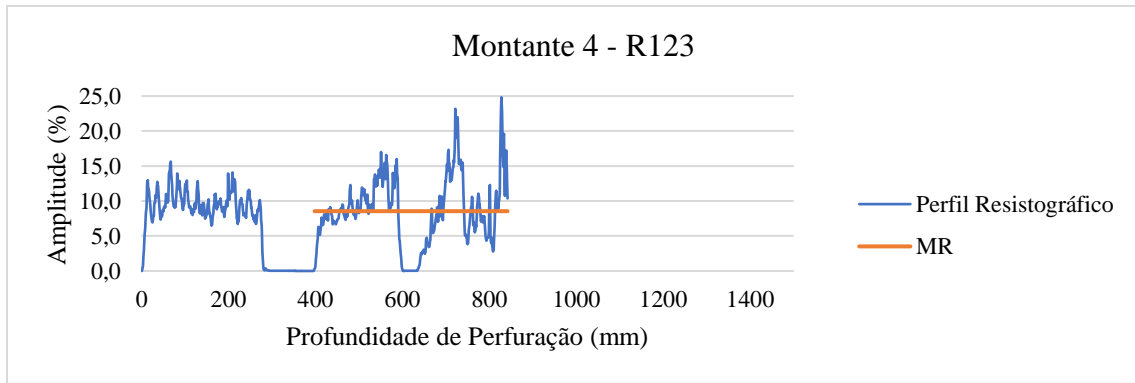




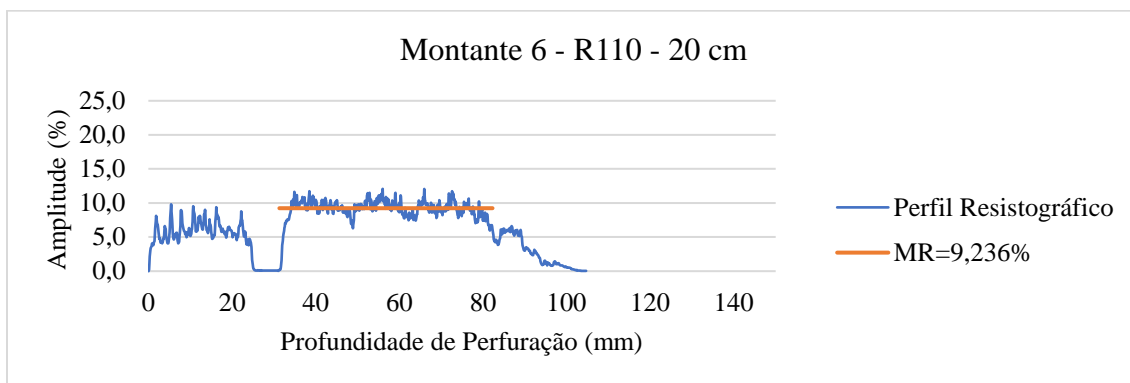
Montante 4



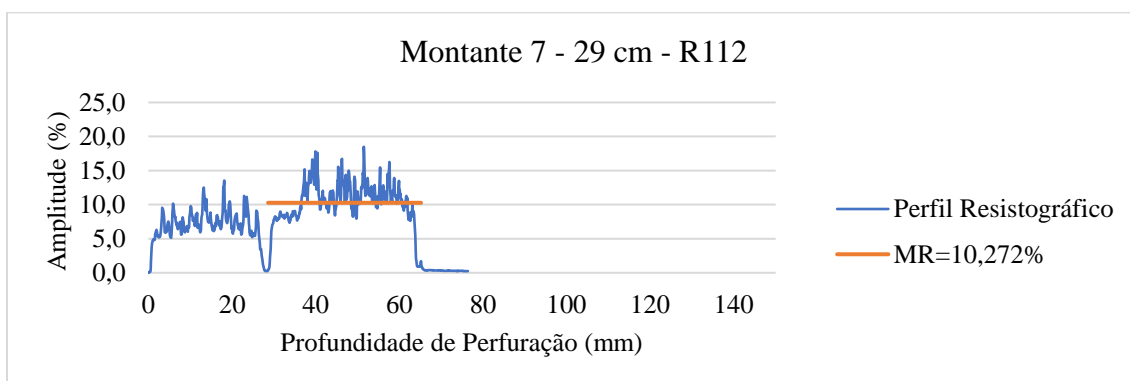
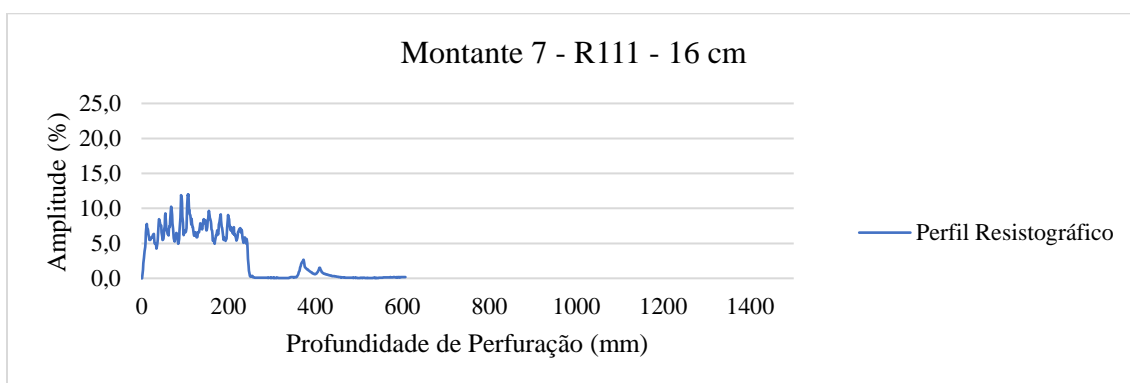




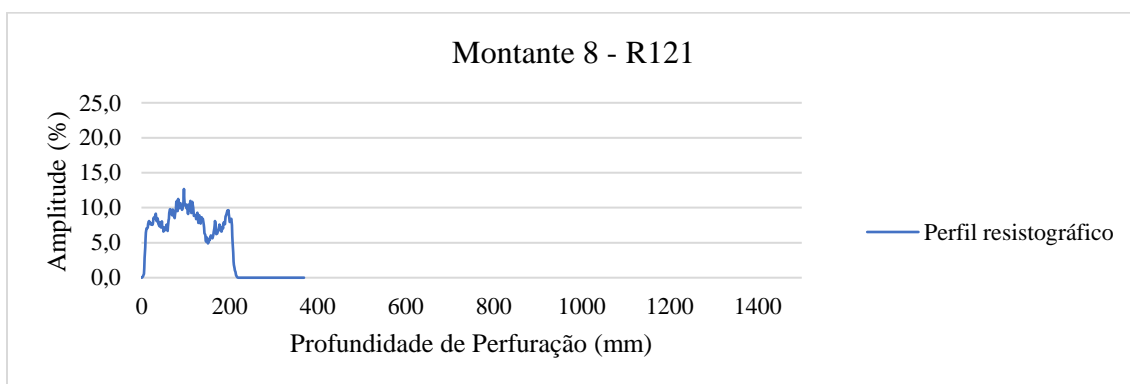
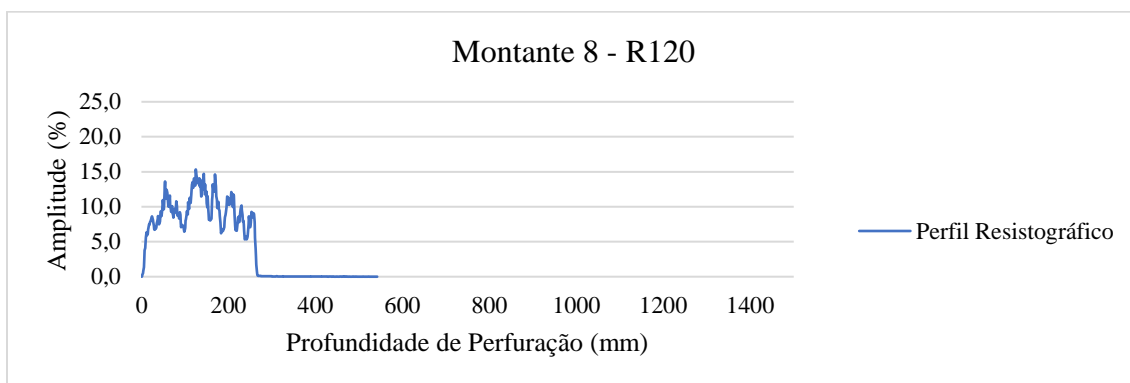
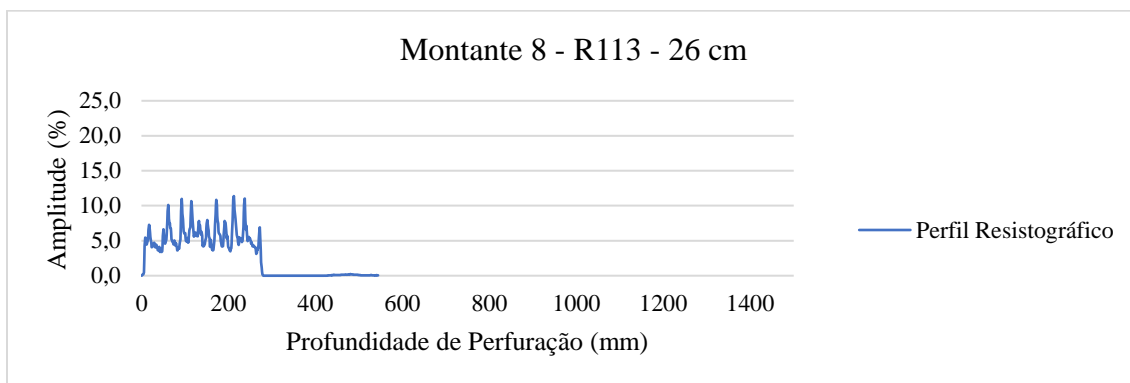
Montante 6



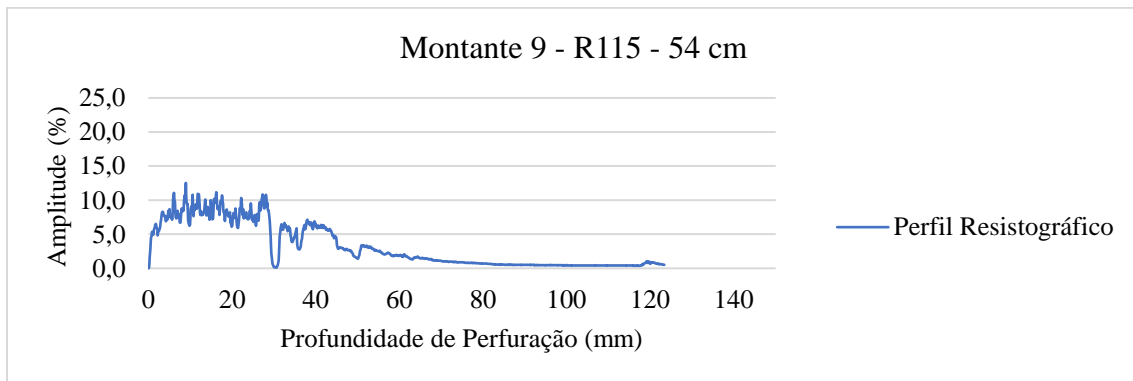
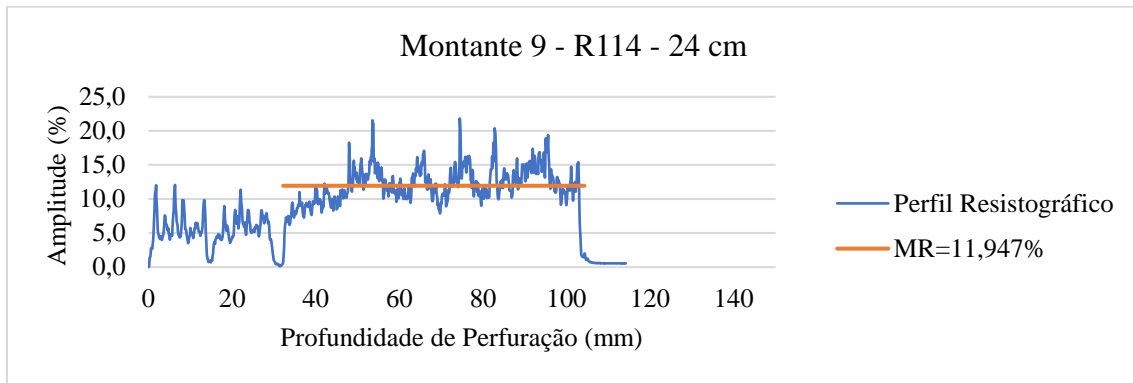
Montante 7



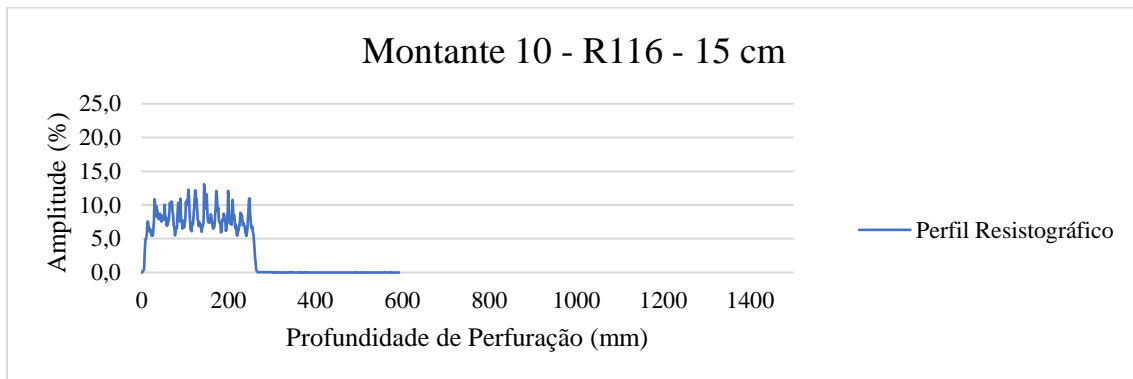
Montante 8

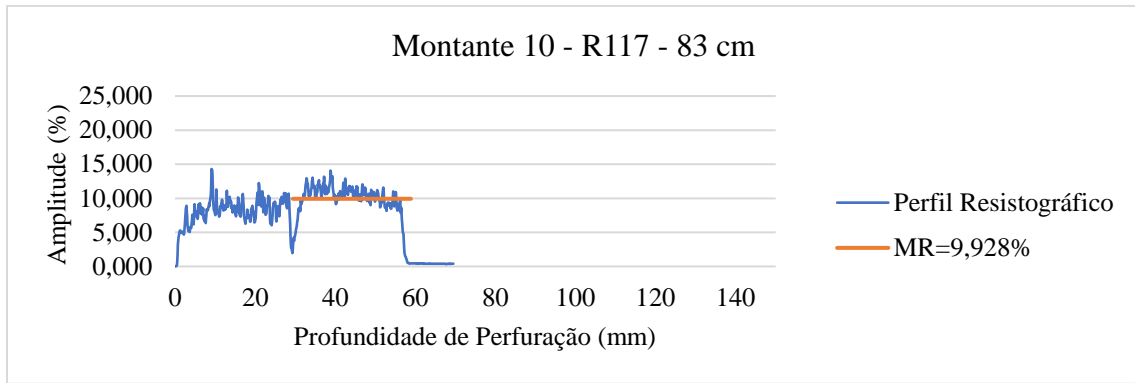


Montante 9

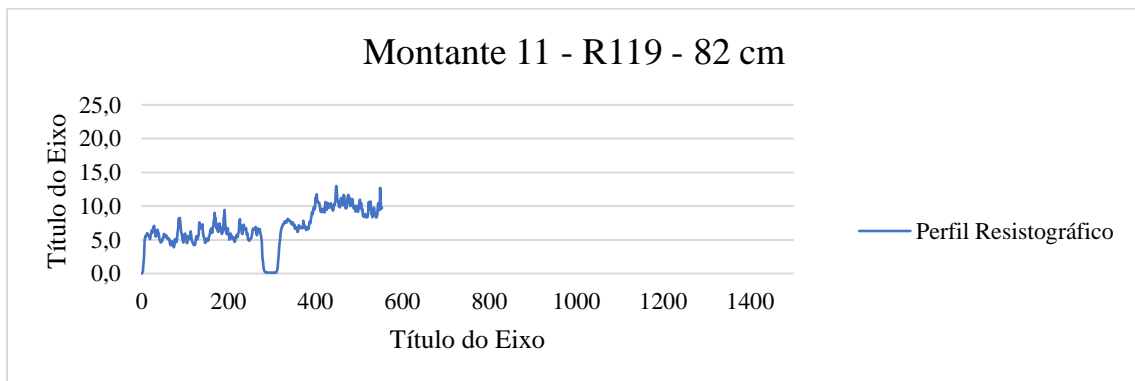
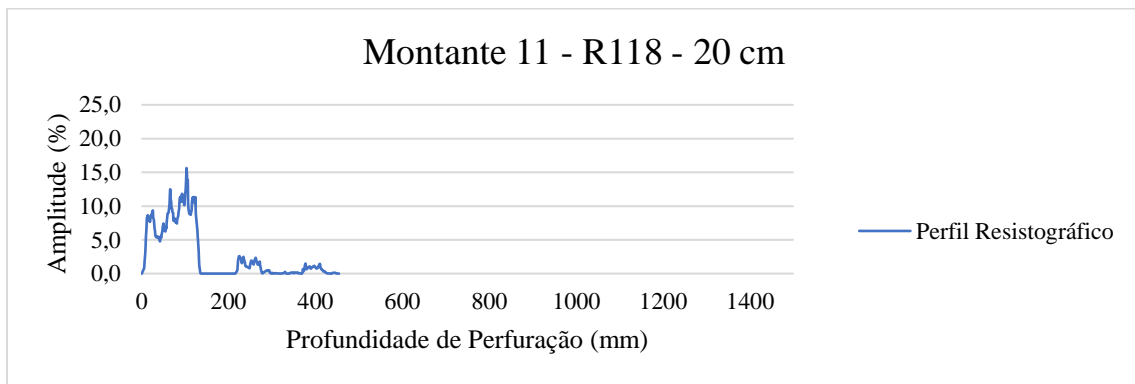


Montante 10



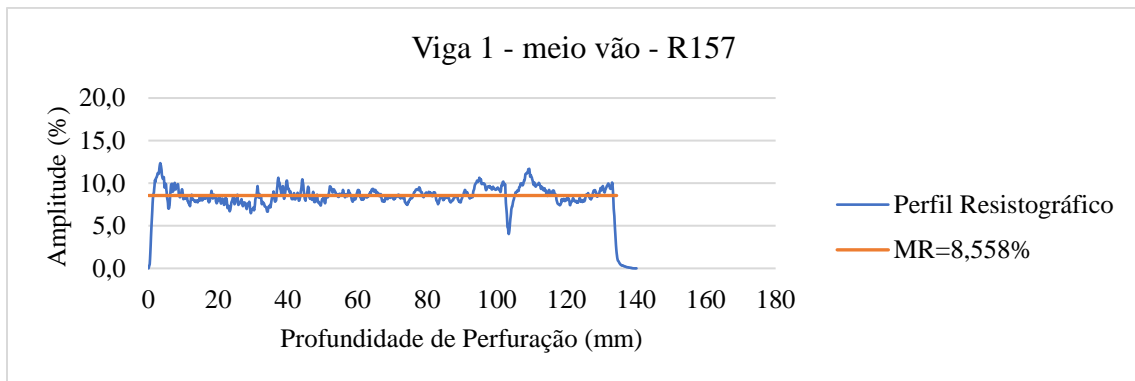
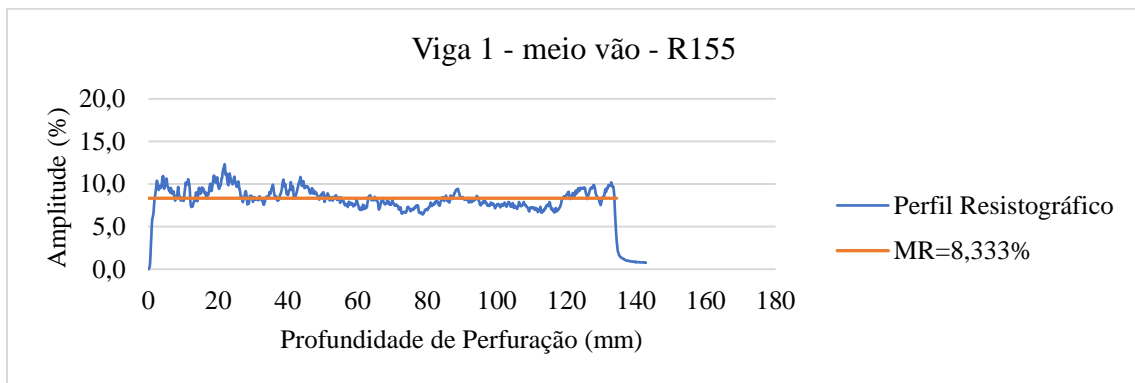
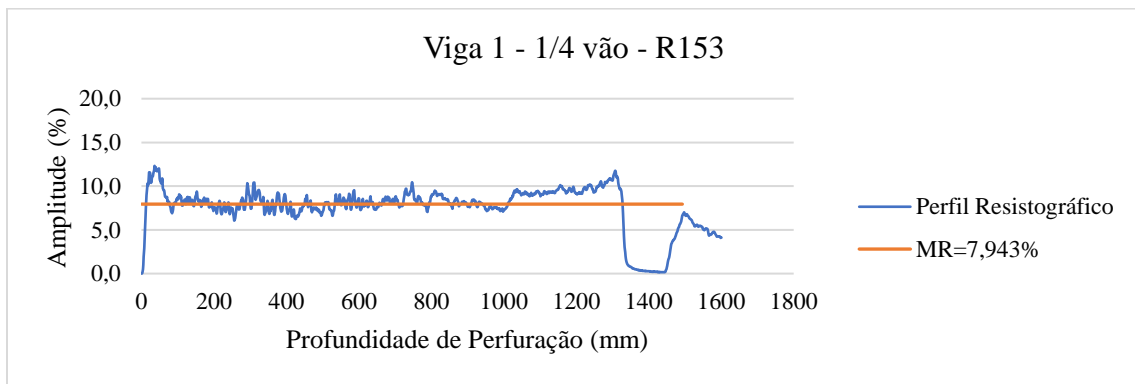
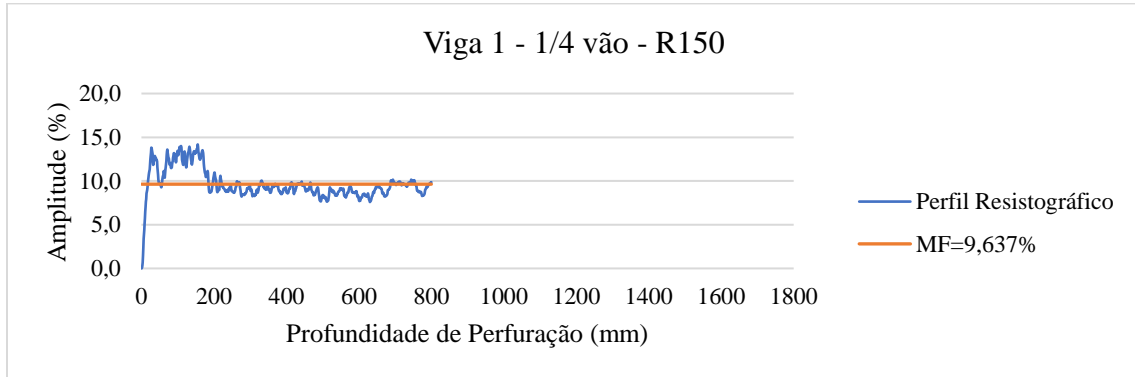


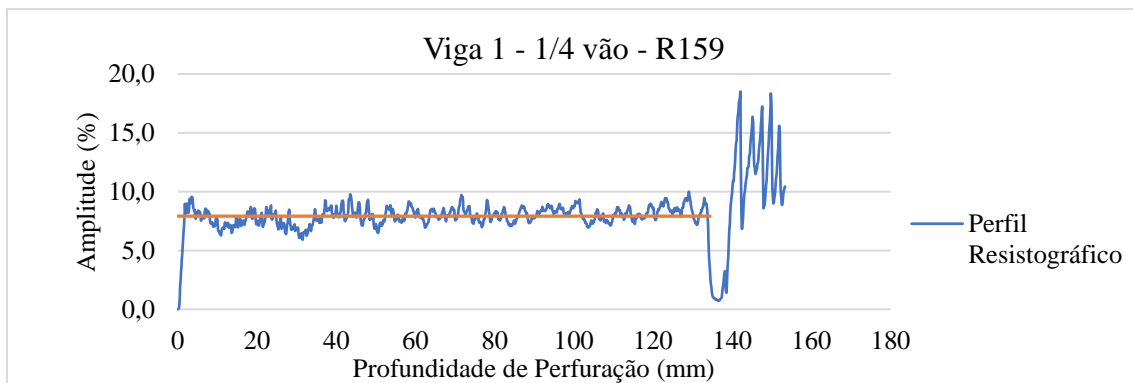
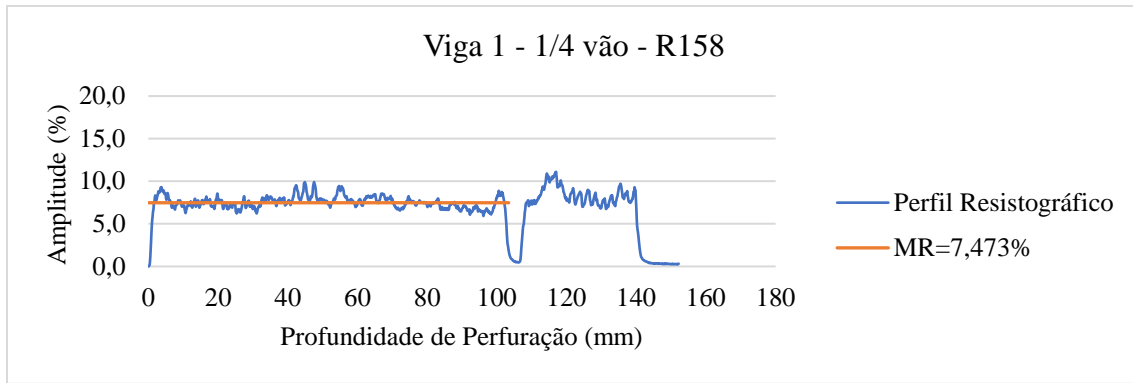
Montante 11



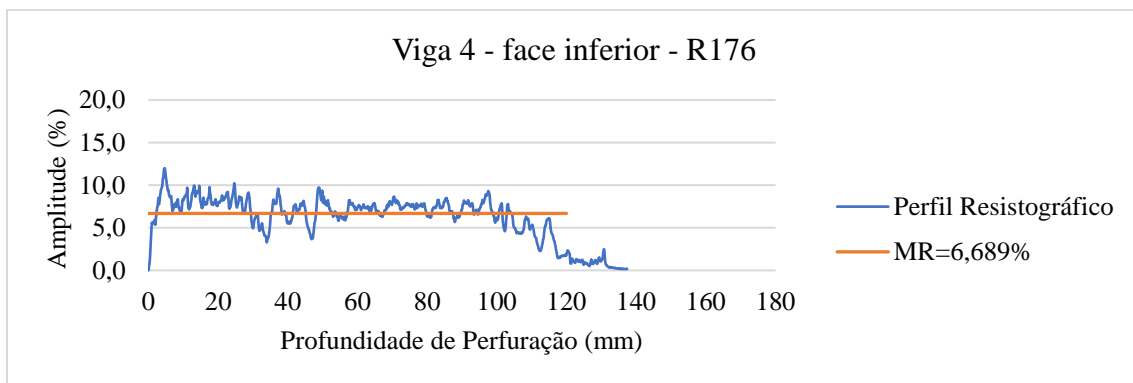
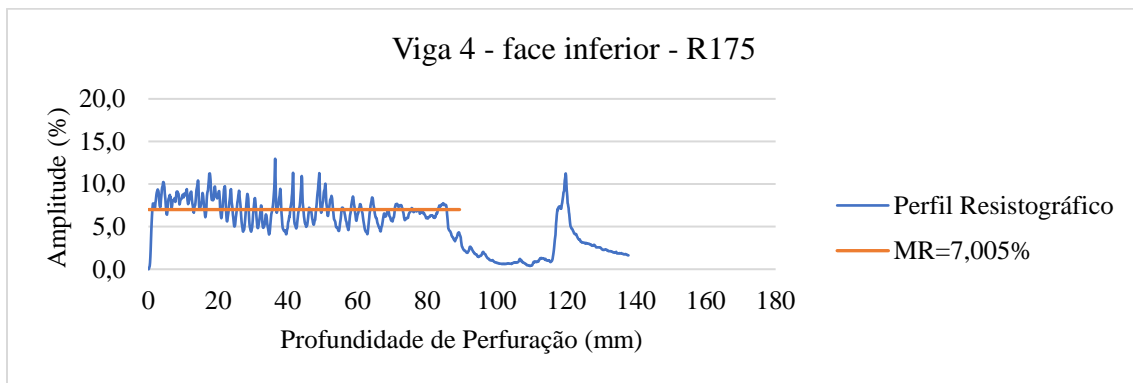
VIGAS DA TRIBUNA

Viga V1

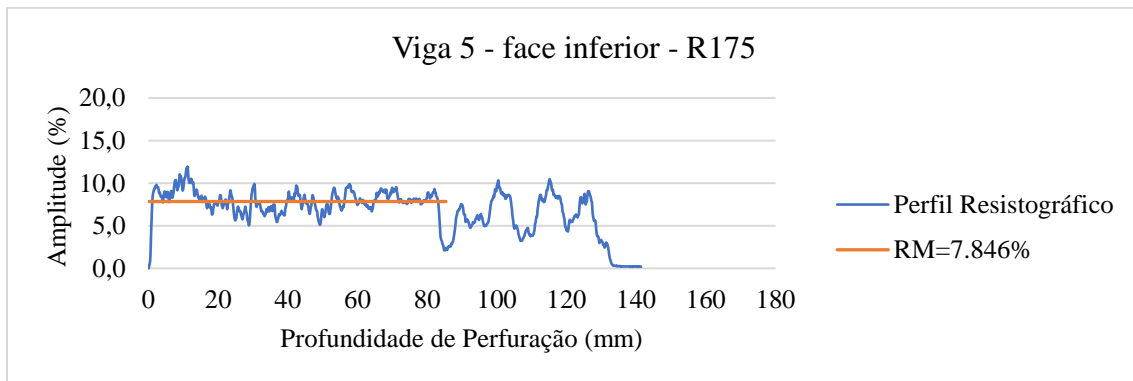
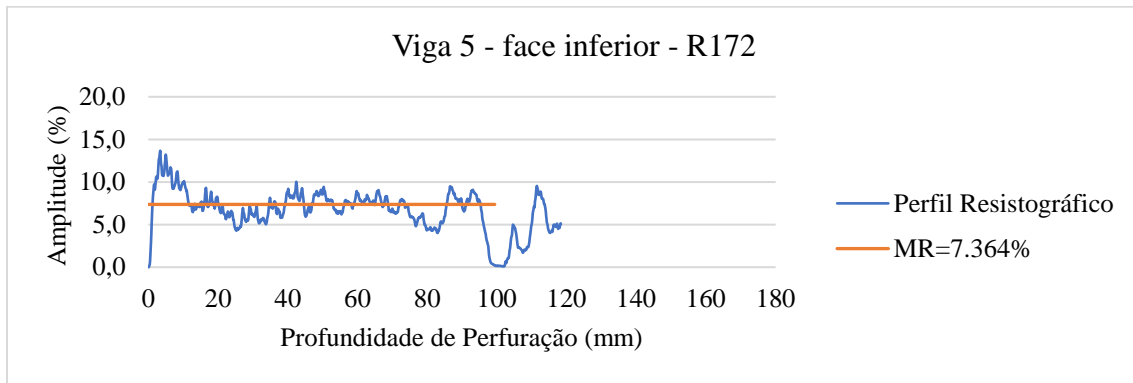




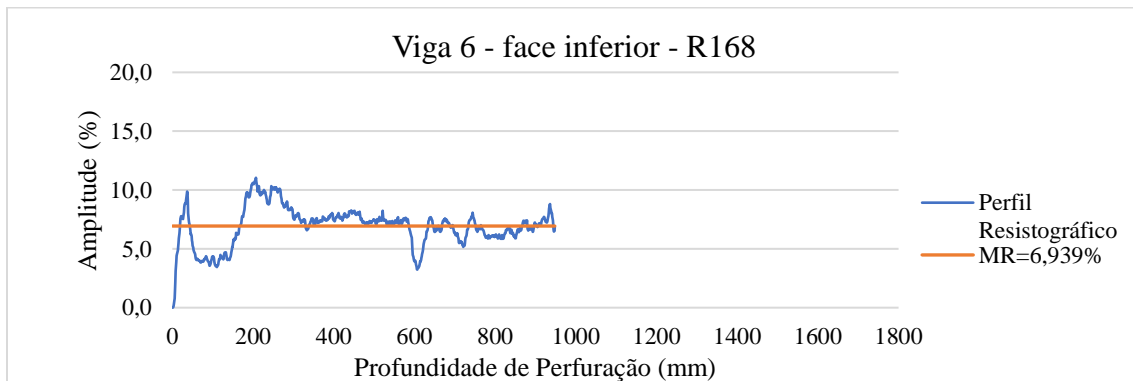
Viga 4



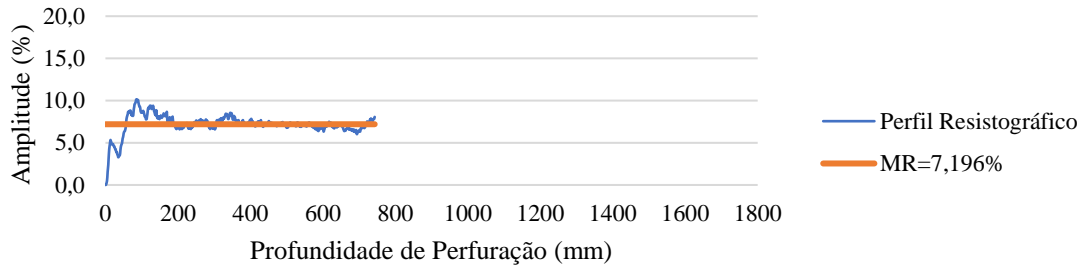
Viga 5



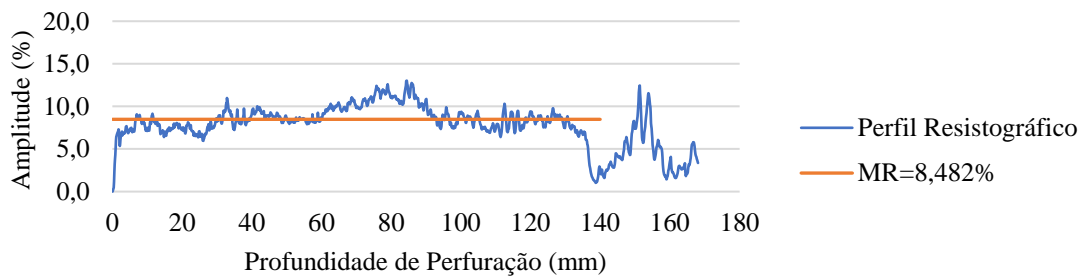
Viga 6



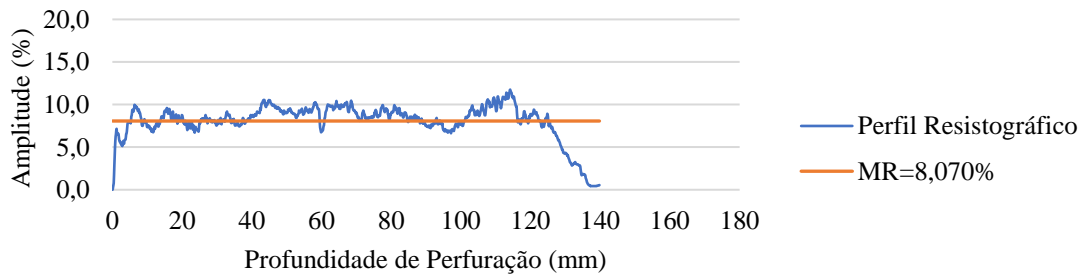
Viga 6 - face inferior - R169



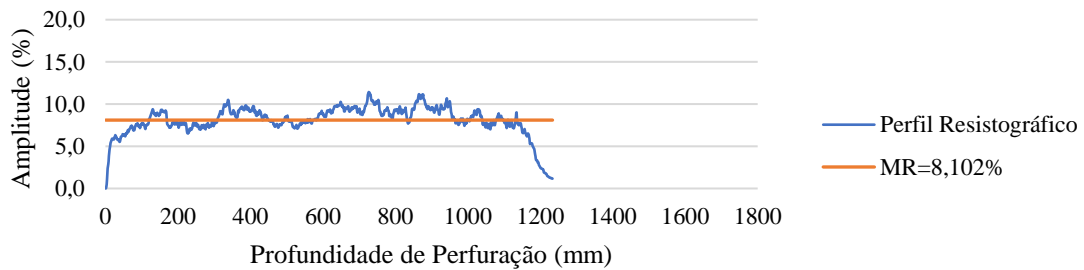
Viga 6 - face inferior - R 180

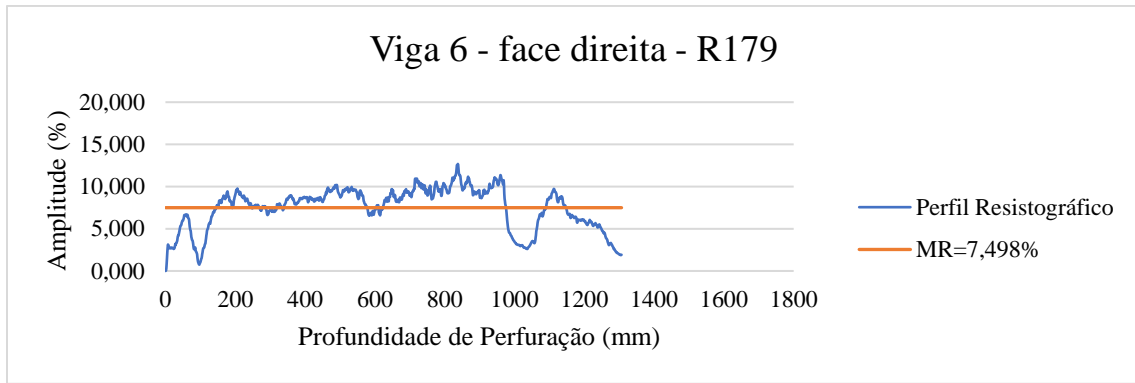


Viga 6 - face inferior - R182



Viga 6 - face direita - R178





Viga 7

