

CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DA MADEIRA DE PINHO BRAVO E DE FREIXO DO NORDESTE TRANSMONTANO



Tese de Mestrado em Engenharia da Construção

Cristiana Daniela Pires Pinto

Orientadoras: Débora Rodrigues de Sousa Macanjo Ferreira

Elza Maria Morais Fonseca

Orientador:

Professora Doutora Débora Rodrigues de Sousa Macanjo Ferreira

IPB - Bragança

Coorientadora:

Professora Doutora Elza Maria Morais Fonseca

IPB - Bragança

*Tese apresentada na Escola Superior de
Tecnologia e Gestão de Bragança para
efeito de obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Civil*

"A vida é uma peça de teatro que não permite ensaios. Por isso, cante, chore, dance, ria e viva intensamente, antes que a cortina se feche e a peça termine sem aplausos."

Charles Chaplin

AGRADECIMENTOS

Venho por este meio agradecer às várias pessoas que tiveram um papel primordial na realização deste trabalho, porque sem elas o resultado certamente não seria o mesmo.

Antes de tudo, deixo o meu agradecimento cordial à minha orientadora Professora Doutora Débora Rodrigues de Sousa Macanjo Ferreira, por toda disponibilização, pelo incentivo e compreensão nos momentos em que mais necessitei e por todo o empenho e dedicação que mostrou ao longo de todo este trabalho.

À minha coorientadora Professora Doutora Elza Maria Morais Fonseca que com o seu apoio, exigência e dedicação fez com que eu conseguisse chegar e concretizar os meus objetivos neste trabalho.

A todos os meus colegas e amigos, em especial a Paula Borges que de alguma forma estiveram envolvidos neste projeto, pelo seu interesse, atenção e amizade.

À Universidade do Minho, pela disponibilização de meios e de infra-estruturas necessárias à realização deste trabalho, nomeadamente o acesso ao Laboratório de Ensaios de Engenharia Civil.

À Eng^a Luísa e Eng.^o Meireles, dos laboratórios da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança, pela ajuda prestada na elaboração dos provetes e execução dos ensaios à tração necessários à realização do programa experimental.

A todos aqueles que não foram mencionados, mas que tiveram impacto direto ou indireto na concretização deste projeto, o meu muito obrigado.

RESUMO

O conhecimento das características, propriedades e os fatores que influenciam o comportamento físico e mecânico da madeira ajudarão a compreender o comportamento da mesma.

O principal objetivo desta dissertação é conhecer as propriedades físicas e mecânicas de duas espécies de madeira, uma resinosa que é o Pinho e outra folhosa que é o Freixo.

Numa primeira fase pretende-se avaliar a influência do teor de água na estabilidade dimensional da madeira de Pinho e Freixo. Nesta avaliação está integrada a variação da massa e a variação das dimensões no sentido longitudinal e transversal das fibras.

A metodologia utilizada é baseada nas normas portuguesas NP 614 – Determinação do teor de água e NP 615 – Determinação da retração.

Um segundo objetivo desta dissertação consiste na apresentação dos ensaios experimentais de tração no sentido longitudinal e transversal às fibras realizados em provetes de Pinho e Freixo, obtendo-se parâmetros que tentam descrever o seu comportamento mecânico, nomeadamente o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e ainda a resistência à tração paralela ao fio.

Estes parâmetros são particularmente relevantes quando se pretende efetuar análises numéricas de estruturas, como é objetivo futuro.

Em outra das fases foi feita a análise numérica realizada para determinar a resistência à tração da madeira de Pinho e Freixo, nas direções ortotrópicas. O modelo de elemento finito foi feito em 3D e foi usada para avaliar as tensões, deformações e forças.

Por fim foi comparado os resultados obtidos com os ensaios há tração da análise numérica com os ensaios experimentais.

PALAVRAS-CHAVE: Madeira, Pinho, Freixo, variação dimensional, tração.

ABSTRACT

The knowledge of the characteristics, properties and the factors that influence the physical and mechanical behavior of wood help you understand the behavior of wood.

The main objective of this work is to understand the physical and mechanical properties of two wood species, which is a resinous pine and other hardwood that is Ash.

In the first phase aims to assess the influence of water content on the dimensional stability of wood Pine and Ash. This assessment is integrated with mass variation and the variation of the dimensions in the longitudinal and transverse direction of the fibers.

The methodology used is based on Portuguese standards NP 614 - Determination of water content and NP 615 - Determination of shrinkage.

A second objective of this work is to present the experimental tensile tests in the longitudinal and transverse direction to the fibers made in Pine and Ash specimens, obtaining parameters that attempt to describe the mechanical behavior, in particular the elastic modulus, Poisson's ratio and also the shear strength to the wire.

These parameters are particularly relevant when you want to perform numerical analysis structures. In the last phase of this work was performed a numerical analysis to determine the tensile strength of wood Pine and Ash. The finite element model was done in 3D and was used to evaluate the stresses and deformation forces.

Finally the numerical results obtained were compared with experimental tests.

CONTEÚDO

RESUMO	5
ABSTRACT	6
CAPÍTULO I.....	16
INTRODUÇÃO.....	16
I.1 Considerações gerais	16
I.2 Objetivos propostos	17
I.3 Conteúdo e organização da dissertação	17
ESTADO DO CONHECIMENTO	18
II.1 Historial da madeira	18
II.2 Características gerais da madeira	19
II.3 Nomenclatura genérica.....	20
II.4 Fisiologia e crescimento das árvores	23
II.5 Estrutura microscópica da madeira	27
II.6 Estrutura da parede celular	29
II.7 Composição química	30
II.8 Identificação e classificação da madeira	31
II.9 Defeitos da madeira.....	31
II.10 Propriedades físicas e mecânicas da madeira.....	33
II.11 Fatores que condicionam as propriedades da madeira	34
II.12 Presença de água na madeira.....	36
II.13 Retração e inchamento/expansão	38
II.14 Transporte de água na madeira.....	39
CAPÍTULO III	41
PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	41
III.1 Ensaio de variação dimensional	41
III.1.1 Preparação dos provetes	41

III.1.2 Material e Equipamento	43
III.1.3 Procedimentos de ensaio	44
III.2 ENSAIOS À TRAÇÃO	47
III.2.1 Preparação dos provetes	47
III.2.2 Equipamento.....	50
III.2.3 Procedimentos de ensaio	52
CAPÍTULO IV	55
RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA OS ENSAIOS DA VARIAÇÃO DIMENSIONAL	55
IV.1 Variação dimensional	55
IV.1.1 Variação dimensional na direção radial	56
IV.1.2 Variação dimensional na direção tangencial.....	58
IV.1.3 Variação dimensional na direção longitudinal.....	61
IV.1.4 Variação da Massa	63
IV.1.5 Massa Volúmica.....	66
IV.1.6 Teor em água.....	69
IV.1.7 Densidade.....	74
CAPÍTULO V	79
RESISTÊNCIA MECÂNICA À TRAÇÃO	79
V.1 Determinação do coeficiente de Poisson	79
V.2 Resistência mecânica à tração.....	80
V.2.1 Análise do Freixo na direção longitudinal às fibras	81
V.2.2 Análise do Freixo na direção transversal às fibras	84
V.2.3 Análise do Pinho na direção longitudinal às fibras	87
V.2.4 Análise do Pinho na direção transversal às fibras	89
V.2.5 Módulo de Elasticidade	91
CAPÍTULO VI.....	93

SIMULAÇÃO NUMÉRICA	93
VI.1 Observações sobre o modelo numérico	93
VI.2 Modelação geométrica.....	94
VI.3 Malha dos elementos finitos	95
VI.4 Condições de carregamento.....	96
VI.5 Propriedades mecânicas e curvas dos materiais	96
VI.6 Resultados para o Freixo na direção longitudinal às fibras	99
VI.7 Resultados para o Freixo na direção transversal às fibras	104
VI.8 Resultados para o Pinho na direção longitudinal às fibras	108
VI.9 Resultados para o Pinho na direção transversal às fibras	111
CAPÍTULO VII.....	114
COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS NOS ENSAIOS À TRAÇÃO.....	114
VII.1 Madeira de Freixo na direção longitudinal às fibras	114
VII.2 Madeira de Freixo na direção transversal às fibras	115
VII.3 Madeira de Pinho na direção longitudinal às fibras	117
VII.4 Madeira de Pinho na direção transversal às fibras	118
CAPÍTULO VIII	120
VIII.1 Considerações finais	120
VIII.2 Desenvolvimentos futuros	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Objetos de madeira produzidos pelo homem.....	19
Figura 2 - Árvore resinosa, [9].	20
Figura 3 - Árvore folhosa, [2].....	21
Figura 4 - Diversos tipos de folhas, [2].	21
Figura 5 - Casquinha, Pinheiro bravo, Abeto	22
Figura 6 - Faia, Freixo, Buxo	23
Figura 7 - Corte esquemático [2] e corte transversal do caule de uma árvore [3].....	24
Figura 8 - Direções de simetria anatómica da madeira	26
Figura 9 - Aspeto microscópico da madeira das resinosas [3]	27
Figura 10 - Representação esquemática dos planos fundamentais da madeira das resinosas, [2].....	28
Figura 11 - Aspeto microscópico da madeira das folhosas [3]	28
Figura 12- Representação esquemática dos planos fundamentais da madeira das folhosas	29
Figura 13- Constituição da parede celular, [3]	30
Figura 14- Estrutura microscópica, [6].....	37
Figura 15 - Secagem da madeira na estufa.....	41
Figura 16 - Controlador de temperatura e humidade.....	42
Figura 17 - Prancha de madeira.....	43
Figura 18 - Provette tipo	43
Figura 19 - Corte da madeira.....	43
Figura 20 - Paquímetro e Balança	43
Figura 21 - Câmara climática e estufa	44
Figura 22 - Provetes marcados	44
Figura 23 - a) saturação dos provetes, b) secagem dos provetes e c) disposição dos provete em estufa.....	45
Figura 24 - Direções em relação às fibras	46
Figura 25 - a) Provetes saturados, b) provetes secos e c) medições de dimensões	46
Figura 26 - a) Provetes secos, b) provetes saturados e c) medição da massa.....	47
Figura 27 - Provete cortado no sentido longitudinal às fibras.....	48
Figura 28 - Provete cortado no sentido transversal às fibras.....	48
Figura 29 - Máquina onde foram maquinados os provetes	48

Figura 30 - Esquema do provete.....	49
Figura 31 - Maquinagem dos provetes	49
Figura 32 - Provetes depois de maquinados	50
Figura 33 - Câmara húmida Provetes na câmara húmida.....	50
Figura 34 - INSTRON 4485 e extensómetros elétricos.....	51
Figura 35 - Medição dos provetes e Colagem dos extensómetros	51
Figura 36 – Provetes instrumentados	52
Figura 37 - Provetes de Pinho longitudinal e transversal	52
Figura 38 - Provetes de Freixo longitudinal e transversal	53
Figura 39- Provette na máquina de ensaio e rotura do provete	53
Figura 40- Aparelho onde os extensómetros são ligados	54
Figura 41 - Variação dimensional na direção radial em função do tempo	56
Figura 42 - Variação dimensional na direção radial em função do tempo (com o 3º ciclo).....	57
Figura 43 - Variação dimensional na direção tangencial em função do tempo.....	59
Figura 44 - Variação dimensional na direção tangencial em função do tempo (com o 3º ciclo).....	60
Figura 45 - Variação dimensional na direção longitudinal em função do tempo.....	61
Figura 46 -Variação dimensional na direção longitudinal em função do tempo (com o 3º ciclo).....	62
Figura 48 - Variação da massa em função do tempo (com 3º ciclo).....	64
Figura 49 - Média das massas obtidas	65
Figura 50 - Relação entre as horas e massa volúmica	67
Figura 51 - Teor em água em função do tempo dos provetes secos	70
Figura 52 - Teor em água em função do tempo dos provetes saturados	71
Figura 53 - Variação dimensional em função do teor em água.....	72
Figura 54 - Variação dimensional em função do teor em água.....	73
Figura 55 - Massa volúmica em função do teor em água.....	74
Figura 56 - Variação da densidade do Pinho em função do tempo	75
Figura 57 - Variação da densidade do Freixo em função do tempo	76
Figura 58 - Densidade dos provetes secos e saturados.....	77
Figura 59 - Esquema das dimensões dos provetes	81
Figura 60 - Relação tensão-deformação para os provetes de Freixo na direção longitudinal.....	82

Figura 61 - Rotura típica nos provetes de madeira (a) lascado; (b) combinação de tração com corte; (c) corte; (d) tração pura [6]	83
Figura 62- Tipos de rotura observados no ensaio: (a) lascado; (b) combinação de tração com corte; (c) corte.....	83
Figura 63- Relação tensão-deformação para os provetes de Freixo segundo a direção transversal.....	85
Figura 64 - Tipos de rotura observados no ensaio: (d) tração pura [6]	86
Figura 65- Relação tensão-deformação para os provetes de Pinho segundo a direção longitudinal.....	87
Figura 66 - Tipos de rotura observados no ensaio: (a) lascado; (c) corte.....	88
Figura 67- Relação tensão-deformação para os provetes de Pinho segundo a direção longitudinal.....	89
Figura 68-Tipos de rotura observados no ensaio: (d) tração pura [6]	90
Figura 69- Valores médios do módulo de Elasticidade.....	91
Figura 70- Dimensões dos provetes com as fibras no sentido longitudinal ao cerne....	94
Figura 71- Dimensões dos provetes com as fibras no sentido longitudinal ao cerne....	94
Figura 72- Modelo 3D no ANSYS	94
Figura 73- Elemento SOLID 186	95
Figura 74- Malha de elementos finitos.....	95
Figura 75 - Condições de fronteira e carregamento dos modelos em estudo	96
Figura 76- Modelo com os dois tipos de material.....	97
Figura 77- Gráficos do Freixo e Pinho longitudinal.....	98
Figura 78 - Gráficos do Freixo e Pinho transversal.....	98
Figura 79- Deslocamento vertical U_{zz} , [mm]	99
Figura 80- Deformação total.....	100
Figura 81 -Tensão-Deformação (FL)	104
Figura 82- Deslocamento vertical U_{zz} , [mm]	105
Figura 83- Deslocamento horizontais U_{xx} , [mm]	105
Figura 84- Deformação total [mm].....	106
Figura 85 - Tensão-Deformação FT	107
Figura 86 - Deslocamento vertical U_{zz} , [mm]	108
Figura 87- Deslocamento horizontais U_{xx} , [mm]	108
Figura 88- Deformação total.....	109
Figura 89 - Tensão-Deformação (PL)	111

Figura 90- Deslocamento vertical U_{zz} , [mm]	111
Figura 91- Deslocamento horizontais U_{xx} , [mm]	112
Figura 92- Tensão- Deformação (PT)	113
Figura 93- Gráfico tensão-deformação para os provetes de Freixo segundo a direção longitudinal.....	114
Figura 94- Gráfico tensão-deformação para os provetes de Freixo segundo a direção transversal.....	116
Figura 95- Gráfico tensão-deformação para os provetes de Pinho segundo a direção longitudinal.....	117
Figura 96 - Gráfico tensão-deformação para os provetes de Pinho segundo a direção transversal.....	118

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Nomenclaturas referentes aos ciclos e às espécies de madeira	55
Tabela 2 – Síntese dos valores obtidos para a variação dimensional segundo a direção radial	58
Tabela 3 – Síntese dos valores obtidos para a variação dimensional segundo a direção tangencial.....	60
Tabela 4 – Síntese dos valores obtidos para a variação dimensional segundo a direção longitudinal.....	62
Tabela 5 – Síntese dos valores da variação da massa.....	65
Tabela 6 – Síntese dos valores da massa	66
Tabela 7 - Massa volúmica de referência	68
Tabela 8- Síntese dos valores do teor em água dos provetes secos	70
Tabela 9 - Síntese dos valores do teor em água dos provetes saturados	71
Tabela 10- Teores de água de equilíbrio	72
Tabela 11 - Densidade das principais madeiras resinosas de Portugal [15].....	76
Tabela 12 - Densidade das principais madeiras folhosas de Portugal [15]	77
Tabela 13 - Nomenclaturas referentes às espécies da madeira.....	79
Tabela 14 - Coeficiente de Poisson	80
Tabela 15 - Dimensões dos provetes	81
Tabela 16 - Valores de rotura dos provetes	82
Tabela 17- Síntese dos valores obtidos.....	84
Tabela 18- Dimensões dos provetes	84
Tabela 19 - Valores de rotura dos provetes	85
Tabela 20 - Síntese dos valores obtidos.....	86
Tabela 21 - Dimensões dos provetes	87
Tabela 22 - Valores de rotura dos provetes	88
Tabela 23-Síntese dos valores obtidos	88
Tabela 24 -Dimensões dos provetes	89
Tabela 25- Valores de rotura dos provetes	90
Tabela 26- Síntese dos valores obtidos.....	91
Tabela 27- Propriedades elásticas dos materiais	97
Tabela 28- Curvas tensão-deformação	98
Tabela 30 - Deformação total (FL).....	101

Tabela 31- Força calculada ao longo do carregamento (FL).....	103
Tabela 32 - Deformação total (FT).....	106
Tabela 33 - Força calculada ao longo do carregamento (FT).....	107
Tabela 34- Deformação total (PL).....	110
Tabela 35- Força calculada ao longo do carregamento (PL).....	110
Tabela 36 - Deformação total (PT).....	112
Tabela 37- Força calculada ao longo do carregamento (PT).....	113
Tabela 37- Valores de rotura dos provetes	115
Tabela 38- Valores da força máxima.....	115
Tabela 39 - Valores de rotura dos provetes	116
Tabela 40- Valores da força máxima.....	117
Tabela 41- Valores de rotura dos provetes	118
Tabela 42- Valores da força máxima.....	118
Tabela 43 - Valores de rotura dos provetes	119
Tabela 44 - Valores da força máxima.....	119

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

I.1 Considerações gerais

A madeira é uma matéria-prima importante e versátil em vários setores da atividade humana podendo ser aplicada em diversas situações. É um material produzido a partir do tecido formado pelas plantas lenhosas, orgânico, sólido e de composição complexa. É naturalmente resistente e relativamente leve, sendo frequentemente utilizado na construção civil para fins estruturais e não estruturais.

O desenvolvimento tecnológico mundial da madeira cresceu substancialmente nas últimas décadas. Consequência disso, a industrialização das construções em madeira tem, igualmente, aumentado. A aplicação da madeira como material estrutural exige um domínio do conhecimento da sua estrutura interna relativamente às diferentes espécies existentes. Paralelamente, o melhor conhecimento das propriedades da madeira permite prever novas perspectivas para um maior e melhor emprego da madeira no setor da construção civil. O desconhecimento dessas propriedades por muitos dos seus usuários é dos principais fatores à pouca aplicação que a madeira tem como elemento estrutural.

A madeira é um material higroscópico, sendo que várias das suas propriedades são condicionadas pelo teor de água presente, apresenta grande variabilidade, resultado da sua origem biológica, exibe uma heterogeneidade significativa e uma anisotropia acentuada.

Por estas razões é de especial interesse a identificação e o conhecimento das características anatómicas das espécies de madeira nas peças que posteriormente serão usadas para diversos fins na construção. A escolha correta da madeira para um determinado uso, deve considerar-se quais as propriedades e os respectivos níveis requeridos para que a esta possa ter um desempenho satisfatório. Adicionalmente, o melhor conhecimento das propriedades da madeira permite prever novas perspectivas para um maior e mais efetivo emprego da madeira na construção civil.

I.2 Objetivos propostos

Pretende-se com este trabalho avaliar a influência da água na estabilidade dimensional da madeira mais comum em Portugal, o Pinho Bravo e o Freixo. Nesta avaliação está integrada a variação da massa e ainda a variação das dimensões no sentido transversal e longitudinal. É avaliado também o teor em água, a massa volúmica e densidade de cada uma das espécies.

A metodologia utilizada é baseada nas normas portuguesas NP 614 – Determinação do teor de água, [7] NP 615 – Determinação da retração e ponto de saturação das fibras, [11] e NP616- Determinação da massa volúmica, [8].

I.3 Conteúdo e organização da dissertação

Esta dissertação está dividida em 7 Capítulos e Referencias Bibliográficas.

O primeiro capítulo é dedicado à introdução onde são apresentadas considerações gerais acerca do uso da madeira na construção e os objetivos a que esta dissertação se propõe

O capítulo II é dedicado ao estado do conhecimento onde se identificam as bases teóricas nas quais todo o processo experimental se apoia. É feita uma revisão dos mais significativos ensaios experimentais na análise das propriedades da madeira.

O capítulo III é dedicado à metodologia e ao estudo experimental para a determinação da variabilidade dimensional e resistência à tração.

No capítulo IV apresentam-se os resultados experimentais e correspondente discussão relativa aos ensaios de variação dimensional.

No capítulo V apresentam-se os resultados experimentais e correspondente discussão relativa aos ensaios de tração.

No capítulo VI é feita a análise de elementos finitos

No capítulo VII é feita a comparação dos resultados dos ensaios a tração

Por último no capítulo VIII apresentam-se as principais conclusões e sugerem-se de possíveis desenvolvimentos futuros.

CAPÍTULO II

ESTADO DO CONHECIMENTO

A madeira é um dos poucos recursos naturais renováveis. A floresta possui uma inquestionável importância na economia nacional, sendo hoje reconhecido o papel primordial dos produtos de madeira como instrumentos essenciais para a luta contra as alterações climáticas, contribuindo assim para aquilo a que se denomina uma construção sustentável.

A promoção crescente do uso dos produtos de madeira, a defesa e fomento dos recursos florestais, enquanto fonte de riqueza e bem-estar para toda a comunidade, é, pois, uma prioridade, que mobiliza toda a sociedade. A indústria de carpintaria em Portugal é um sector com grande tradição e experiência e com uma assinalável flexibilidade, o que permite adaptar as ideias e o *design* propostos pelo cliente à especificidade das obras encomendadas.

A madeira de Pinho Bravo e Freixo é utilizada na construção em diversas funções, quer estruturais quer não estruturais, exposta a diferentes ambientes (temperatura e humidade relativa do ar) e situações de risco de degradação biológica. Todos estes condicionalismos traduzem-se em exigências de resistência mecânica, de durabilidade, de estabilidade dimensional e de natureza estética muito distintas.

II.1 Historial da madeira

Desde a antiguidade que a técnica e a arte de trabalhar a madeira tem evoluído desde um processo manual e primitivo, até à vasta e engenhosa indústria moderna contemporânea. A madeira esteve sempre ao alcance do homem desde os tempos remotos, o qual através da sua imaginação sempre soube tirar proveito dela para execução de inúmeros objetos e produtos. Foi, portanto, um dos primeiros materiais utilizados pelo homem, não só para sua defesa (como arma ou fazendo parte dela), como para se aquecer, cozinhar e iluminar, para construção dos primeiros abrigos, das primeiras jangadas e barcos, etc.

Com o decorrer dos tempos, o homem começa a utilizar a madeira para edificar as cabanas e choupanas, fazendo as paredes de ramos entrelaçados, rebocados ou não, com terra argilosa. Mais tarde, substitui as paredes com pedra ou tijolo cozido ao sol, aplicando a madeira não só na sua cobertura, portas e janelas, bem como na decoração interna e externa.



Figura 1 - Objetos de madeira produzidos pelo homem.

II.2 Características gerais da madeira

Dada a diversidade das espécies de madeira, este material apresenta grande diversidade de características diferenciadoras que pode determinar os usos da madeira. Entre estas características, enumera-se a/o, [1]:

- **Cor** – deriva das substâncias químicas presentes no tronco e varia de acordo com o teor de humidade, normalmente tomando um aspeto mais escuro quando exposta ao ar, ao sol, quando em contato com certos metais ou quando atacada por certos fungos e bactérias. A cor tende a alterar-se com o passar do tempo;
- **Cheiro** – o odor característico de algumas madeiras é resultado da presença de certas substâncias voláteis que se concentram principalmente no cerne.
- **Gosto** – o gosto é originário das mesmas substâncias que dão cheiro às madeiras;
- **Fio** – corresponde à orientação dos elementos verticais constituintes do lenho em relação ao eixo da árvore. As orientações são influenciadas durante o crescimento da árvore;
- **Grão** – impressão visual produzida pelos poros da madeira, podendo ser grosso, médio ou fino;
- **Textura** – depende das dimensões, da distribuição e percentagem dos diversos elementos estruturais constituintes do lenho no seu conjunto;
- **Brilho** – depende da intensidade dos raios medulares. A faixa longitudinal radial é sempre a mais reluzente;
- **Desenho** – corresponde à aparência natural das faces da madeira resultante das várias características macroscópicas.

II.3 Nomenclatura genérica

As árvores a partir das quais se obter madeira podem ser classificadas em dois grandes grupos: as árvores resinosas (coníferas) e as árvores folhosas (folha caduca), [2].

No que se refere ao grupo das árvores resinosas, esta é a designação comum e genérica atribuída aos exemplares das espécies arbóreas de interesse florestal, subtipo "gimnospérmicas", geralmente possuem resina (líquido viscoso produzido junto à casca) e as folhas são do tipo persistentes, isto é, tem folhas que resistem e têm maior durabilidade temporal, podendo resistir no ramo um período que pode atingir os 2 anos. As folhas são do tipo acícula, ou seja, têm forma de agulha, [2]. A constituição deste grupo de árvores depende da espécie, mas pode atingir cerca de trinta metros de altura, sendo de cor verde e amarelo esverdeado. O tronco é direito e robusto, sendo o diâmetro tanto maior quanto mais antiga seja a árvore, [2]. De entre alguns tipos de árvores que se enquadram neste grupo salientam-se os que se identificam com o pinho e os seus diversos tipos (pinheiro bravo e pinheiro manso), [2].

O tipo de madeira em pinho é frequente em qualquer parte do mundo e muito usada na construção e nos diversos ramos da construção civil, sem esquecer a utilização no sector imobiliário, [2]. O grupo das resinosas é constituído por árvores tais como o pinheiro, o cedro, o cipreste, etc.

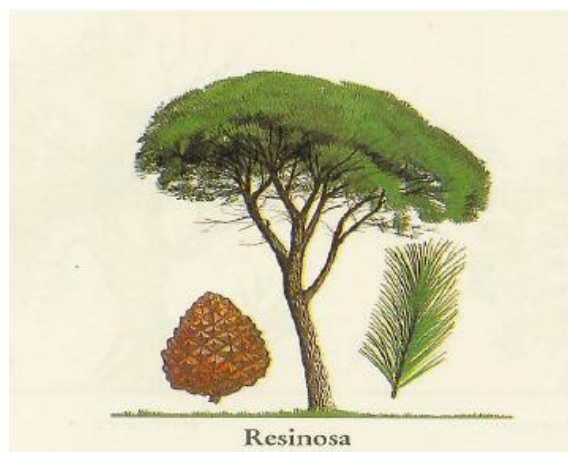


Figura 2 - Árvore resinosa, [2].

No que se refere ao grupo das árvores folhosas, é a designação comum e genérica atribuída aos exemplares das espécies arbóreas de interesse florestal da classe "dicotiledóneas" das Angiospérmicas. Este grupo de árvores podem ser de folha caduca ou perene, em alguns casos, tem uma transição com perda da folha e ou alteração da sua

coloração primária, passando por uma panóplia de cores. As folhas têm configurações distintas de acordo com a natureza, habitat, clima, sendo estas mais ou menos recortadas e podem ser analisadas de acordo com a forma, contorno e nervuras, [2]. A constituição deste grupo depende da espécie, mas atingem alturas variadas de acordo com a tipologia da copa, [2]. De forma geral as folhas são esverdeadas, o tronco é direito e robusto, sendo o seu diâmetro tanto maior quanto mais antiga for a árvore, [2]. O grupo das folhosas é constituído pelas árvores de folha caduca tais como castanheiro, freixo, carvalho, eucalipto, [2].

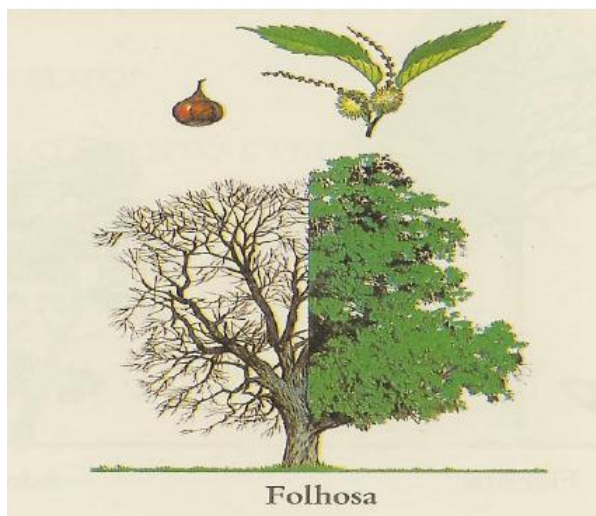


Figura 3 - Árvore folhosa, [2].

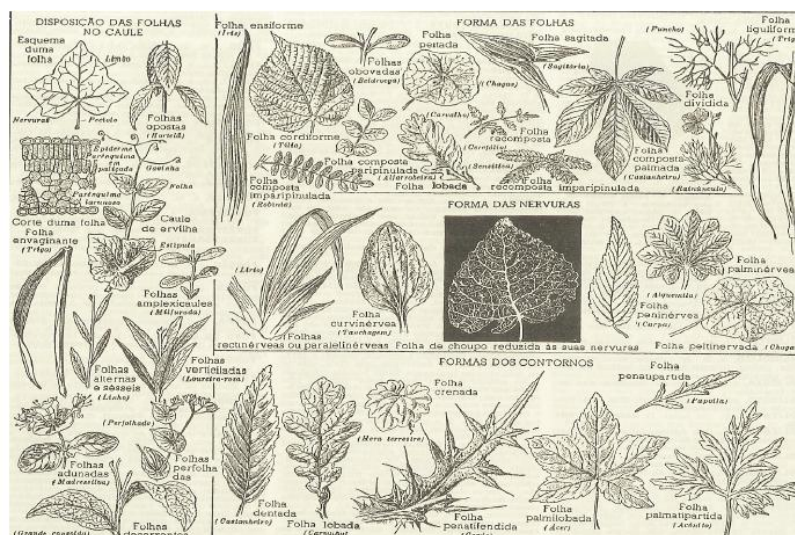


Figura 4 - Diversos tipos de folhas, [2].

Resumindo, quanto à classificação botânica, a madeira pode pertencer a dois grandes grupos [2]:

- ❖ o grupo das "gimnospermas", usualmente chamadas por "coníferas", resinosas, não porosas e ainda "softwoods"
- ❖ o grupo das "angiospermas", também conhecidas como "folhosas", porosas e "hardwoods"

As madeiras obtidas das árvores resinosas, podem ser de 3 tipos, [2]:

- Madeiras tenras ou aligeiradas (ex. abeto)
- Madeiras semi-duras ou semi-pesadas (ex. Pinheiro bravo)
- Madeiras duras ou pesadas (ex. casquinha)



Figura 5 - Casquinha, Pinheiro bravo, Abeto.

As madeiras obtidas das árvores folhosas podem ser de 5 tipos, [2]:

- Madeiras tenras ou muito leves (ex. faia)
- Madeiras tenras ou leves (ex. choupo)
- Madeiras semi-duras ou semi-pesadas (ex. Freixo)
- Madeiras duras ou pesadas (ex. buxo)
- Madeiras duras ou muito pesadas (ex. madeiras exóticas)

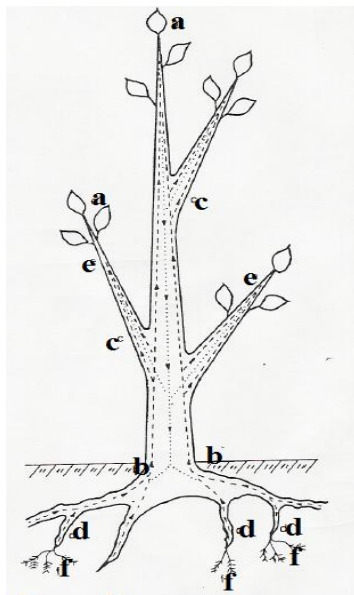


Figura 6 - Faia, Freixo, Buxo.

II.4 Fisiologia e crescimento das árvores

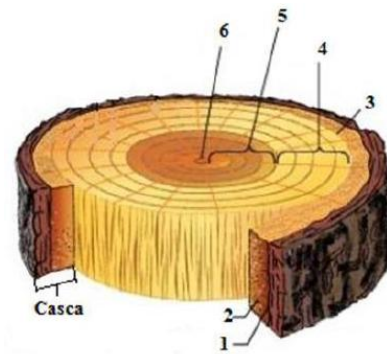
As árvores, são muito delicadas enquanto jovens, são prodigiosos seres vivos que crescem vigorosamente quando as condições de solo e de ambiente são propícias, atingindo algumas vezes dimensões colossais. Portugal apresenta a taxa mais elevada de floresta dos Países Europeus, tendo cerca de três milhões de hectares e possivelmente capacidade para o dobro, [3]. Esquemáticamente (ver Figura 7), a forma da árvore pode considerar-se um eixo vertical, em que a parte superior é a flecha (a) e a inferior a raiz mestra (b), esse eixo tem ramificações inseridas e diferentes alturas designadas de pernas (c) se estas forem acima do solo e raízes secundárias (d) se forem abaixo do solo, [3]. Uma árvore é composta pela raiz, pelo caule e pela copa, [8]. A raiz fixa a árvore do solo e dele retira a água contendo sais minerais dissolvidos, isto é, a seiva bruta que é necessária para o desenvolvimento vegetal, [3]. O tronco, ou caule sustenta a copa com as ramificações e conduz por capilaridade a seiva bruta desde a raiz até as folhas da copa, e a seiva elaborada das folhas para o lenho em crescimento. O tronco é considerado a parte útil para produzir as peças de madeira.

A copa é constituída por as folhas e frutos. É nas folhas que se processa a transformação da água e sais minerais em compostos orgânicos: seiva elaborada.



Legenda:

- a- Flecha
- b- Raiz mestra
- c- Pernadas
- d- Raízes secundárias
- e- Ramos e folhas
- f- Radículas



- 1- Ritidoma
 - 2- Entrecasco
 - 3- Câmbio Vascular
 - 4- Borne
 - 5- Cerne
 - 6- Medula
- } Casca
- } Lenho

Figura 7 - Corte esquemático [2] e corte transversal do caule de uma árvore [3].

Casca

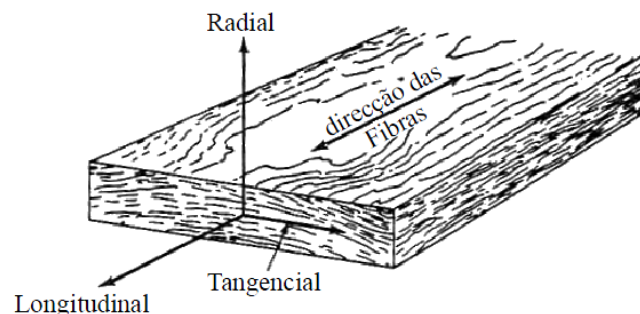
Protege o lenho e é o veículo que transporta a seiva que é elaborada, das folhas para o lenho do tronco. As duas camadas assumem essa função: um estrato externo e epidérmico, formado por tecido morto, denominado por ritidoma e outro interno, formado de tecido vivo, mole e húmido, ou seja, com atividade fisiológica e condutor da seiva elaborada, denominado por carrasco, [3]. O ritidoma protege os tecidos mais novos do ambiente, dos excessos de evaporação e dos agentes de destruição. Quando racha, cai e é renovado, pois como é um tecido morto não tem crescimento associado, [3]. Na outra camada que compõe a casca, o entrecasco, desce a seiva elaborada nas folhas, a partir de substâncias retiradas do solo e do ar. É do solo que provem a água que contém em solução, compostos minerais e que constitui a seiva bruta que sobe por capilaridade pela parte viva do lenho, o borne, até às folhas da copa. Nas folhas e nas partes verdes da copa são absorvidos do ar, o anidrido carbónico e o oxigénio e realiza-se a função clorofilina ou fotossíntese, formando-se a seiva elaborada que desce pelo entrecasco e pode ficar armazenado nas células sob a forma de amido. Partindo dos açúcares que formam a seiva elaborada, as árvores sintetizam todas as substâncias orgânicas que compõem as células lenhosas. Essa transformação ocorre principalmente no estrato que segue à casca, o câmbio vascular, [3].

Câmbio vascular

É uma camada de tecidos vivos, fina e quase invisível, situada entre a casca e o lenho. É constituído por um tecido de células em permanente transformação. No câmbio realiza-se a importante transformação dos açúcares e amidos em celulose e lenhina, principais constituintes do tecido lenhoso. O crescimento transversal verifica-se pela adição de novas camadas concêntricas e periféricas provenientes dessa transformação no câmbio: os anéis de crescimento. É nos anéis anuais de crescimento que se encontram refletidas as condições de desenvolvimento da árvore: são largos e pouco distintos em zonas de clima tropical, que se traduzem num rápido crescimento; são apertados e bem configurados em espécies provenientes das zonas temperadas ou frias. Em cada anel, associado a cada ano que passa, destacam-se duas camadas: uma de cor mais clara, com células largas de paredes finas, que é formada durante a primavera e o verão, denominada por anel de primavera; e outra de cor mais escura, com células estreitas, de paredes grossas formada no verão e outono, designado por anel de outono, [3].

Os anéis de crescimento registam a idade da árvore e são a referência para a consideração e estudo da anisotropia da madeira. Na avaliação do desempenho físico e mecânico do material são considerados ensaios nas três direções ou eixos principais, Figura 8, nomeadamente:

- Direção tangencial ou direção transversal tangencial aos anéis de crescimento;
- Direção radial ou direção transversal radial dos anéis de crescimento;
- Direção axial ou no sentido das fibras, longitudinal em relação ao caule,



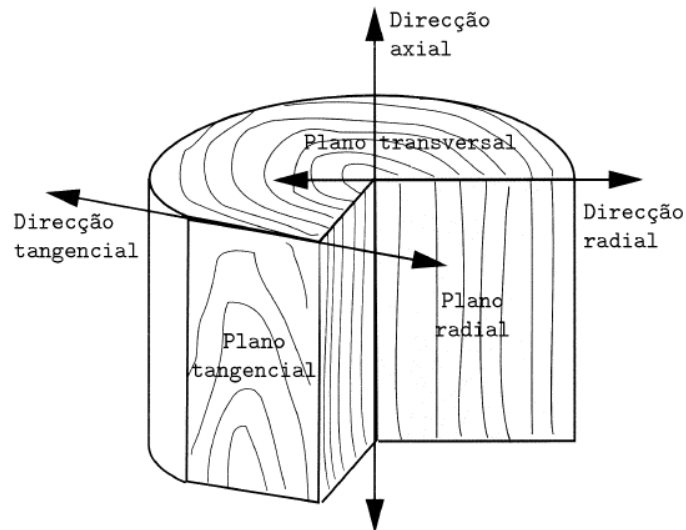


Figura 8 - Direções de simetria anatômica da madeira.

Lenho

É o núcleo de sustentação e resistência da árvore, é pela sua parte viva, que sobe a seiva bruta. Constitui a secção útil do tronco para obtenção das peças estruturais de madeira natural ou madeira de obra. O lenho é constituído pelo borne, cerne e medula, [3]. O borne, a camada externa, tem a cor mais clara que o cerne, é formado por células vivas e ativas. Além de lhe estar associada a função resistente, é esta camada que transporta a seiva bruta, por ascensão capilar, [3]. O cerne, a camada interna, tem a cor mais escura que o borne, é formado por células mortas. As alterações no borne, vão formando e ampliando o cerne. As alterações devidas aos processos de crescente engrossamento das paredes celulares provocados por sucessivas impregnações de lenhina, resinas, taninos e corantes, fazem com que o cerne tenha maior densidade, compacidade, resistência mecânica, e maior durabilidade. Esta durabilidade está associada à sua constituição, ou seja, como o cerne é composto de tecido morto, isento de seiva, amidos ou açúcares, não atrai os insetos, nem os outros agentes de deterioração, [3]. A medula é o núcleo do lenho. O tecido que o constitui é mole e esponjoso, muitas vezes já apodrecido. Não tem resistência mecânica nem durabilidade, [3].

II.5 Estrutura microscópica da madeira

Resinosas

O lenho de uma resinosa é constituído por anel de primavera, anel de outono, parênquima, traqueídeos, pontuações aureoladas, canal de resina e raios lenhosos, ver Figura 9.

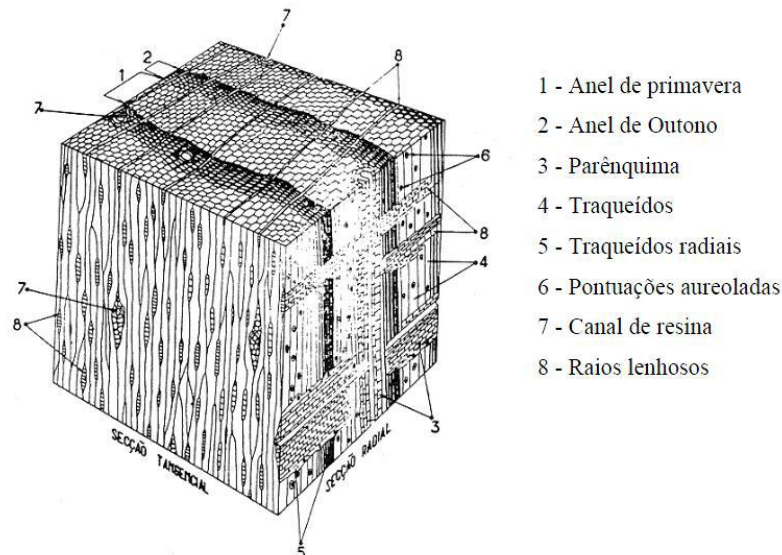


Figura 9 - Aspeto microscópico da madeira das resinosas [3].

O lenho das resinosas é composto quase na totalidade pelo prosênquima que é um tecido formado de traqueídeos que são células alongadas de diâmetro quase constante, semelhante a tubos finos e que desempenham uma função dupla de condução da seiva e suporte mecânico. Os traqueídeos, designados por fibras, podem ser longitudinais ou radiais e tem pontuações aureoladas que consistem em depressões sensivelmente tronco-cônico de uma das camadas da parede celular, [3].

Além dos traqueídeos, existem também numerosas linhas finas e claras que se desenvolvem radialmente – os raios lenhosos e que conduzem e/ou armazenam substâncias nutrientes no sentido radial do tronco. Os raios lenhosos constituem o parênquima radial. O tecido do parênquima, disposto segundo a direção geral das fibras designa-se por parênquima longitudinal. O parênquima é, portanto, um tecido de células curtas providas de paredes relativamente pouco espessas, disseminado no seio do prosênquima e destinado principalmente à distribuição e reserva das substâncias nutrientes, [3].

As resinosas ainda contêm os canais resiníferos que são limitados por células secretoras de resina, ver Figura 10 [2].

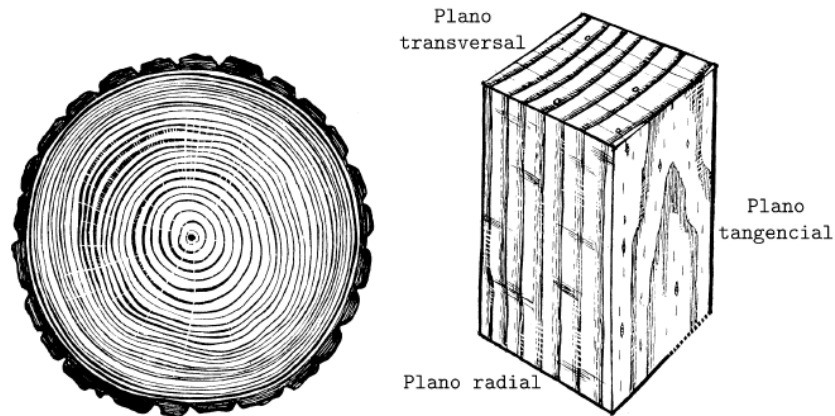


Figura 10 - Representação esquemática dos planos fundamentais da madeira das resinosas, [2].

Folhosa

O lenho de uma folhosa é constituído por anel de primavera, anel de outono, parênquima, fibras (prosênquima), vasos, poros e raios lenhosos, ver Figura 11 [3].

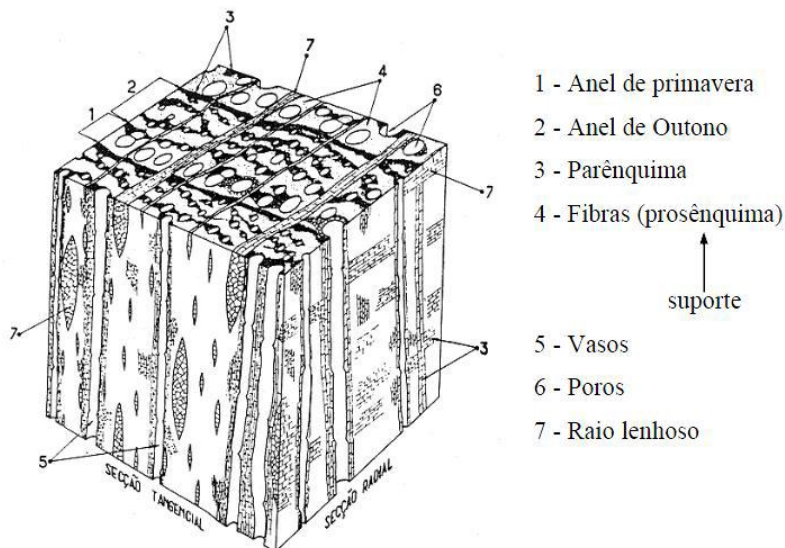


Figura 11 - Aspecto microscópico da madeira das folhosas [3].

Os vasos são tubos longitudinais de células do prosênquima, tecido que formam as folhosas, grande parte do lenho. Cada vaso é formado de células longitudinais e tubulares justapostas, visíveis a olho nu, abertas nas extremidades permitindo o fluxo da seiva através do lenho, [3].

As fibras são células com extremidades afiladas, diâmetro variável e reduzido, dispostas longitudinalmente no caule. No seu conjunto, fortemente aglomeradas, constituem elementos de resistência e sustentação da árvore. As características mecânicas da madeira produzida estão estreitamente ligadas à compactidade, textura e disposição do tecido fibroso. As fibras são células do prosênquima, [3].

Parênquima é um tecido de células curtas providas de paredes relativamente pouco espessas disseminado no seio do prosênquima, destinado principalmente à distribuição e reserva de hidratos de carbono, [3].

Os raios lenhosos são as faixas de células do parênquima dispostas em fiadas radiais. A sua presença implica uma amarração das fibras no sentido radial, alterando as características nesta direção, ver Figura 12 [3].

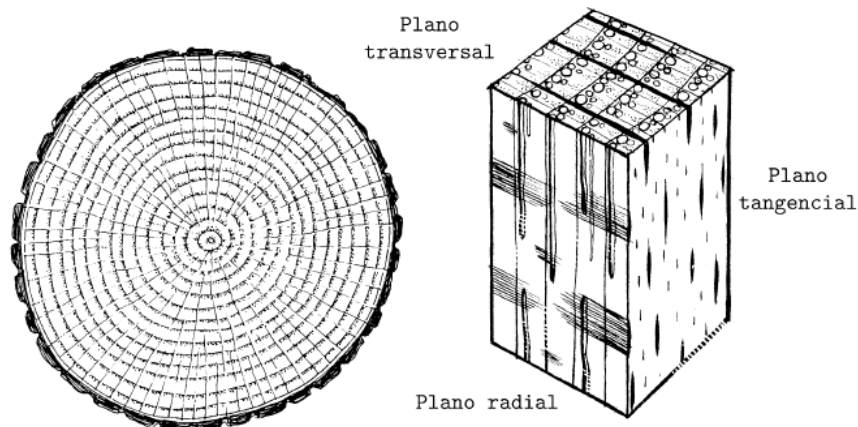


Figura 12- Representação esquemática dos planos fundamentais da madeira das folhosas.

II.6 Estrutura da parede celular

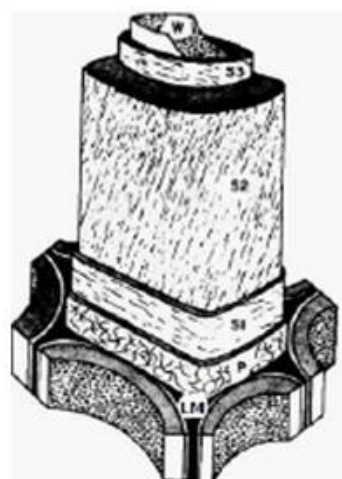
A parede celular é constituída por um arranjo concêntrico que é causado pelas diferenças na composição química e pela diferente orientação dos elementos estruturais.

Os componentes são subdivididos da seguinte forma, [3]:

- Componente estrutural – Celulose
- Componentes sub-estruturais – Polioses e lignina.

Após a remoção das polioses e da lignina, a textura do elemento celulósico, chamado de fibrila, é visível. Entre as células individuais. Há uma fina camada, a lamela média, a qual une as células entre si, formando o tecido. Embora fibrilas simples possam cruzar a

lamela media, esta camada é em princípio livre de celulose, [3]. A lamela média é altamente lignificada. A sua espessura é de 0,2 a 1,0µm. Na parede primária (P), as fibrilas de celulose são arranjadas em delgadas camadas que se cruzam formando redes. A parede primária é a primeira camada depositada durante o desenvolvimento da célula. A quantidade de celulose na parede primária é muito limitada, contém também polioses, pectina e proteínas imersos numa matriz de lignina, a sua espessura varia de 0,1 a 0,2 µm, [3]. A parede secundária, é a camada espessante da célula, depositada sobre a parede primária, após o seu crescimento superficial ter-se completado. Consiste em três camadas: uma externa (S1 definida como a camada de transição), uma média (S2) e uma interna (S3 definida como uma camada terciária). A espessura da parede secundária pode variar de 1 a 10 µm, [3]. Na figura seguinte é apresentado o modelo da parede celular, [3].



Lm=lamela média,
P=parede primária,
S1=camada 1 da parede secundária,
S2=camada 2 da parede secundária,
S3=camada 3 da parede secundária
ou parede terciária
W=camada verrugosa

Figura 13- Constituição da parede celular, [3].

II.7 Composição química

A composição química da madeira, varia muito pouco e qualquer que seja a espécie, no estado anidro, a sua composição média é a seguinte:

Carbono.....	49%
Hidrogénio (H)16.....	6%,
Oxigénio (O).....	44%
Azoto.....	1%
Cinzas.....	1%

Além destes elementos encontram-se pequenas quantidades de Cálcio (Ca), Potássio (K), Magnésio (Mg) e outros, constituindo as substâncias minerais existentes na madeira, [3]. A composição química da madeira é muito importante, porque é a partir dela que se pode considerar como sendo mais ou menos durável no tempo. Substâncias como a resina e o tanino constituem como que fatores de proteção da madeira, [2].

II.8 Identificação e classificação da madeira

Há necessidade de conhecer a qualidade da madeira estrutural, para o seu correto dimensionamento atendendo às solicitações a que estará sujeita no seu tempo de vida, para isso é necessário o conhecimento das suas características e o modo como estas devem ser determinadas, [4]. A identificação da madeira pode fazer-se mais ou menos minuciosamente, conforme as exigências do trabalho que se executa:

A **classificação visual** é estabelecida pela avaliação das características, dos defeitos estruturais da madeira, das imperfeições geométricas de secção e das alterações da madeira, [4].

A **classificação mecânica** é a caracterização da madeira através de um conjunto de processos mecânicos, não destrutivos, onde são determinadas as propriedades mecânicas, sem que exista a necessidade de uma inspeção visual. Através de ensaios, a madeira é classificada de acordo com os valores característicos de resistência, massa volúmica e rigidez, que permitem atribuir uma classe de qualidade, [4].

II.9 Defeitos da madeira

A madeira é um material dotado de um carácter especial pela génese que tem e pelas características que apresenta. O seu comportamento pode ser grandemente afetado por irregularidades, anomalias ou alterações na sua constituição original. Pela sua importância, os defeitos naturais das peças necessitam de ser estudados com maior profundidade, recorrendo a análises detalhadas e sistematizadas para se conhecer os efeitos negativos que provocam nas propriedades, tanto físicas como mecânicas, dos elementos de madeira, [5]. Entende-se por defeitos na madeira qualquer irregularidade na sua constituição que comprometa a resposta físico-mecânica às diversas solicitações. A presença de defeitos afeta a qualidade dos elementos e conduz a uma redução da sua

capacidade resistente. Estas anomalias têm origem natural ou podem resultar de procedimentos inadequados que se verificam nas fases de abate, de extração e de transporte, provocando a conseqüente depreciação das peças de madeira, [5]. Assim sendo, é considerado um defeito qualquer irregularidade ou imperfeição na constituição e estrutura da madeira que resultem em alterações lesivas às propriedades físicas e mecânicas e por conseqüência comprometem a sua aplicação, [5]. A diversidade dos defeitos é muito grande, mas aqueles que aparecem com mais frequência nas peças de madeira e que influem nas suas propriedades mecânicas são:

- Nós;
- Fendas;
- Empenos;
- Descaio;
- Taxa de crescimento;
- Ataques de insetos e fungos (apodrecimento; bolores)
- Bolsas de resina;
- Medula e casca inclusa;
- Inclinação do fio;
- Lenho de reação e madeira juvenil.

Estes e outros defeitos podem ser associados em grupos que se distinguem uns dos outros na causa da sua ocorrência e designam-se por:

- Defeitos de crescimento:
 - Nós
 - Desvio de inclinação do fio
 - Deslocamento do lenho de reação
 - Bolsas de resina
 - Casca inclusa
- Defeitos de secagem;
 - Fendas
 - Empenos
- Defeitos de exploração;
 - Fendas
 - Fissuras de abate

- Defeitos de alteração.
 - Fungos
 - Insetos
 - Térmitas

II.10 Propriedades físicas e mecânicas da madeira

Das várias características que diferenciam os diversos tipos de madeira, temos as propriedades físicas e as propriedades mecânicas. Fundamentalmente, o que as diferencia é o facto de as propriedades físicas se referirem às características intrínsecas independentemente da utilização que dela se faça, ou do destino que se lhes pretende dar. No que se refere às propriedades mecânicas é relevante o que toca à sua utilização ou destino, constituindo um importante meio de verificação da sua aptidão para ser utilizadas nos mais diversos fins para que é extraída, [2].

Propriedades Físicas

Relativamente às propriedades físicas que caracterizam as madeiras podemos enquadrá-las num conjunto de doze principais e que se passa a expor [2]:

- Heterogeneidade;
- Anisotropia;
- Higrometricidade;
- Humidade;
- Retratibilidade;
- Porosidade;
- Dureza;
- Densidade;
- Condutibilidade térmica, eléctrica e acústica
- Durabilidade

Propriedades Mecânicas

Na madeira existe uma direção paralela às fibras, privilegiada para resistir a esforços mecânicos. À medida que caminhamos em altura ao longo do tronco encontramos zonas sucessivamente mais novas, conseqüentemente as secções superiores terão menor número de anéis, pelo que a, madeira dessas zonas é menos resistente [2].

Em relação às propriedades de natureza mecânica mais importantes, destacamos:

- Resistência à compressão;
- Resistência à tração;
- Resistência à flexão;
- Resistência ao choque;
- Resistência ao corte;
- Elasticidade;
- Fluência e fadiga;

II.11 Fatores que condicionam as propriedades da madeira

Procura-se agora neste ponto detalhar as propriedades, tanto físicas como mecânicas, definidoras das linhas primordiais do comportamento da madeira, já que o seu conhecimento adequado constitui uma exigência para a utilização crescente deste material enquanto elemento estrutural. Conhecer os parâmetros influenciadores dos comportamentos e procurar controlá-los constitui a melhor opção com vista à melhor utilização e aplicabilidade deste material em serviço, [5].

As características físicas e mecânicas da madeira são claramente afetadas pela índole natural que esta assume ao provir da árvore. Este facto é provocado pela variabilidade de soluções possíveis, dentro duma espécie e dentro de uma árvore, como foi previamente referido. Mas esta é apenas uma causa no meio de outras, tais como a humidade e a temperatura, que serão abordadas de imediato. Torna-se então necessário sintetizar os aspetos com maior influência nas propriedades da madeira com o objetivo de compreendê-la melhor enquanto material estrutural, [5].

Sendo assim, os principais fatores condicionantes das propriedades da madeira são:

- Espécie botânica

A espécie botânica condiciona a constituição química e o arranjo morfológico dos elementos de madeira já que estas características são variáveis, o que foi anteriormente descrito como “variabilidade de espécie”; daí ser importante a perfeita identificação botânica da espécie em questão; a espécie botânica define o comportamento físico-mecânico da madeira, [5];

- Localização do tronco da árvore que esteve na origem do elemento de madeira

As características da peça da madeira são influenciadas pela zona de onde foi retirada, podendo ter como proveniência o cerne, borne ou então ter estado mais próxima das raízes ou da copa. Pode-se dizer que há alterações notáveis do tecido lenhoso em função da zona do lenho de onde foi extraída a madeira, [5];

- Existência de defeitos

Os defeitos na estrutura lenhosa englobam particularidades como nós, fendas, fibras torcidas ou inclinadas e são responsáveis por alterações na resistência da madeira, sendo estas alterações variáveis em função da sua localização, dimensão e distribuição, [5];

- Efeito da humidade

A humidade exerce influência em grande parte das propriedades de resistência da madeira, afetando o rendimento e qualidade da celulose e aumentando a suscetibilidade aos ataques de fungos; contudo, a madeira pode absorver uma grande quantidade de água antes de atingir um nível de humidade propícia ao ataque de fungos, sendo esta uma causa da sua degradação como se verá adiante; a influência da humidade é visível nas propriedades mecânicas abaixo do ponto de saturação das fibras (situação em que toda a água livre foi expulsa e as fibras nas paredes celulares estão saturadas), verificando-se que menos humidade se traduz em maior resistência.

A variação da resistência mecânica da madeira com o teor de humidade é variável conforme o tipo de tensão e a propriedade mecânica em causa.

Os elevados valores de humidade na madeira são, em geral, o resultado da infiltração de águas das chuvas, formação de condensações, presença de água por capilaridade, perdas nas tubagens ou insuficiente ventilação das áreas de construção, [5].

- Temperatura

A temperatura assume um papel com menor influência nas propriedades da madeira e consequentemente no seu comportamento mas que não deve ser menosprezado; o fundamento desta afirmação está no facto de que, só para valores extremos de temperatura, se verificam variações importantes dos valores das propriedades das peças, [5].

II.12 Presença de água na madeira

Toda a madeira perde ou ganha água numa tentativa contínua de conseguir um estado de equilíbrio com as condições do ar circundante. A água pode ser encontrada na madeira viva em três locais: nas paredes celulares, no conteúdo das células e como água livre nas cavidades e espaços intercelulares (quando madeira morta, por exemplo no cerne, a água só pode ser encontrada nas paredes celulares e espaços intercelulares).

Devido às diferentes formas de ganho e/ou perda de água estas podem classificar-se em cinco diferentes formas: água livre, devido a fenómenos de capilaridade; água de adesão ou higroscópica; água de constituição; água de adsorção superficial e água de condensação capilar.

A madeira considera-se saturada quando todos os seus espaços vazios, células e as referidas paredes celulares estão totalmente preenchidas por água. Quando a madeira é totalmente seca, isto é, quando não existe água em nenhuma das partes indicadas, esta será designada por madeira anidra. É importante salientar que madeira anidra é essencialmente uma caracterização teórica, onde a existência por si só, será meramente impossível, devido à perda total de todas as moléculas de água de uma estrutura e sua constituição ser extremamente difícil, senão mesmo impossível.

Existe um ponto crucial no estudo das propriedades da madeira. Este ponto é chamado de ponto de saturação das fibras (PSF) e ocorre quando toda a água livre, ou de capilaridade, é retirada da madeira restando apenas a água de adesão.

Diz-se que se atingiu o PSF quando a madeira atingiu a fase em que toda a água livre foi retirada da estrutura celular e se inicia o processo de dissecação das paredes.

O conhecimento deste ponto singular do estado de equilíbrio no comportamento das madeiras é importante, pois será este o ponto de viragem onde ocorrerá o fenómeno de retração ou inchamento consoante o ambiente em que esta se encontra inserida, que posteriormente, poderão provocar fenómenos de empenos e/ou fissuras onde é necessário ter em atenção sobre a possível ocorrência de variações nas resistências mecânica e física da madeira, ver Figura 14 [6].

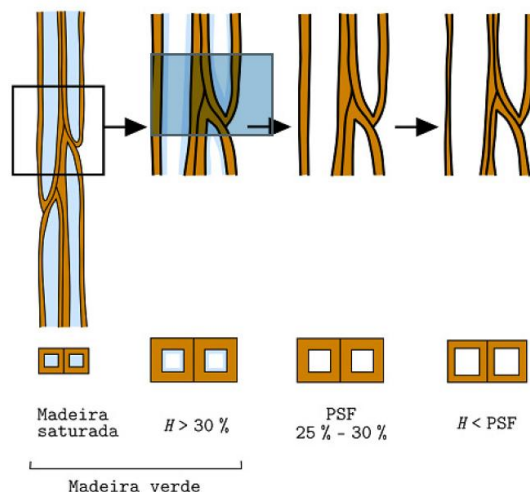


Figura 14- Estrutura microscópica, [6].

Água livre

Quando as paredes das células estão completamente saturadas mas ainda não ocorreu o início do preenchimento dos vazios por água, diz-se então que a madeira atingiu o ponto de saturação das fibras (PSF). Aquando da saturação completa das paredes das células e contínua absorção de humidade do ar, a água iniciará a deslocação para os espaços vazios, esta água é a denominada água livre, [6]. A remoção da água livre não causará então qualquer alteração dimensional da madeira, já que esta água não obriga a que exista expansão do material aquando da sua absorção e que irá unicamente preencher espaços pré-existentes, mas não preenchidos por água nem outro tipo de substâncias. Do mesmo modo, na secagem de madeiras, a remoção da água livre até ao ponto de saturação das fibras também não terá qualquer influência nas dimensões da madeira em questão, [6].

Água de adesão

A água de adesão ou higroscópica, é a água presente nas paredes celulares depois de retirada toda a água livre. A água de adesão é responsável por variações nas dimensões da madeira. A absorção de humidade do ar provoca um aumento de volume das paredes celulares, este aumento de volume permite-lhes suster o máximo de água possível, ocorrendo o fenómeno de inchamento. O processo contrário ocorre também frequentemente, isto é, no caso de a madeira se encontrar num ambiente mais seco há perda de água contida nas paredes celulares provocando variação das dimensões, mas neste caso o efeito é de retração, [6].

Água de constituição

A água de constituição é a água que se encontra como constituinte do material lenhoso. Alguma desta água torna-se assim impossível de retirar da madeira, mesmo no processo de secagem. Esta água de constituição fica sempre presente na madeira, sejam quais forem as condições do ambiente em que esta madeira se encontra, esta água encontra-se presente mesmo após secagem da madeira, quando supostamente esta madeira seria anidra. Sendo assim a situação de madeira anidra terá sempre uma ligeira parte de água na constituição da madeira, mesmo que extremamente residual, [6].

Água de adsorção superficial

A água de adsorção superficial corresponde à água que é captada pelas superfícies das paredes celulares. Esta água é supostamente a água que se encontra no interior das paredes celulares após a sua captação e provoca fenómenos de expansão da madeira aquando da sua adaptação com o ambiente mais húmido envolvente, [13].

Água de condensação capilar

A parede celular permite a fixação de água por condensação capilar devido à existência de forças de tensão capilar. Esta fixação é influenciada pela tensão da água sob a forma de vapor do ambiente que envolve a parede celular. É assim portanto, correto dizer que a madeira depende das características do ar envolvente, do estado higrométrico e do próprio ambiente existente nos lúmenes celulares, [6].

II.13 Retração e inchamento/expansão

A retração e inchamento são fenómenos que ocorrem com muita frequência na madeira. São muito importantes para o conhecimento geral da madeira e carecem de especial atenção numa tentativa de melhorar os desempenhos da madeira nas mais diversas aplicações, [6]. Define-se retração como fenómeno em que a madeira diminui de volume devido à perda de água para o ambiente em que esta se encontra inserida de forma a entrar em equilíbrio e estabilizar dimensionalmente tendo como referência esse mesmo ambiente, [6]. O fenómeno de inchamento é exatamente o contrário do fenómeno de retração, isto é, a madeira aumenta de dimensões ao absorver água do meio envolvente, água esta que vai

infiltrar-se nas paredes celulares e posteriormente nos espaços vazios celulares da madeira provocando um aumento de volume da madeira, [6]. A retração não ocorre de forma homogênea em toda a peça de madeira, inicia-se mais acentuadamente nas zonas superficiais em contacto com o ar do meio onde esta se encontra, evoluindo depois da parte externa para o interior. Abaixo do ponto de saturação das fibras, a retração é aproximadamente linear com a redução do teor de água da madeira, [6]. Durante o fenómeno de retração podem ocorrer fissuras na madeira assim como deformações prejudiciais ao bom desempenho e durabilidade da madeira. Estas fissuras acontecem devido à acentuada perda de água na superfície da madeira em comparação com a parte mais interna, formando tensões que irão provocar também outros fenómenos indesejáveis como situações de empenamento, [6].

A madeira, predominantemente anisotrópica e heterogênea, não apresenta valores de retração equivalentes segundo as três direções, longitudinal, tangencial e radial. Esta heterogeneidade depende também da espécie de madeira. A retração é mais acentuada na direção tangencial às camadas de crescimento e com um valor reduzido para metade ou até menos (cerca de 1/3) na direção radial, dependendo da espécie de madeira. A direção longitudinal das fibras, tem valores de retração muito pequenos que são, em geral, desprezados nos estudos efetuados para as diversas espécies de madeira, [6].

Os coeficientes de retração, linear (longitudinal, radial e tangencial), volumétrico, e ainda a razão entre a retração tangencial e a radial, dão uma indicação da tendência da madeira para empenar. Cada um destes parâmetros, de extrema importância para o estudo do comportamento da madeira, pode ser determinado através de ensaios laboratoriais, [6].

II.14 Transporte de água na madeira

Quando se procede à secagem da madeira, diversas forças provocam a movimentação da água no seu interior. Uma das ações que ocorre será por capilaridade, movimentando a água livre através dos vazios intercelulares. Um fenómeno muito importante é a difusão, este fenómeno é devido a diferenças entre os gradientes de humidade que para entrar em equilíbrio obriga a que a água se movimente. Este movimento provoca também o movimento de água contida nas paredes celulares, movimento este, também por difusão. Uma vez que o movimento da água na madeira é lento, o potencial cinético

é geralmente desprezado quando comparado com a energia potencial que, devido ao seu constante movimento em direção à perda de energia, irá ter maior magnitude que a energia cinética, [6].

Conclui-se portanto que, o movimento de água na madeira pode ocorrer devido a vários tipos de forças, que podem ou não interagir simultaneamente. A força devido à ação da gravidade, sempre presente, forças capilares devido ao sempre possível movimento da água livre (água que preenche os espaços vazios celulares na madeira) e forças higroscópicas devido ao comportamento natural da madeira, que em diferentes gradientes de humidade, tem a capacidade de captar ou libertar a água para entrar em equilíbrio com o meio envolvente, [6].

CAPÍTULO III

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo apresentam-se a descrição dos ensaios efetuados, assim como os procedimentos propriamente ditos para obtenção dos provetes a ensaiar.

III.1 Ensaio de variação dimensional

A conceção dos provetes normalizados para a determinação da variação dimensional seguiu as normas NP-614: 1973, [7] e NP-616: 1973, [8] onde é indicado que no fabrico dos provetes deve ter-se o cuidado de selecionar uma madeira sã e isenta de nós, fendas ou outros defeitos.

III.1.1 Preparação dos provetes

Os provetes foram fabricados na serração da empresa Ecolignum situada na zona industrial de Vinhais.

A madeira usada para o fabrico dos provetes foi previamente cortada no sentido longitudinal ao cerne do tronco e foi seca com o devido controlo nas estufas como podemos ver na Figura 15.



Figura 15 - Secagem da madeira na estufa.

As peças de madeira, antes de irem para a estufa, são separadas por tabiques que são colocados transversalmente e são empilhadas de forma a facilitar a circulação do ar. Foi dada muita importância aos separadores colocados nos extremos das pilhas de forma a evitar as fissuras.

A câmara de secagem é em aço inoxidável e permite controlar as condições de calor, humidade relativa do ar e ventilação necessária para uma correta secagem de madeira. A secagem da madeira é feita seguindo um programa com etapas climáticas progressivas.

O programa de secagem depende da espécie de madeira e da espessura.

O aquecimento do ar é feito por meio de radiadores que libertam o calor na câmara, o radiador utilizado foi a resistência elétrica. A humidade, a temperatura e a ventilação são parâmetros fundamentais para a correta secagem da madeira, e são devidamente controlados, ver Figura 16.



Figura 16 - Controlador de temperatura e humidade.

Após a secagem da madeira, os provetes foram obtidos de pranchas de madeira (Figura 17) cortada em provetes prismáticos de 40 mm de aresta (Figura 19) e como 10 mm de espessura. Na Figura 18 é apresentado o provete tipo, de dimensões 40×40×10 mm, utilizado nos ensaios de determinação da variação dimensional



Figura 17 - Prancha de madeira.

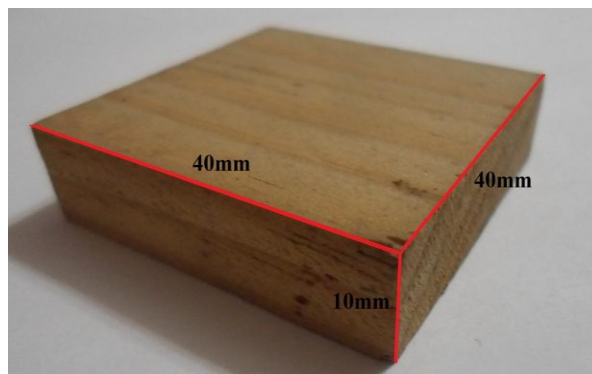


Figura 18 - Provete tipo.



Figura 19 - Corte da madeira.

III.1.2 Material e Equipamento

As madeiras estudadas foram uma madeira resinosa (Pinho Bravo) e uma madeira folhosa (Freixo). Para cada espécie de madeira foram testados 30 provetes.

O equipamento usado para efetuar as medições da massa dos provetes foi uma balança Scoup Pro com um erro de 0.02 g, para a medição geométrica dos provetes foi utilizado um paquímetro eletrónico com a precisão de 0,02mm (Figura 20).



Figura 20 - Paquímetro e Balança.

Os provetes foram colocados numa câmara climática a uma temperatura de $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ e com uma humidade relativa $60\pm 5\%$. (Figura 21). A câmara climática tem como característica principal, a possibilidade de acesso ao seu interior pelo operador do ensaio, sendo dessa forma possível pesar e medir os provetes sem grande perturbação da temperatura e da humidade relativa interior.

Para a secagem dos provetes foi usada uma estufa com renovação de ar e que mantém a temperatura de $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ (Figura 21).



Figura 21 - Câmara climática e estufa.

III.1.3 Procedimentos de ensaio

Inicialmente os provetes são numerados e marcados para garantir que as medições são feitas sempre no mesmo sítio (Figura 22), depois de marcados são feitas medições da massa e das dimensões.

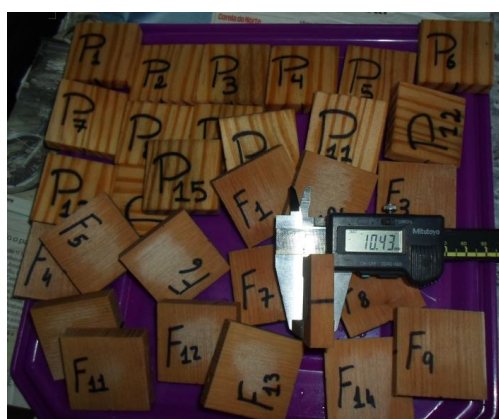


Figura 22 - Provetes marcados.

O trabalho experimental foi dividido em três ciclos distintos e previamente ao início de cada ciclo todos os provetes foram medidos e pesados.

Nos dois primeiros ciclos, 15 provetes de Freixo e 15 provetes de Pinho foram mergulhados em água (Figura 23 a)) e os restantes foram colocados na estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ (Figura 23 b)) durante 24 horas de acordo com NP 614:1973 [7] Após este período, os provetes são retirados da água e da estufa e são efetuadas as medições de massa e de dimensões. Posteriormente foram colocados na câmara climática onde foram feitas medições de peso e dimensão durante 24 horas até se atingir a sua estabilidade dimensional. Durante as primeiras 12 horas as medições foram feitas de 2 em 2 horas, e nas 12 horas seguintes as medições foram feitas de 3 em 3 horas . Foi definido que as dimensões são consideradas contantes quando a diferença entre duas medições consecutivas, num intervalo de 2 horas, é inferior a 0,5%, o que teve uma duração de aproximadamente de 24 horas. Os provetes na câmara climática foram colocados na vertical e separados entre si de forma a que haja circulação do ar (Figura 23 c)).



Figura 23 - a) saturação dos provetes, b) secagem dos provetes e c) disposição dos provete em estufa.

Posteriormente, todo o processo é repetido até completar três ciclos. O último ciclo termina com as amostras previamente saturadas colocadas no forno para secagem, enquanto a outra metade é saturada. Também neste ciclo após serem retirados da água e da estufa são feitas as medições de massa e de dimensão e posteriormente colocados na câmara climática e feitas as medições tal como nos dois primeiros ciclos durante 24 horas até à estabilização dimensional dos provetes. A medição das dimensões foi feita na direção radial, tangencial e longitudinal relativamente às fibras, assim como podemos ver na Figura 24.

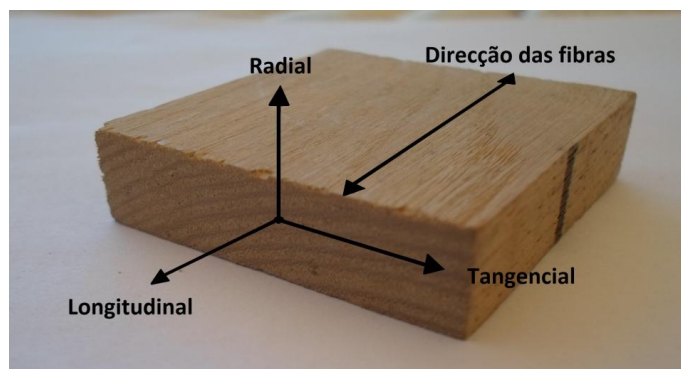


Figura 24 - Direções em relação às fibras.

De forma sucinta os ciclos descritos são:

- Ciclo 1 e 2
 - a) Mergulhar 15 provetes de cada espécie em água durante 24 horas (Figura 25.a).
 - b) Colocar os restantes 15 provetes de cada espécie na estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas (Figura 25b)).
 - c) Após as 24 horas, os provetes são colocados na câmara climática, onde se faz a medição da massa e das dimensões, longitudinais e transversais de cada provete ao longo de 24 horas (Figura 25c)).



Figura 25 - a)Provetes saturados, b)provetes secos e c)medições de dimensões.

- Ciclo 3
 - a) Os provetes da fase 1 e 2 alínea a) são colocados na estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas (Figura 26 a)).
 - b) Os provetes da fase 1 e 2 alínea b) são colocados em água durante 24 horas (Figura 26 b)).

- c) Após as 24 horas, os provetes são colocados na câmara climática, onde se faz a medição da massa e das dimensões longitudinais e transversais de cada provete ao longo de 24 horas (Figura 26 c)).

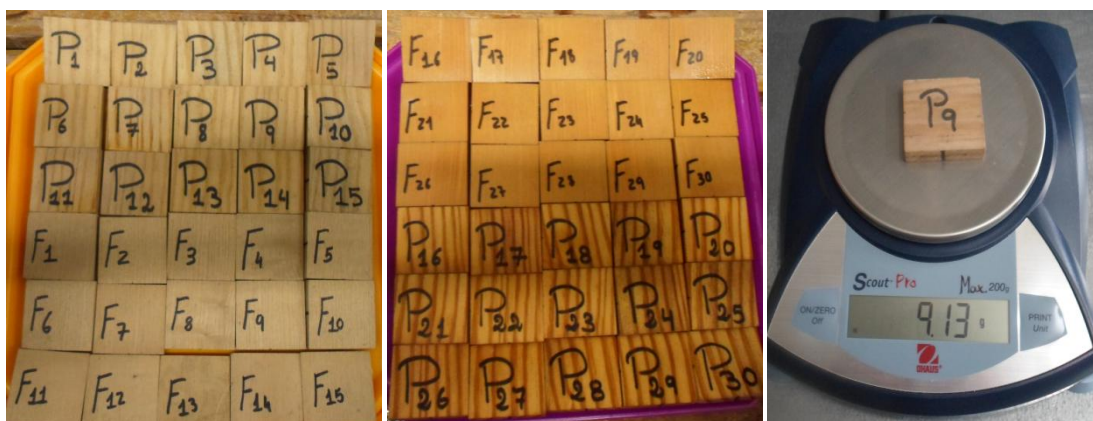


Figura 26 - a) Provetes secos, b) provetes saturados e c) medição da massa.

III.2 ENSAIOS À TRAÇÃO

Neste capítulo apresentam-se a descrição dos ensaios efetuados, assim como os procedimentos adotados para obtenção dos provetes a ensaiar.

III.2.1 Preparação dos provetes

Para a concretização dos ensaios, foi necessário realizar provetes normalizados. Assim, no fabrico dos provetes teve-se o cuidado de selecionar uma madeira sã e isenta de nós, fendas ou outros defeitos para obter melhores resultados de ensaio.

A madeira usada para o fabrico dos provetes foi previamente cortada no sentido longitudinal das fibras e no sentido transversal às fibras e foi seca com o devido controlo nas estufas como na preparação dos provetes para a determinação da variação dimensional.

De acordo com o preconizado pela norma Nbr7190/97, os provetes de de Pinho e Freixo cortados no sentido longitudinal às fibras apresentavam as dimensões de 210×40×9 mm (Figura 27) e os cortados no sentido transversal às fibras as dimensões de 190×50×9 mm (Figura 28),

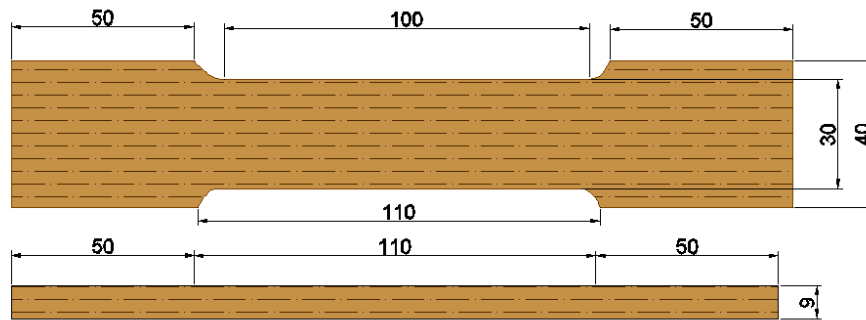


Figura 27 - Provete cortado no sentido longitudinal às fibras.

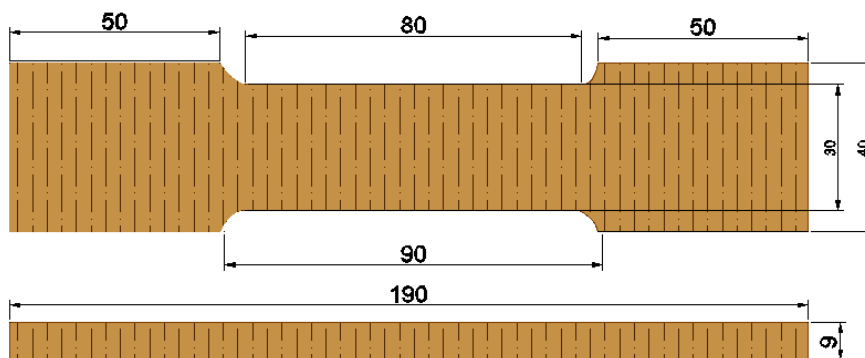


Figura 28 - Provete cortado no sentido transversal às fibras.

Depois de cortados foram levados para o Laboratório de Tecnologia Mecânica (LTM) onde foram maquinados numa máquina CNC de marca DECKEL MAHO DMC 63V (Figura 29).



Figura 29 - Máquina onde foram maquinados os provetes.

Na Figura 30 mostra o esquema dos provetes maquinados para os ensaios de tração. Os provetes apresentam uma zona útil sendo essa a região onde são feitas as medidas das propriedades do material.

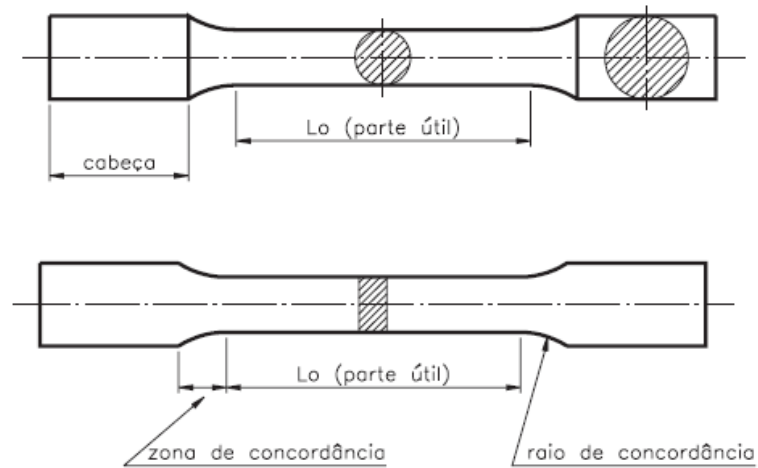


Figura 30 - Esquema do provete.

Como se verifica na Figura 30 nos extremos dos provetes há uma zona denominada de “cabeça” que serve para fixar o corpo de prova à máquina de ensaios universal para carregamento à tração. Entre as cabeças e a parte útil há um raio de concordância para evitar que a rutura ocorra fora da parte útil do corpo.

As Figuras 32 e 33 ilustram o processo de maquinagem do provete.



Figura 31 - Maquinagem dos provetes.



Figura 32 - Provetes depois de maquinados.

Após a maquinagem dos provetes, os mesmos forma colocados numa câmara húmida (Figura 33) a fim de manter um teor de humidade próximo de 12%, como referido na norma NBR 7190:1997, [9], de modo a minimizar erros de ensaio. Quando colocados na câmara húmida os provetes são devidamente separados para haver circulação de ar entre eles (Figura 33).



Figura 33 - Câmara húmida Provetes na câmara húmida.

III.2.2 Equipamento

Para os ensaios à tração é usada uma máquina universal de ensaios modelo INSTRON 4485 (Figura 34). A máquina possui umas garras onde é fixado o provete pelas extremidades designadas de cabeça. O provete é então submetido a um esforço de tração, aplicando uma força uniaxial, tendendo a alongar o provete até ao momento de rotura.

Para obter a deformação foram usados extensômetros (Figura 34) no sentido longitudinal e no sentido transversal às fibras.



Figura 34 - INSTRON 4485 e extensômetros elétricos.

Os extensômetros usados são elétricos de resistência $120 \text{ ohms} \pm 0.35\%$ do tipo 6/120LY18 com um coeficiente de temperatura de $126 \pm 10 (10^{-6} / ^\circ\text{C})$.

Inicialmente os provetes são medidos (Figura 35) e marcados para que os extensômetros fiquem no centro do provete. Após a marcação dos provetes os extensômetros são colados no provete (Figura 35).

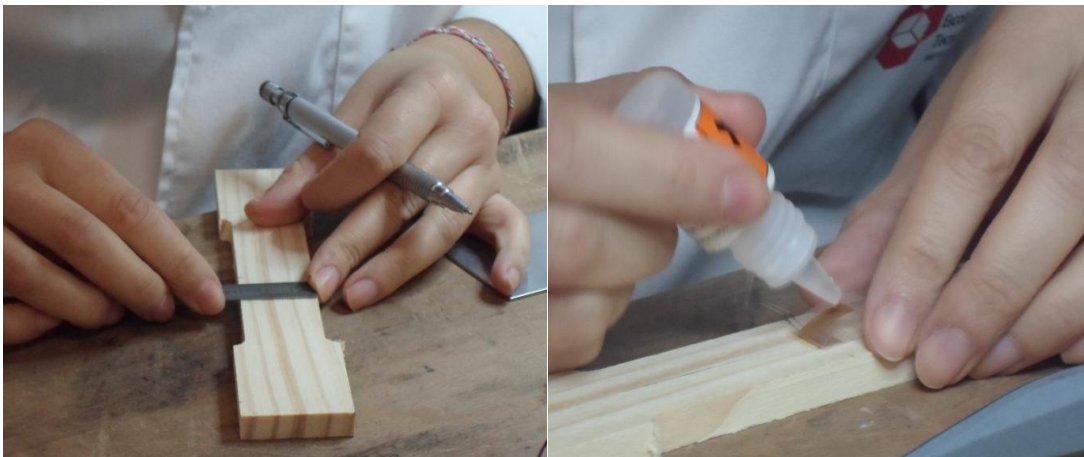


Figura 35 - Medição dos provetes e Colagem dos extensômetros.

Depois de colados os extensômetros são ligados a terminais de fio (Figura 36), para posterior aquisição de dados num sistema próprio de medição.

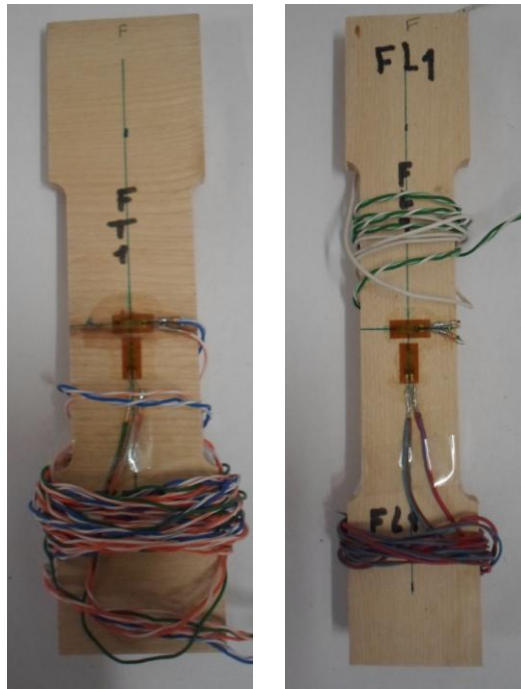


Figura 36 – Provetes instrumentados.

III.2.3 Procedimentos de ensaio

O ensaio para a determinação da resistência à tração axial da madeira é descrito na Norma NBR 7190:1997, [9]. No total são ensaiados 24 provetes, 12 provetes de Pinho onde 6 foram cortados no sentido longitudinal às fibras designados por PLn° (Figura 37) e os outros 6 no sentido transversal marcados com PTn° (Figura 37). São também ensaiados 12 provetes de Freixo, 6 foram cortados no sentido longitudinal às fibra, marcados por FLn° (Figura 38) e os restantes 6 no sentido transversal, com a designação FTn° (Figura 38).

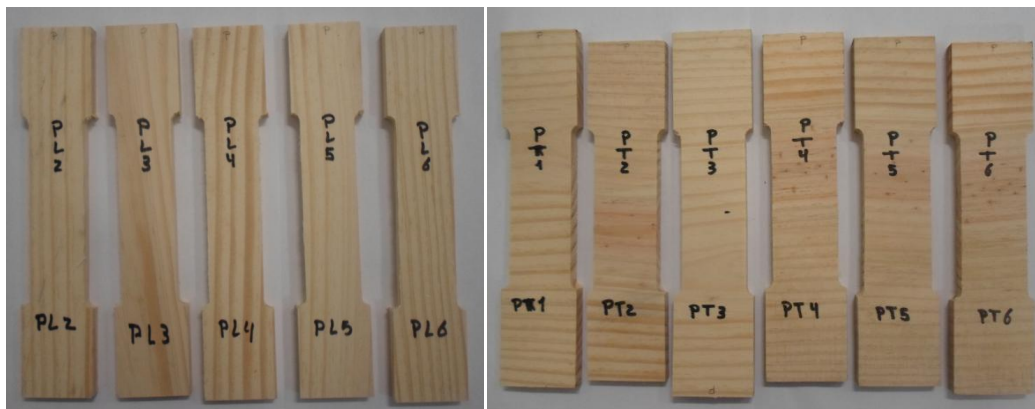


Figura 37 - Provetes de Pinho longitudinal e transversal.

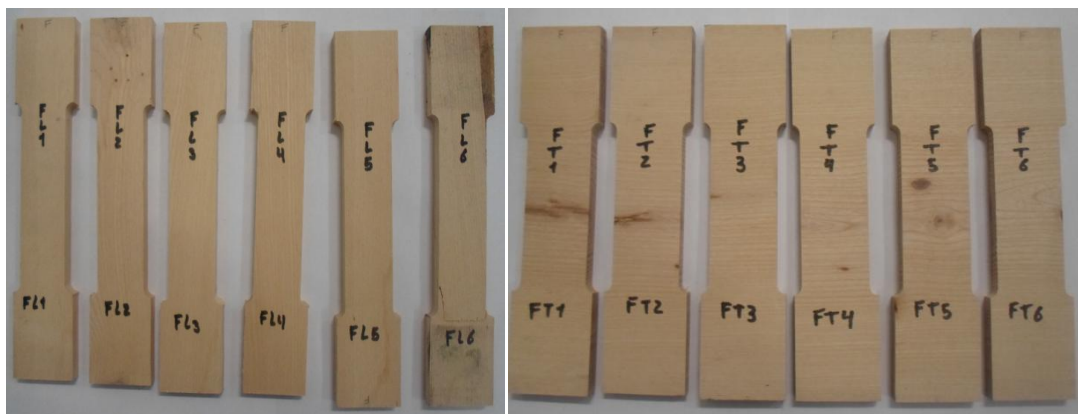


Figura 38 - Provetes de Freixo longitudinal e transversal.

Todo o ensaio foi controlado por um sistema de aquisição de dados. Colocou-se adequadamente o corpo de prova preso às garras (Figura 39) ajustando manualmente a altura do corpo de prova, de modo que as garras estivessem alinhadas. Após a colocação do corpo de prova foi aplicada uma carga de forma contínua, com deslocamento das garras na velocidade de 0.5 mm/minuto, até ocorrer a rutura (Figura 39), para a determinação da carga máxima.

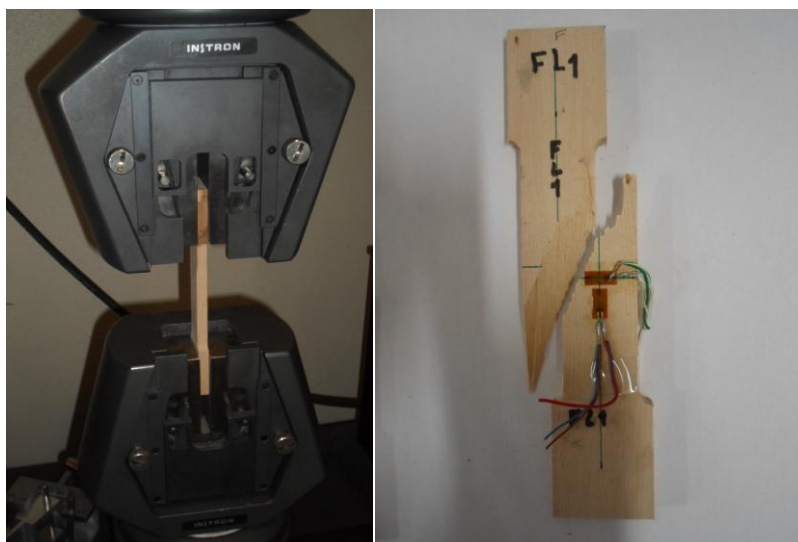


Figura 39- Provete na máquina de ensaio e rutura do provete.

Durante a realização dos ensaios é feito o registo das cargas e deformações em intervalos de carga predeterminados, distribuídos em função da resistência máxima prevista e de um número de pontos desejados para elaboração de um diagrama, para posterior cálculo do módulo de elasticidade à tração axial, para que isto seja possível, foi necessário colocar um extensómetro na parte intermediária do provete. A máquina

de ensaio fornece um gráfico com as relações entre a força aplicada e os deslocamentos ocorridos durante o ensaio, ou em forma de tensão versus deformação.

A Figura 40 ilustra o sistema de aquisição de dados para os provetes instrumentados com extensômetros elétricos.



Figura 40- Aparelho onde os extensômetros são ligados.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA OS ENSAIOS DA VARIACÃO DIMENSIONAL













Este subcapítulo destina-se à apresentação dos resultados obtidos no trabalho experimental realizados à madeira de Freixo e à madeira de Pinho.

IV.1 Variação dimensional

A perda ou ganho de água abaixo do ponto de saturação das fibras está intimamente ligada à variação dimensional da madeira. Neste capítulo, analisa-se a variação dimensional dos provetes de madeira de Pinho e de madeira Freixo sujeitos a ciclos de saturação e de secagem. Nos dois primeiros ciclos, metade dos provetes são secos e a outra metade são saturados. No terceiro ciclo o processo inverte-se, ou seja, os provetes previamente secos são saturados e os provetes previamente saturados são secos em estufa.

Para melhor identificação dos provetes e melhor interpretação dos resultados gráficos foi usada a nomenclatura apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Nomenclaturas referentes aos ciclos e às espécies de madeira

1º ciclo Pinho saturado	 1º Psat	2º ciclo Pinho saturado	 2º Psat	3º ciclo Pinho saturado	 3º Psat
1º ciclo Pinho seco	 1º Psec	2º ciclo Pinho seco	 2º Psec	3º ciclo Pinho seco	 3º Psec
1º ciclo Freixo saturado	 1º Fsat	2º ciclo Freixo saturado	 2º Fsat	3º ciclo Freixo saturado	 3º Fsat
1º ciclo Freixo seco	 1º Fsec	2º ciclo Freixo seco	 2º Fsec	3º ciclo Freixo seco	 3º Fsec

Os gráficos da Figura 41 à Figura 46 são obtidos a partir dos valores das dimensões medidas nos provetes secos e saturados durante a primeira e segunda fase.

As variações de dimensões são feitas segundo a direção radial (transversal), a longitudinal e tangencial, já referenciadas e designadas por:

- Δr - Direção radial (transversal)
- Δt - direção tangencial
- Δl - direção longitudinal

Para a determinação da variação dimensional foi usada a equação 1 em que d_1 é a dimensão do provete seco ou saturado medido ao longo do tempo e d_0 é a primeira dimensão medida ao sair da água ou da estufa.

$$\Delta = \frac{d_1 - d_0}{d_0} \times 100 \quad 1$$

IV.1.1 Variação dimensional na direção radial

No subcapítulo a seguir é feita a análise da variação dimensional da direção radial do Pinho e do Freixo.

Os gráficos da Figura 41 apresentam os resultados obtidos para a variação dimensional da madeira segundo a direção radial nos dois primeiros ciclos.

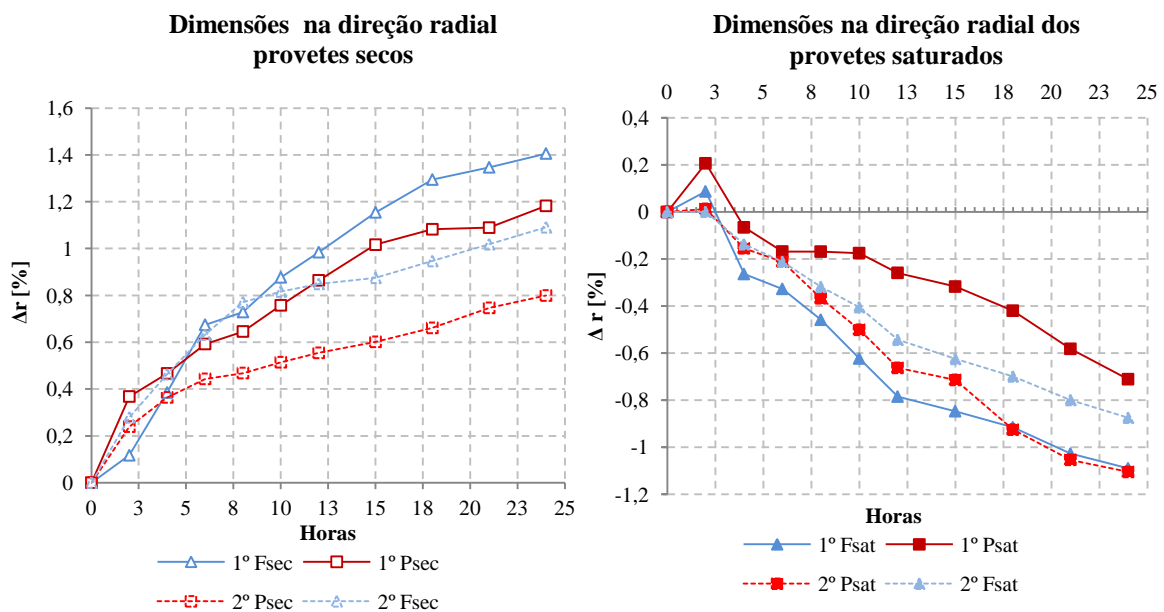


Figura 41 - Variação dimensional na direção radial em função do tempo.

A partir da Figura 41 é feita a análise dos gráficos para as duas espécies de madeira secas e saturadas cortadas segundo a direção radial e verifica-se que as suas dimensões se tornam estáveis após 24 horas.

Nos provetes secos, a madeira de Freixo registou no primeiro ciclo um aumento do seu tamanho de 1,4% e no segundo ciclo um aumento de 1,05%. Nos provetes saturados diminuiu em 1,1% o seu tamanho e no segundo ciclo essa diminuição foi de 0.88%. A madeira de Pinho, no primeiro ciclo e para provetes secos, sofreu um aumento de 1,18% e uma diminuição de 0,71% nos provetes saturados. No segundo ciclo esta madeira registou um aumento de 0,8% para os provetes secos e de 1,10% para provetes saturados. Para ambas as espécies de madeira, do primeiro para o segundo ciclo, houve uma diminuição da capacidade de absorção de humidade para os provetes secos e uma diminuição da retração nos provetes previamente saturados quando colocados na câmara húmida.

Na Figura 42 apresentam-se os resultados da variação dimensional na direção radial para o 3º ciclo.

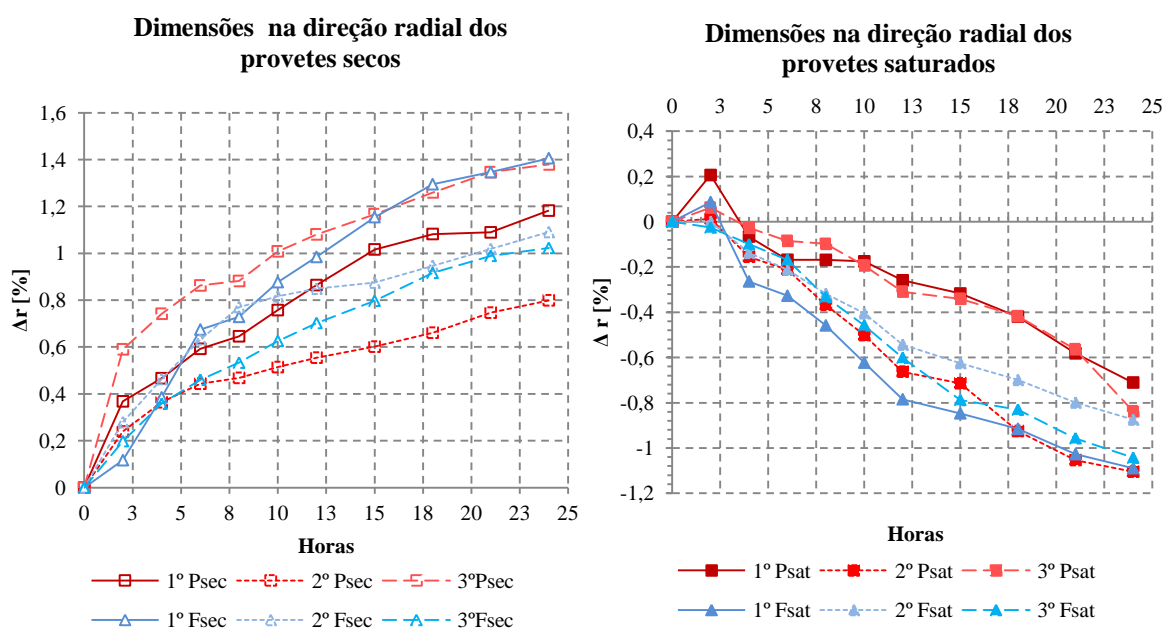


Figura 42 - Variação dimensional na direção radial em função do tempo (com o 3º ciclo).

No terceiro ciclo os provetes de Pinho secos sofrem um aumento de 1,38% e uma diminuição de 0,8% quando saturados. No que se refere ao Freixo quando seco tem um aumento de 1,01% e quando saturados tem uma diminuição de 1,12%.

Na Tabela 2 é feita a síntese dos valores de variação dimensional registados para ambas as espécies de madeira segundo a direção radial em termos absorção de humidade e de retração.

Tabela 2 – Síntese dos valores obtidos para a variação dimensional segundo a direção radial.

Direção radial	Pinho		Freixo	
	Seco	Saturado	Seco	Saturado
1º ciclo	1,18%	0,71%	1,4%	1,1%
2º ciclo	0,8%	1,1%	1,05%	0,88%
3º ciclo	1,38%	0,8%	1,01%	1,12%

Os valores são indicativos, que segundo a direção radial, a madeira de Freixo é mais estável quando sujeita a ciclos de secagem e de saturação, não apresenta tanta oscilação como sucede com a madeira de Pinho, que no terceiro ciclo obtém valores próximos dos obtidos no primeiro ciclo.

Podemos concluir então que para no Freixo há uma tendência para a estabilização das madeiras ao longo do processo de envelhecimento como podemos verificar na Figura 42 e na Tabela 2.

IV.1.2 Variação dimensional na direção tangencial

No subcapítulo a seguir é feita a análise da variação dimensional da direção tangencial das duas espécies de madeira em estudo.

Os gráficos da Figura 43 apresentam os resultados obtidos para a variação dimensional da madeira segundo a direção tangencial nos dois primeiros ciclos.

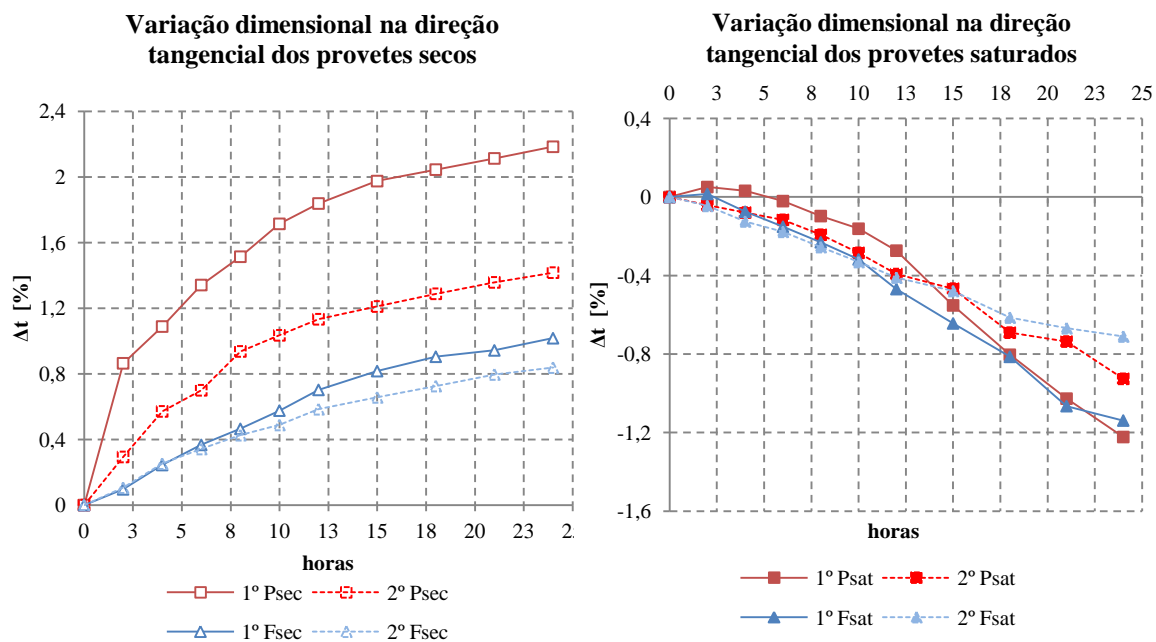


Figura 43 - Variação dimensional na direção tangencial em função do tempo.

Segundo a direção tangencial, a madeira de Pinho, previamente seca, foi a que apresentou alterações mais significativas, atingindo um aumento em relação ao seu tamanho inicial da ordem dos 2,15% nos provetes secos, enquanto nos provetes previamente saturados sofre um encolhimento da ordem dos 1,15%. Estas alterações foram registadas durante o primeiro ciclo. No segundo ciclo, registou-se um aumento da variação dimensional para 1,4%, nos provetes secos e uma diminuição da ordem dos 0,87% nos provetes saturados. Nos provetes previamente saturados verificou-se que a madeira de Freixo foi a espécie que apresentou um comportamento mais estável tendo verificando-se, no primeiro ciclo, um aumento de 1% e uma diminuição de 1,14%. No segundo ciclo o Freixo teve um aumento de 0,83% nos provetes secos e uma diminuição de 0,71% nos provetes saturados. A partir da análise dos da Figura 43, para as duas espécies de madeira secas, pode afirmar-se que a madeira de Freixo apresenta um comportamento mais estável quando comparado com amostras da madeira de Pinho. As duas espécies estabilizam após 24 horas de permanência na câmara húmida.

Na Figura 44 apresentam-se os resultados da variação dimensional na direção tangencial para o 3º ciclo.

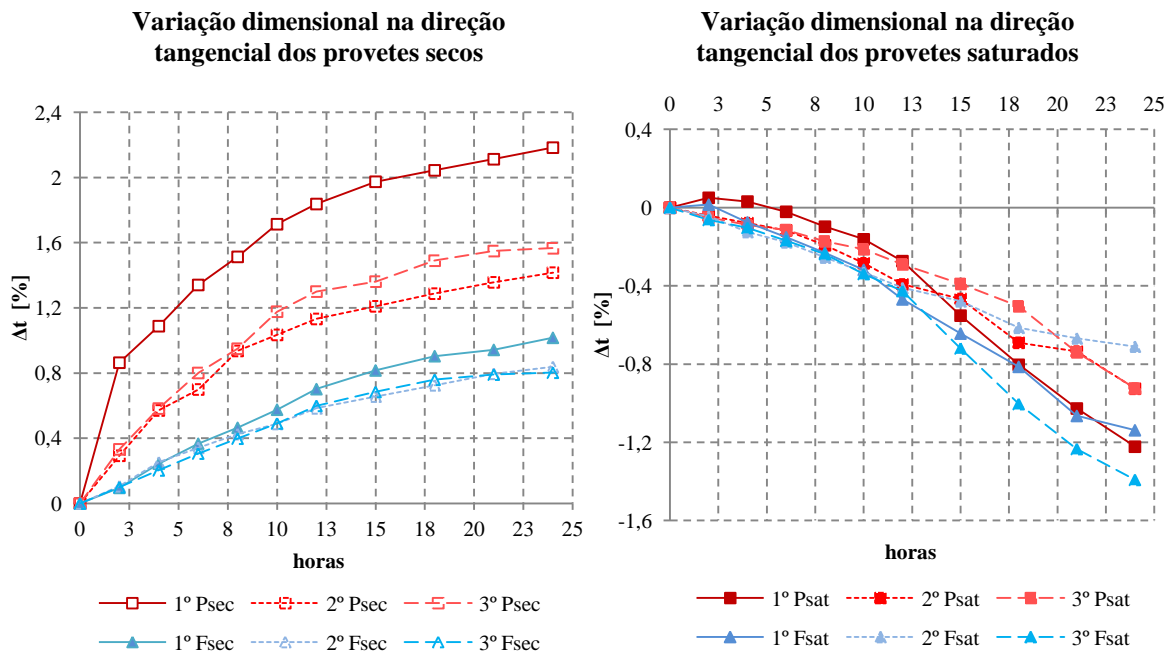


Figura 44 - Variação dimensional na direção tangencial em função do tempo (com o 3º ciclo).

Para o terceiro ciclo, quer a madeira de Pinho quer a madeira de Freixo têm gráficos muito próximos dos obtidos para o primeiro e o segundo ciclo, mesmo depois dos provetes terem sofrido alterações e envelhecimento. O pinho quando seco tem um aumento em relação à medida inicial de 1,66% e quando saturado tem uma diminuição de 0,9%. O Freixo tem um aumento de 0,8% quando seco e tem uma diminuição de 1,4% quando saturado. Como se pode verificar nos gráficos da Figura 44 o Freixo é a espécie que tem um comportamento mais estável quando previamente seco. Nos provetes previamente saturados, o Pinho tem um comportamento mais oscilatório ao longo do tempo quando comparado com o Freixo.

Na tabela 3 é feita a síntese dos valores de variação dimensional registados para ambas as espécies de madeira segundo a direção tangencial em termos absorção de humidade e de retração.

Tabela 3 – Síntese dos valores obtidos para a variação dimensional segundo a direção tangencial.

Direção tangencial	Pinho		Freixo	
	Psec	Psat	Fsec	Fsat
1º ciclo	2,15%	1,15%	1,0%	1,14%
2º ciclo	1,4	0,87%	0,83%	0,71%
3º ciclo	1,66%	0,9%	0,8%	1,4%

Os valores são indicativos, que segundo a direção tangencial, a madeira de freixo é mais estável quando sujeita a ciclos de secagem e de saturação, não apresenta tanta oscilação como sucede com a madeira de pinho. No entanto, segundo a direção tangencial, e para o terceiro ciclo, as variações das dimensões não são tão acentuadas como se verificou na direção radial.

IV.1.3 Variação dimensional na direção longitudinal

No subcapítulo a seguir é feita a análise da variação dimensional da direção longitudinal do Pinho e do Freixo.

Os gráficos da Figura 45 apresentam os resultados obtidos para a variação dimensional da madeira segundo a direção longitudinal nos dois primeiros ciclos.

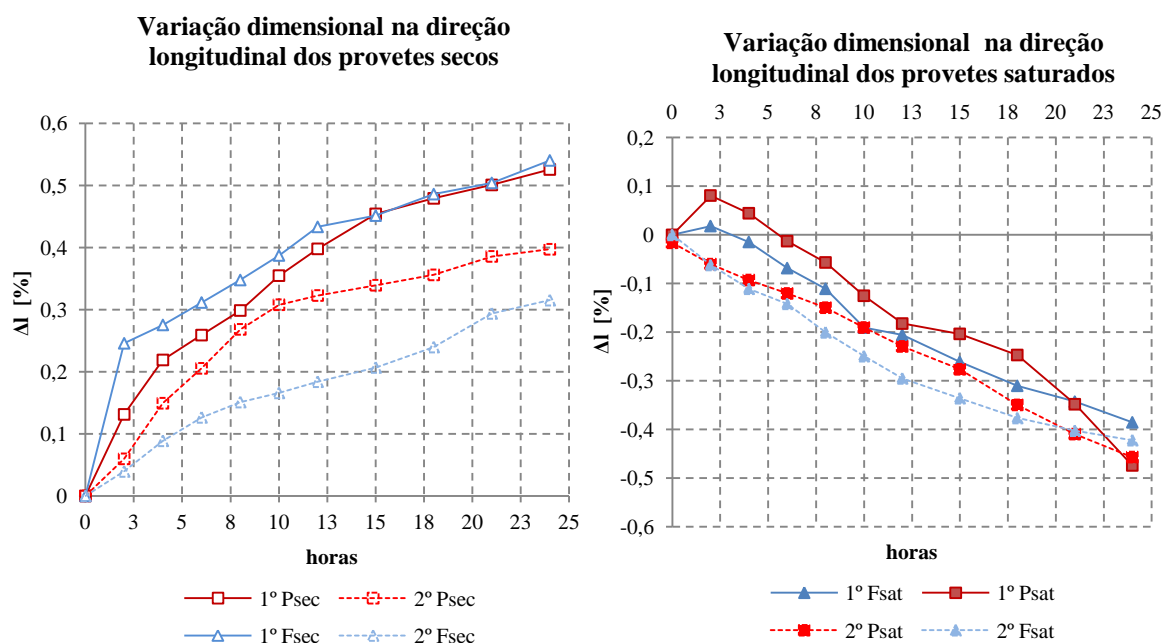


Figura 45 - Variação dimensional na direção longitudinal em função do tempo.

A partir da análise da Figura 45 podemos verificar que as duas espécies de madeira se tornam estáveis após 24 horas. Os provetes de Pinho previamente secos são mais estáveis que os provetes de Freixo, no caso dos provetes previamente saturados acontece o mesmo. Segundo a direção longitudinal nos provetes saturados, observou-se que ambas as espécies de madeira sofrem alterações de cerca de 0,45 %. No que se refere aos provetes secos, no primeiro ciclo ambas as espécies sofreram um aumento de

cerca de 0,52 % já no segundo ciclo verificou-se uma diminuição em relação ao primeiro ciclo de 0,1 % para o Pinho e de 0,2 % para o Freixo. Na Figura 46 apresentam-se os resultados da variação dimensional na direção longitudinal para o 3º ciclo.

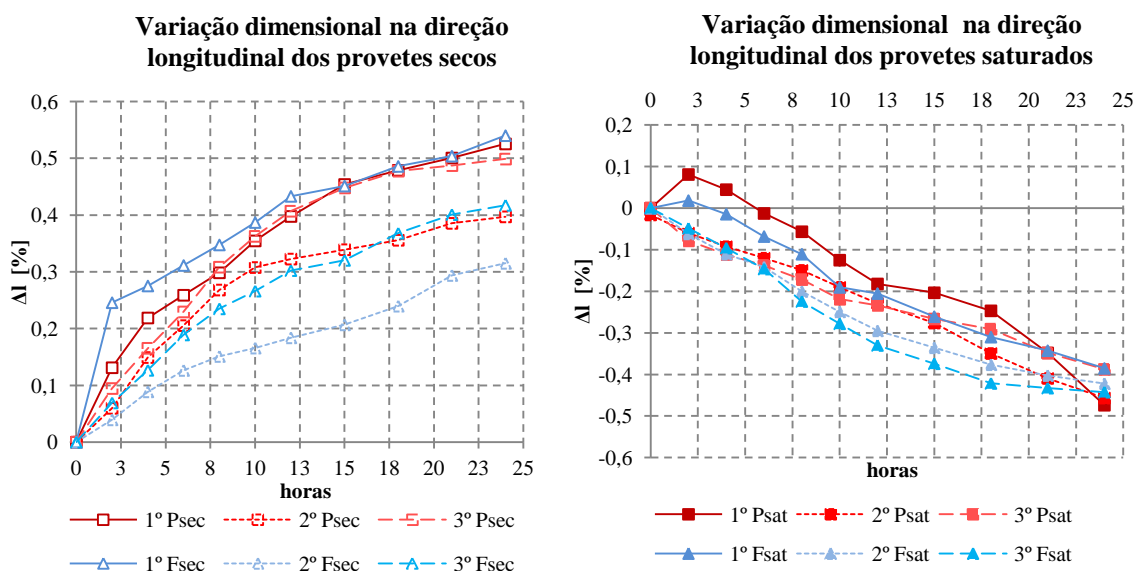


Figura 46 -Variação dimensional na direção longitudinal em função do tempo (com o 3º ciclo).

Na Tabela 4 é feita a síntese dos valores de variação dimensional registados para ambas as espécies de madeira segundo a direção longitudinal em termos absorção de humidade e de retração.

Tabela 4 – Síntese dos valores obtidos para a variação dimensional segundo a direção longitudinal.

Direção longitudinal	Pinho		Freixo	
	Psec	Psat	Fsec	Fsat
1º ciclo	0,53%	0,47%	0,54%	0,39%
2º ciclo	0,4%	0,46%	0,32%	0,42%
3º ciclo	0,50%	0,39%	0,42%	0,43%

Através da análise da Figura 46 e da Tabela 4 verifica-se que para o 3º ciclo nos provetes saturados, os valores obtidos são todos muito próximos, da ordem dos 0,41% quer para a madeira de Freixo como para a madeira de Pinho. Nos provetes secos verificou-se um aumento de dimensão na ordem dos 0,5% para o Pinho e de 0,42% para o Freixo.

Em suma podemos dizer que a madeira de Freixo é a que tende a estabilizar mais rapidamente quando saturada comparada com o Pinho, e o Pinho quando seco tem um comportamento mais estável quando comparado com o Freixo. Notou-se, ainda, uma tendência para diminuir as diferenças registadas nos comprimentos dos provetes, em todas as direções, à medida que os ciclos aumentaram. Há pois uma tendência para a estabilização das madeiras ao longo do processo de envelhecimento, comportamento similar foi verificado em trabalhos de outros autores [10].

IV.1.4 Variação da Massa

A variação da massa média para os provetes saturados e para os provetes secos obtidos durante o ensaios é representados por Δ_m , e permite avaliar a perda de massa para as duas espécies de madeira. Para os provetes saturados é espectável uma diminuição de massa e para os provetes secos deverá ocorrer o inverso, ou seja, um acréscimo de massa. As variações foram calculadas a partir da equação 2, em que m_0 é a massa inicial dos provetes e m_1 é a massa da amostra seca ou saturada, lida a cada 2 horas.

$$\Delta_m = m_1 - m_0 \quad 2$$

Nos gráficos da Figura 47 ilustram a variação de massa para ambas as espécies de madeira em estudo, previamente secas e saturadas.

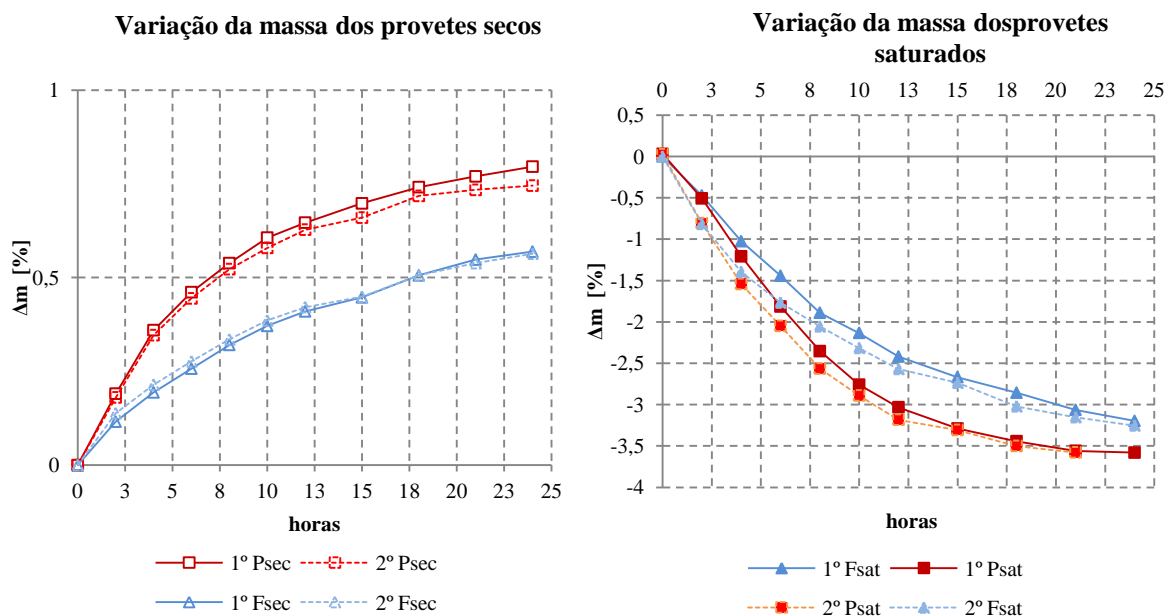


Figura 47 - Variação da massa em função do tempo.

Como se pode verificar na Figura 47 os provetes estabilizaram, em termos de massa após 24 horas de permanência na câmara húmida.

O Freixo foi a espécie que mais se aproximou nos dois ciclos, nos provetes secos obteve um aumento de 0,56 g e nos provetes saturados uma diminuição de 3,22 g em ambos os ciclos. Os provetes de Pinho previamente secos tiveram um aumento de 0,80 g no primeiro ciclo e 0,75 g no segundo ciclo, quanto aos provetes previamente saturados tiveram uma diminuição de 3,6 g quer no primeiro como no segundo ciclo. Para ambas as espécies de madeira, do primeiro para o segundo ciclo, houve um aumento de absorção de humidade para os provetes secos e uma diminuição nos provetes previamente saturados quando colocados na câmara húmida. Os gráficos da Figura 48 ilustram a variação de massa para ambas as espécies de madeira para os três ciclos em análise.

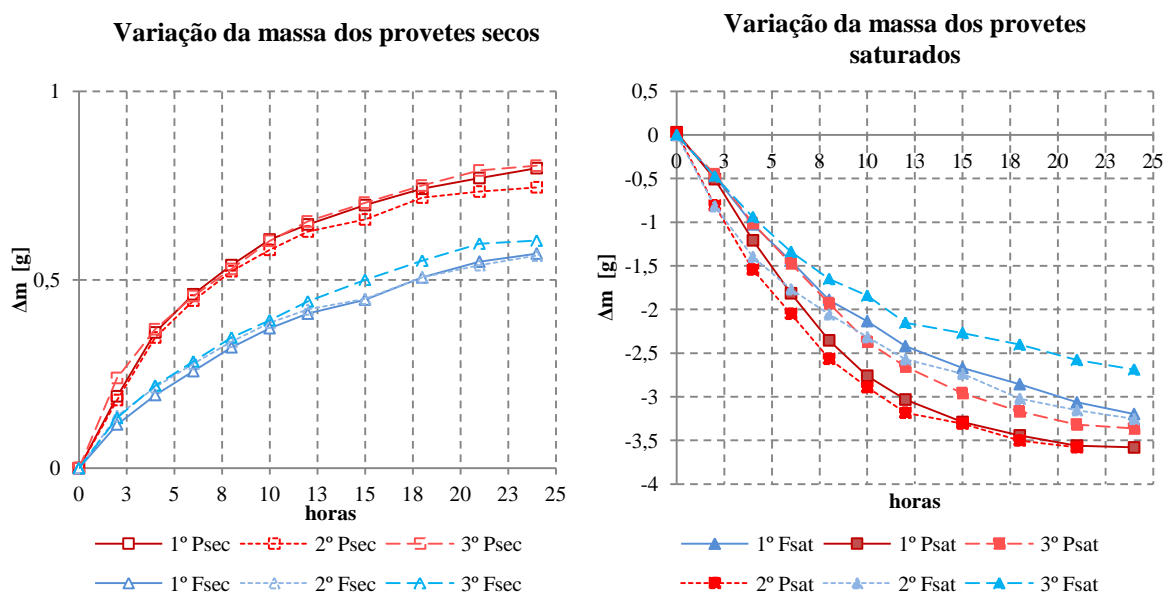


Figura 48 - Variação da massa em função do tempo (com 3º ciclo).

A partir da análise da Figura 48 verifica-se que para o terceiro ciclo, os provetes secos apresentam incremento de massa para os dois tipos de madeira, e os provetes saturados apresentam diminuição de massa. Em termos globais os provetes do 3º ciclo tem um incremento 0,05 g nas duas espécies comparadas com o segundo ciclo e obtêm variação de massa com valores iguais aos do primeiro ciclo. Nos provetes saturados, registou-se

uma diminuição de massa de 0,3 g no Pinho em comparação com os dois primeiros ciclos, e no Freixo a diminuição foi de 0,54 g.

Na Tabela 5 é feita a síntese dos valores de variação de massa registados para ambas as espécies de madeira em termos absorção de humidade e de retração.

Tabela 5 – Síntese dos valores da variação da massa.

	Pinho		Freixo	
	Psec	Psat	Fsec	Fsat
1º ciclo	0,8g	3,58g	0,59g	3,20g
2º ciclo	0,75g	3,61g	0,56g	3,23g
3º ciclo	0,8g	3,36g	0,6g	2,69g

Da análise da Figura 48 e da tabela 5 pode ver-se que os pesos referentes ao terceiro ciclo seguem a tendência do primeiro e segundo ciclo. Nos provetes saturados as duas espécies obtiveram diminuições bastante inferiores às do primeiro e segundo ciclo.

Os gráficos da Figura 49 ilustram a média da medição de massa para ambas as espécies de madeira para os três ciclos em análise.

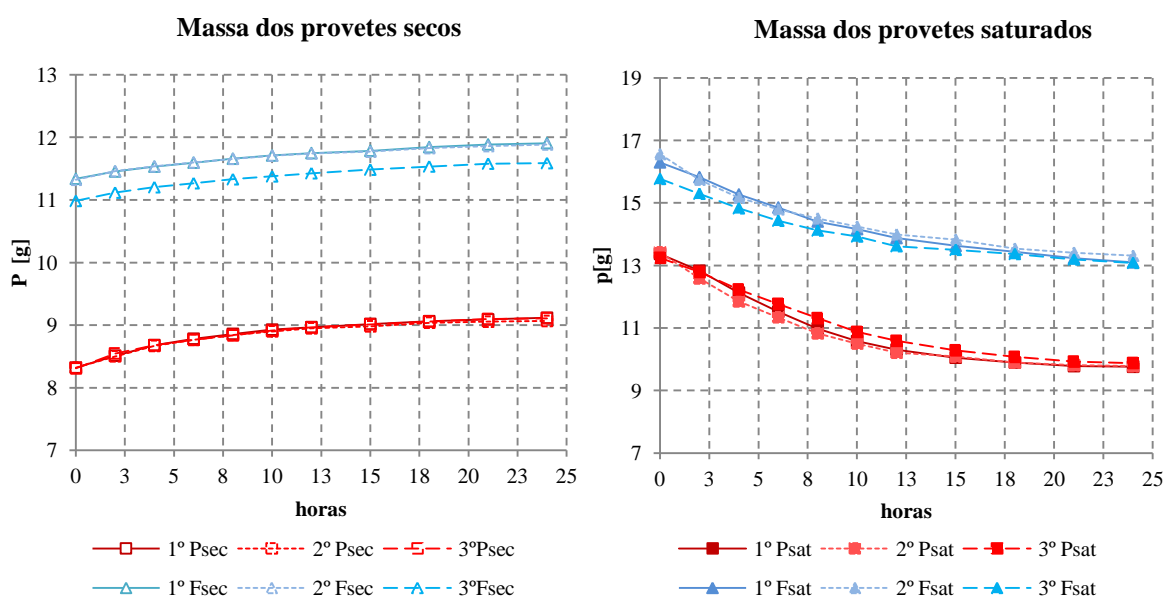


Figura 49 - Média das massas obtidas.

Na Tabela 6 é feita a síntese dos valores da média da massa registados para ambas as espécies de madeira em termos absorção e perda de humidade.

Tabela 6 – Síntese dos valores da massa.

	Pinho			Freixo		
	Psec	Psat	Peso inicial	Fsec	Fsat	Peso inicial
1º ciclo	9,12g	9,76g	8,32g	11,91g	13,10g	10,99
2º ciclo	9,07g	9,78g		11,89g	13,31g	
3º ciclo	9,11g	9,88g		11,59g	13,08g	

A Partir da análise da Figura 49 e da Tabela 6 verifica-se que o Freixo é a espécie que tem massa mais elevada e que os provetes depois de dois ciclos de saturação ao sofrerem secagem ganham peso em relação ao peso inicial. O Pinho (espécie resinosa) mesmo depois do processo de envelhecimento mantém o peso, mais próximo do peso inicial. A perda e o ganho de massa começa a estabilizar a partir das 12 horas.

IV.1.5 Massa Volúmica

A massa volúmica ou densidade da madeira está ligada ao seu teor em água, quanto maior o teor em água maior a massa volúmica. Este indicador permite determinar a massa que a madeira tem por cada unidade de volume. A massa volúmica de um provete de madeira é determinada segundo a NP EN 616 [8].

Para a determinação da massa volúmica de um provete é necessário calcular o volume do provete por medição das arestas e a massa do provete por pesagem, é necessário determinar o valor do teor em água e o coeficiente de retração volumétrica.

A massa volúmica para determinado teor de humidade, em gramas por centímetro cúbico, é:

$$\rho_H = \frac{m_H}{V_H} \quad 2$$

em que :

m_H - massa do provete expresso em gramas

V_H - volume do provete expresso em centímetros cúbicos

A massa volúmica de referência (12 %), em gramas por centímetro cúbico, é:

$$\rho_{12} = \rho_H \times \frac{(100+12) \times (100 + \alpha_v \times H')}{(100+H) \times (100+12 \times \alpha_v)} \quad 3$$

em que:

α_v - coeficiente de retração volumétrica do provete, expresso em percentagem

H' toma o valor de H ou de S conforme o teor em água (H) do provete é inferior, ou não, ao de saturação das fibras (S)

O coeficiente de retração volumétrica foi determinado segundo a norma NP 615 [11] onde refere que é a retração volumétrica correspondente à diminuição da humidade desde o teor em água de saturação das fibras até 0%.

$$\alpha_v = \frac{V_2 - V_3}{V_3 \times H} \times 100 \quad 4$$

Em que:

V_2 - volume do provete seco ao ar, expresso em centímetros cúbicos

V_3 - Volume do provete seco em estufa, expresso em centímetros cúbicos

H - Teor em água do provete seco ao ar, expresso em percentagem

A Figura 50 mostra a variação da massa volúmica de referência para os provetes secos e para os provetes saturados

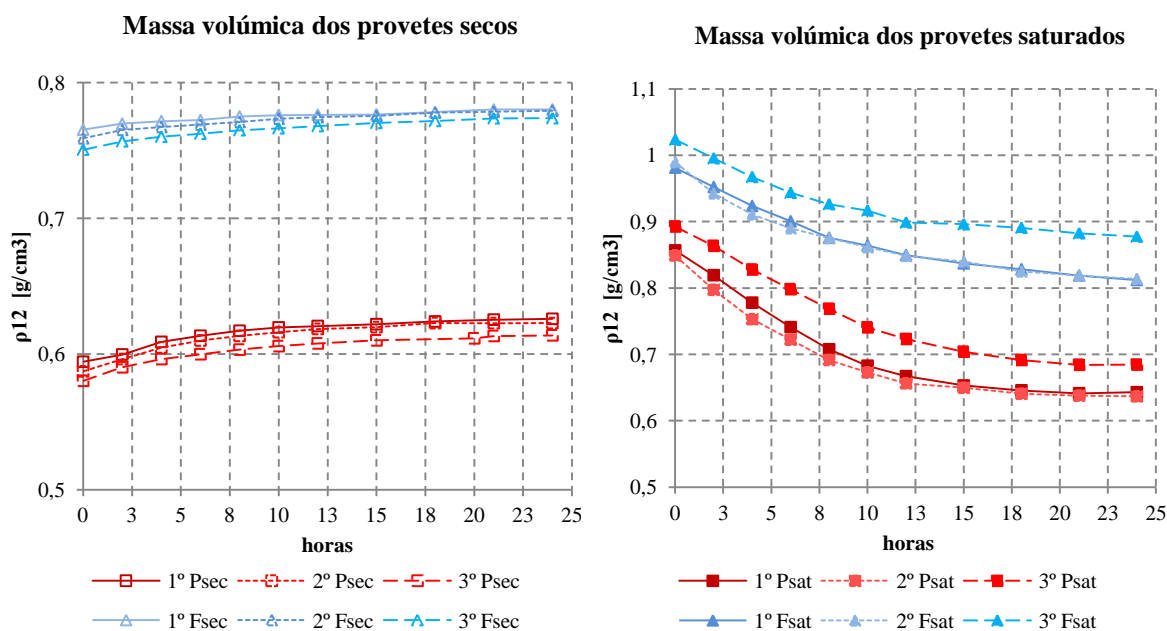


Figura 50 - Relação entre as horas e massa volúmica.

Segundo a referência [12] "as massas volúmicas aumentam com a humidade relativa, significando pois que a relação entre a massa e o volume dos provetes é crescente".

Os provetes secos ao serem colocados na câmara húmida a humidade aumentou bem como a massa volúmica (Tabela 7). Nos provetes que foram saturados a humidade é máxima assim ao serem colocados na câmara húmida a humidade vai diminuir (Tabela 7) até estabilizarem. O gráfico obtido da massa volúmica é a decrescente como podemos ver na Figura 50.

Tabela 7 - Massa volúmica de referência.

Período	Freixo saturado		Pinho saturado		Freixo seco		Pinho seco	
	ρ_{12} (g/cm ³) média							
	1º ciclo	2º ciclo	1º ciclo	2º ciclo	1º ciclo	2º ciclo	1º ciclo	2º ciclo
2 horas	0,952	0,942	0,819	0,787	0,770	0,765	0,6	0,596
8 horas	0,876	0,875	0,708	0,692	0,775	0,771	0,617	0,613
15 horas	0,837	0,840	0,653	0,650	0,77	0,776	0,622	0,620
24 horas	0,812	0,814	0,643	0,637	0,780	0,779	0,626	0,623

Através da análise da Tabela 7 verifica-se que a massa volúmica dos provetes saturados diminuiu com a permanência dos provetes na câmara climática. No segundo ciclo registaram-se valores ligeiramente inferiores ao primeiro ciclo, sendo o valor inicial 0,952 g/cm³ e o final 0,814 g/cm³ para o Freixo e para o Pinho o valor inicial foi de 0,8 g/cm³ e o final foi de 0,64 g/cm³. No terceiro ciclo registaram-se valores iniciais e finais superiores aos dois primeiros ciclos para as duas espécies de madeira.

Nos provetes secos verificou-se um aumento da massa volúmica, tendo-se registado valores muito próximos nos dois ciclos, para o Freixo o valor inicial foi de 0,77 g/cm³ e o final 0,784 g/cm³ e para o Pinho o valor inicial registado foi de 0,6 g/cm³ e o final 0,62 g/cm³. No terceiro ciclo, os valores iniciais e finais foram inferiores aos dois primeiros ciclos para as duas espécies de madeira.

A madeira de Freixo é mais densa do que a madeira de Pinho. De acordo com o autor [13] a massa volúmica do Pinho está entre 320-800 Kg/m³ com uma média de 500 Kg/m³ e a massa volúmica média do Freixo é de 700 Kg/m³. segundo o autor [14] a massa volúmica do Freixo está compreendida entre os 650-800 Kg/m³ .

Como podemos verificar na Tabela 7 os valores obtidos da massa volúmica estão dentro dos valores de referência dos autores.

IV.1.6 Teor em água

O teor em água da madeira é um dos fatores que condicionam a sua eventual degradação por agentes biológicos, já que térmitas e fungos de podridão necessitam geralmente de humidade elevada, pelo que a manutenção do teor de água da madeira abaixo de certos valores impede o ataque por aqueles agentes. Durante o processo de secagem de uma determinada espécie de madeira, quando o valor da humidade se situar acima do teor de saturação das fibras, apenas se verifica uma pequena alteração da massa da madeira, mantendo-se praticamente inalteradas as suas dimensões.

O teor em água de uma madeira é determinado com a ajuda da norma NP EN 614 de 1973, [7] obtido com o quociente, expresso em percentagem, da massa de água presente nessa madeira pela massa do provete depois de seco até atingir o estado anidro. Considera-se que toda a água presente na madeira (água livre + água de impregnação) se evapora quando o provete é sujeito a uma secagem a 103 +/- 2°C até atingir massa constante.

O teor em água de referência de um provete de madeira é de 12%. O provete é pesado e seco em estufa durante 24h, findo esse período, o provete é retirado da estufa, e é colocado na câmara húmida e as medições do peso foram feitas de 2 em horas até estabilizar. Como podemos verificar o teor não foi determinado seguindo corretamente a norma NP614 de 1973,[7] o teor foi determinado através da medição dos pesos. O teor em água, H , expresso em percentagem, é determinado de acordo com a equação 5.

$$H = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad 5$$

Sendo:

m_1 a massa do provete húmido, expresso em gramas

m_2 a massa do provete seco, expresso em gramas

Os gráfico da Figura 51 e Figura 52 ilustram a variação do teor em água dos provetes secos e saturados respetivamente

Teor em água dos provetes secos

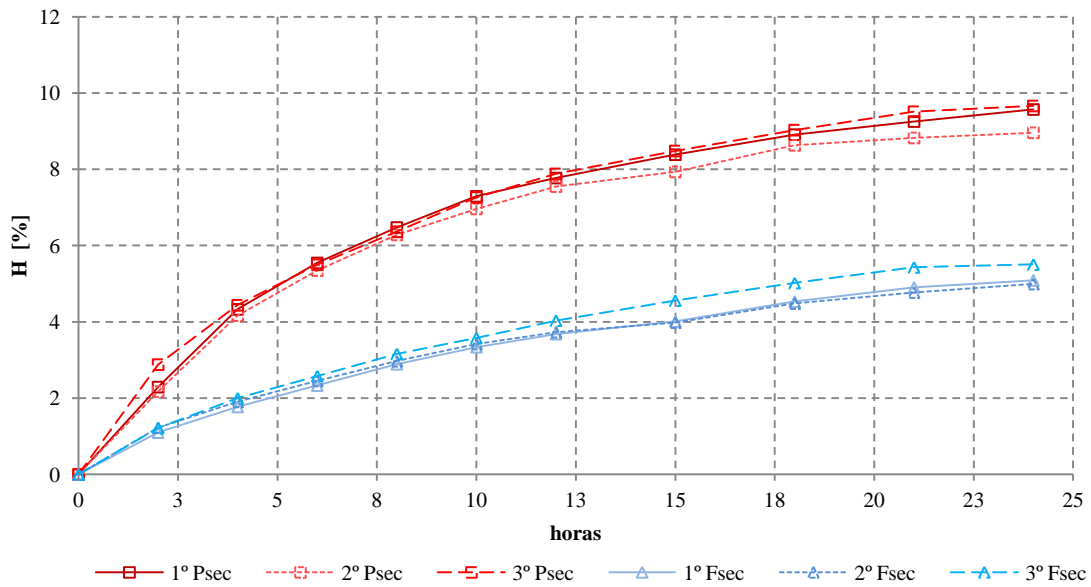


Figura 51 - Teor em água em função do tempo dos provetes secos.

Dos resultados apresentados na Figura 51, em termos de teor de água (H), verifica-se que a estabilização ocorreu passadas 20h. No primeiro e segundo ciclo o Freixo estabilizou com um incremento de teor em água de 5% e no terceiro ciclo com 5,5%. O Pinho nos três ciclos estabilizou com um incremento de teor de aproximadamente 9,6%.

Tabela 8- Síntese do valores do teor em água dos provetes secos.

	Pinho seco	Freixo seco
1º ciclo	9,6 %	5%
2º ciclo	9,6 %	5%
3º ciclo	9,6 %	5,5%

A madeira de Freixo estabiliza o seu teor em água mais rapidamente que a madeira de Pinho. De acordo com alguns autores [1] e pelos resultados obtidos, verifica-se um intervalo entre 0 e 13%, ou seja, madeira classificada como dessecada.

Foi também determinado o teor em água para os provetes que foram saturados, o comportamento obtido foi o esperado. Ao fim de um determinado tempo de permanência na câmara climática foi estabelecida uma relação de equilíbrio com o meio envolvente atingindo o teor de equilíbrio.

Teor em água dos provetes saturados

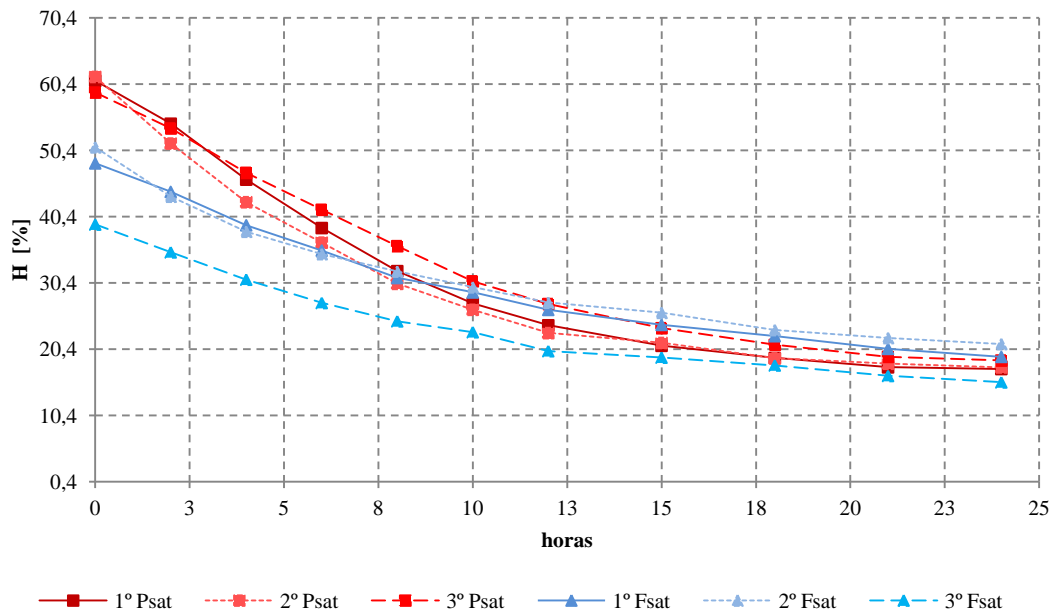


Figura 52 - Teor em água em função do tempo dos provetes saturados.

Na Figura 52 podemos verificar que os provetes estabilizam passadas as 20 horas de permanência na câmara húmida, e que as duas espécies estabilizam com valores do teor em água muito próximos. Os provetes de Freixo referentes ao primeiro e segundo ciclo estabilizaram para um teor em água de 21% e no terceiro ciclo estabiliza para um teor de 14,5%. Os provetes de Pinho para os dois primeiros ciclos estabilizam aproximadamente a 17,4% e no terceiro ciclo estabiliza com um teor de 18,7% do teor de humidade.

Os resultados demonstram o comportamento higroscópico esperado.

Na Tabela 9 é feito um resumo dos valores do teor em água para os provetes saturados.

Tabela 9 - Síntese dos valores do teor em água dos provetes saturados.

	Pinho saturado	Freixo saturado
1º ciclo	17,4 %	21%
2º ciclo	17,4 %	21%
3º ciclo	18,7 %	14,5%

Relacionando a retração e o teor de água é possível verificar-se o típico comportamento das madeiras resinosas. Com base nos resultados experimentais obtidos é possível concluir-se que a madeira perde água mais rapidamente do que ganha.

Tabela 10- Teores de água de equilíbrio.

Teor de água de equilíbrio (%)	
Pinho	9,57
Freixo	5,09

Mais uma vez é visível na Tabela 10 que o teor em água mais elevado diz respeito ao Pinho relativamente ao Freixo.

O gráfico da Figura 53 ilustra a relação entre a variação dimensional e o teor em água.

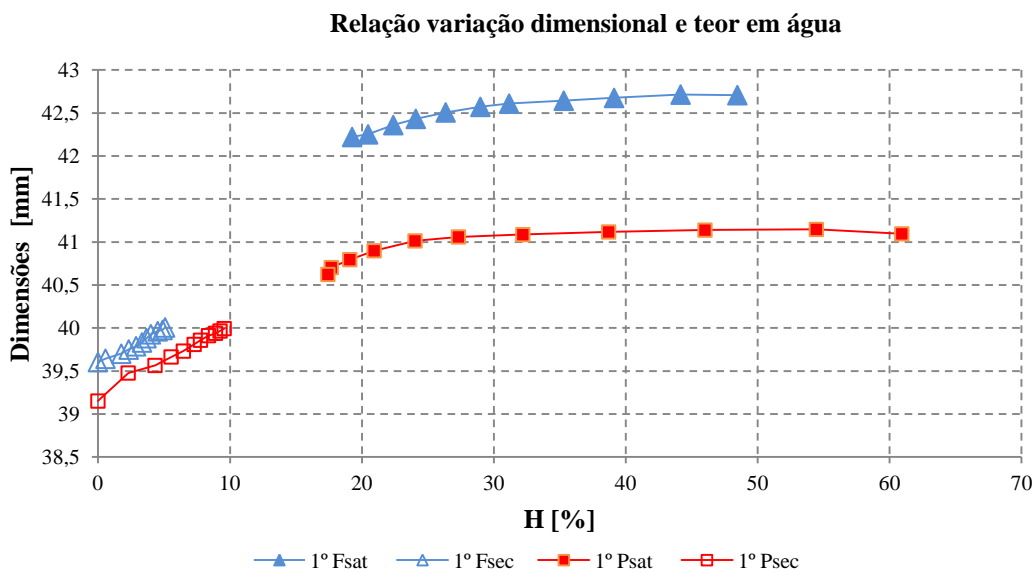


Figura 53 - Variação dimensional em função do teor em água.

Com a análise da Figura 53 podemos verificar que as duas espécies de madeira tendem a estabilizar nos mesmos pontos, ou seja, os provetes que foram saturados diminuem as dimensões com a perda de água, já os provetes que foram secos absorvem água aumentando assim as dimensões.

O Pinho é a espécie que quer previamente seco quer previamente saturado apresenta variação dimensional superior e tem maior capacidade de absorver e perder água.

Não temos continuidade dos gráficos dos provetes secos com os saturados, podendo haver várias razões para o sucedido tais como:

- O teor de água dos provetes secos, admitido inicialmente como 0, visto que a massa não variava depois de vários dias na estufa, pode não ser correto já que existe água que a madeira não perde na secagem porque faz parte da sua constituição natural

- A secagem a temperaturas elevadas pode influenciar negativamente a estrutura da madeira, danificando-a, não deixando neste caso as madeiras exprimirem o seu real comportamento natural.

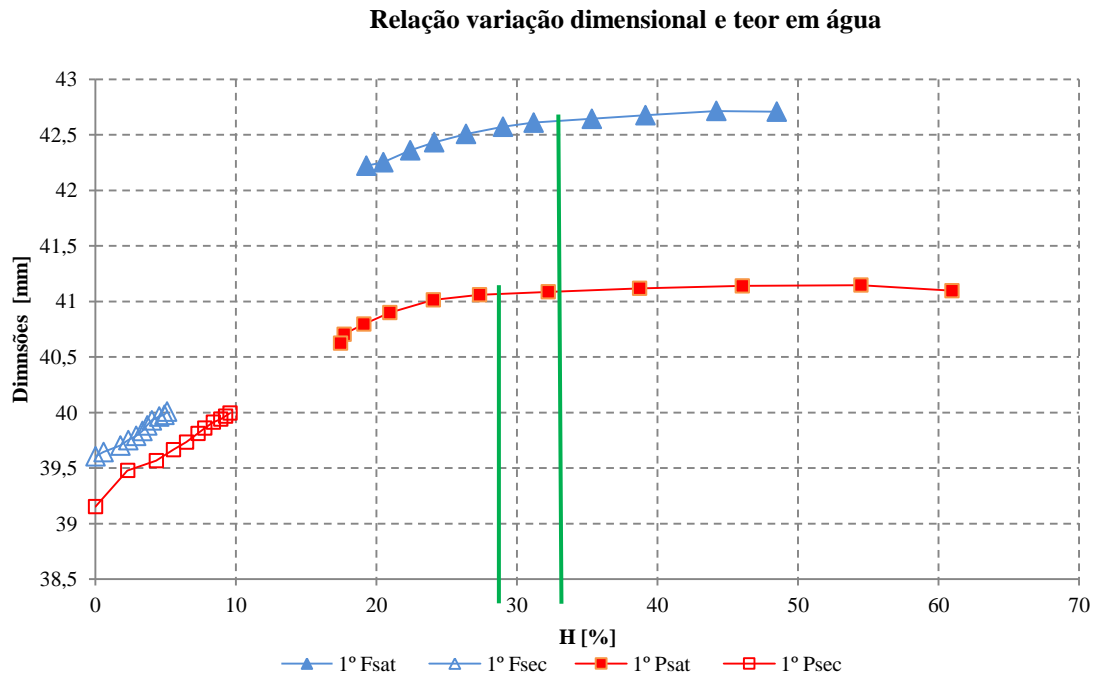


Figura 54 - Variação dimensional em função do teor em água.

Através da Figura 54 que relaciona a variação dimensional em função do teor de água pode verificar-se o teor de água correspondente ao ponto de saturação das fibras das duas madeiras, mas não sendo possível fazer uma análise em função do tempo.

O teor em água correspondente ao ponto de saturação das fibras, é o teor abaixo do qual a variação do teor de água representa uma variação dimensional, isto é, até ao ponto de saturação das fibras existe perda de água mas apenas se traduz numa variação de peso e teor de água e, a partir desse ponto a perda do teor de água influencia as dimensões da madeira, fazendo com que a variação dimensional acompanhe a variação do teor de água ao fim de tempo determinado, permita à madeira estabilizar para as condições a que está exposta.

Segundo a referencia [15] "A resistência mínima mantém-se aproximadamente constante durante o primeiro período da secagem, precisamente até à altura em que se atinge nas células do lenho a humidade correspondente ao ponto de saturação das fibras que é, em média, de 24 % para o pinho bravo e que oscila em geral, para as diferentes

madeiras, entre aquele valor e 32 %. Abaixo destes valores deixa de existir água livre no lúmen das células e toda a água que se liberta do lenho sai da parede celular, que fica, assim, sujeita a retrações e adquire características diferentes, do ponto de vista de resistência mecânica, tanto mais elevadas quanto mais baixo o teor de água nela contido". O teor em água correspondente ao ponto de saturação das fibras no pinho é de aproximadamente 28 %, sendo este um valor estimado e que se aproxima da referência [1]. O teor em água correspondente ao ponto de saturação das fibras do Freixo é superior à do pinho, tendo esta um valor de aproximadamente 38 %. O gráfico da Figura 55 ilustra a relação entre a massa volúmica e o teor em água.

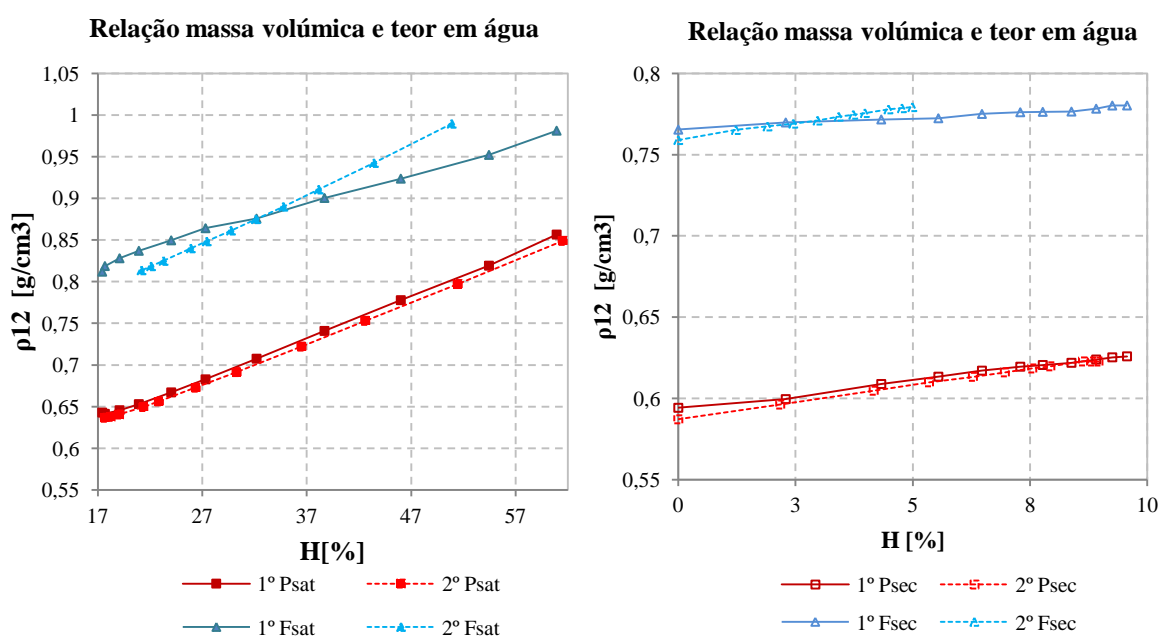


Figura 55 - Massa volúmica em função do teor em água.

Os resultados obtidos confirmam o comportamento higroscópico esperado, assim no início do tempo em que os provetes são submetidos às condições ambiente verifica-se um comportamento mais acentuado e á medida que entram em equilíbrio, tornam-se menos expressivo. O teor em água e a massa volúmica de todos os provetes variou até atingir a condição de equilíbrio termo-higrométrico.

IV.1.7 Densidade

A densidade da madeira tem maior importância no que se refere ao seu aproveitamento devido aos seus crescimentos regulares, com grande percentagem de lenho de Verão,

apresentam elevada densidade e boas características no que concerne à resistência mecânica. A densidade é normalmente considerada em termos de massa específica aparente, sendo o cociente entre peso por unidade de volume aparente e é sempre referida ao teor de humidade com que foi determinada. A densidade é expressa em gramas por centímetro cúbico, e é determinada por:

$$D_H = \frac{m_H}{V_H} \quad 6$$

em que :

m_H -massa do provete expresso em gramas

V_H -volume do provete expresso em centímetros cúbicos

Um importante fator a considerar, quando se determina a densidade de uma madeira é, portanto, a quantidade de água que ela contém, isto é, o seu teor de humidade.

Os gráficos da Figura 56 ilustram a densidade dos provetes previamente secos e saturados do Pinho.

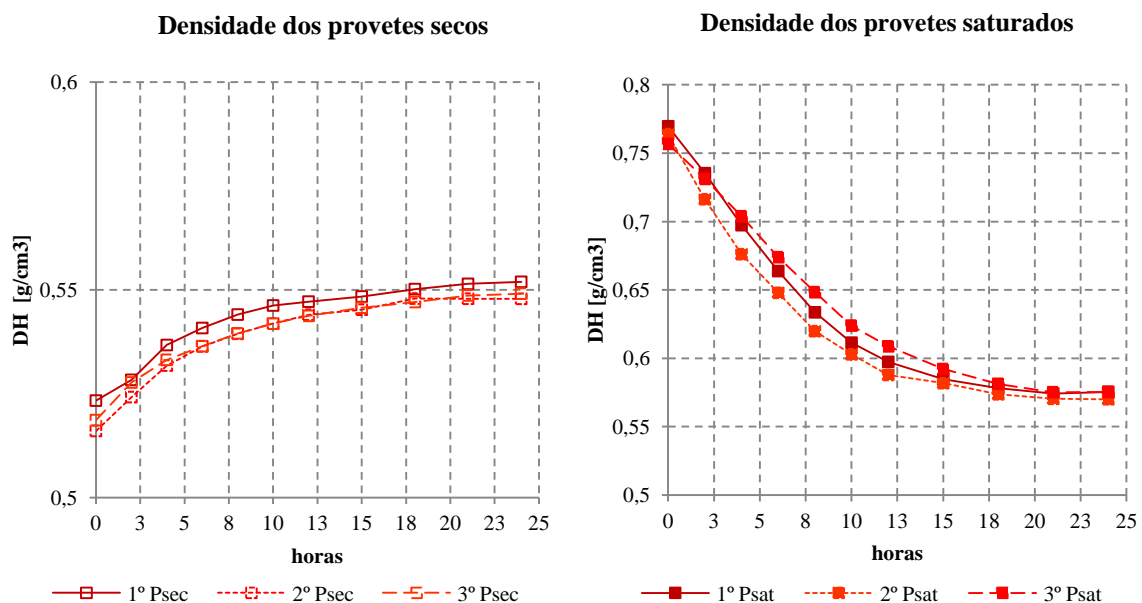


Figura 56 - Variação da densidade do Pinho em função do tempo.

Nos provetes que foram posteriormente secos a densidade vai aumentado até estabilizar próximo das 18 horas. A densidade estabiliza para o teor de humidade de referencia de 12 %. O Pinho seco estabiliza nos três ciclos com uma densidade de 0,551 g/cm³, sendo de 551 Kg/m³, e o pinho saturado estabiliza com uma densidade de 0,575 g/cm³, que corresponde a 575 kg/m³, todos estes valores são com referência na Figura 56. Na tabela

12 apresentam-se os valores das densidades das principais resinosas existentes em Portugal [15].

Tabela 11 - Densidade das principais madeiras resinosas de Portugal [15].

Nome comercial	Densidade (kg/m ³) a 12% de H	Classificação
Cipreste do Buçaco	500-600	Med. Pesada
Ciptomeria	250-300	Muito leve
Pinheiro bravo	500-600	Med pesada
Pinheiro manso	500-700	Med pesada

Segundo a Tabela 11 retirado da referência [15] podemos verificar que a densidade do Pinho em estudo tem valores de 551 kg/m³ quando seca e tem o valor de 575 kg/m³ quando saturada, o que podemos ver que corresponde ao intervalo [500-700] quer do Pinho bravo quer do pinho manso, podemos assim confirmar a densidade obtida. Os gráficos da Figura 57 ilustram a densidade dos provetes previamente secos e saturados para a madeira de Freixo.

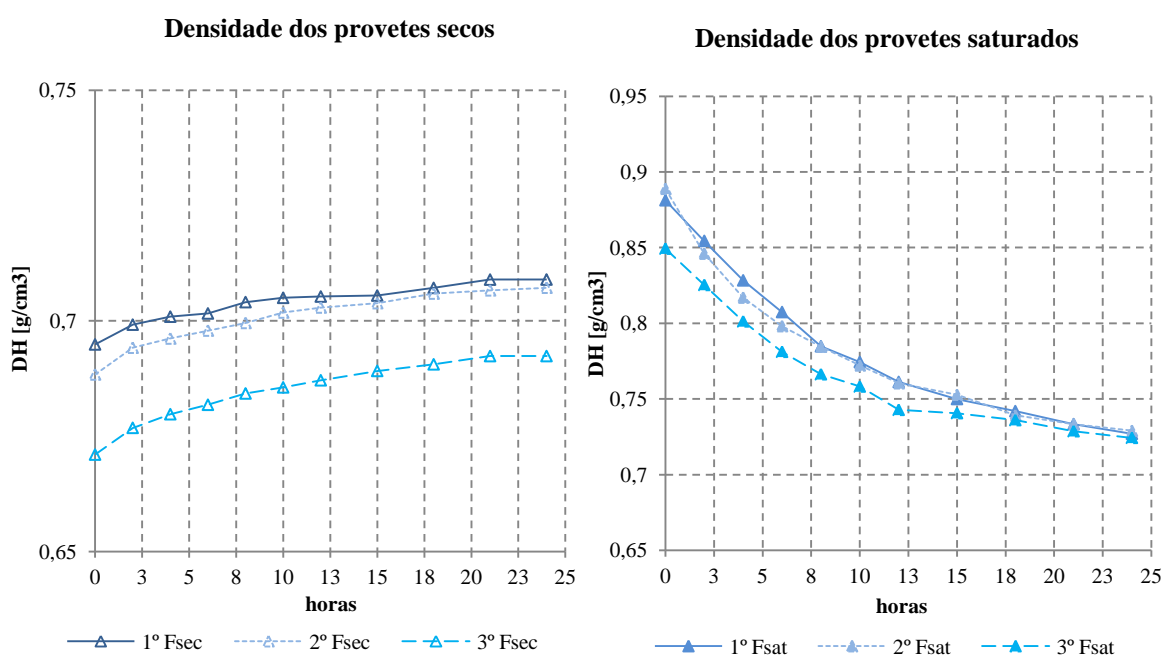


Figura 57 - Variação da densidade do Freixo em função do tempo.

Analisando os gráficos da Figura 57, verifica-se a densidade dos provetes previamente secos e saturados para a madeira de Freixo.

Podemos constatar que o Freixo seco nos dois primeiros ciclos estabiliza com uma densidade de 0,709 g/cm³, que corresponde a 709 Kg/m³ já no terceiro ciclo estabiliza com uma densidade menor de 0,692 g/cm³, que corresponde a 692 Kg/m³. Nos provetes

de Freixo que foram saturados estabilizam todos os ciclos com a mesma densidade de 0,724 g/cm³, que corresponde a 724 Kg/m³. Na tabela 13 apresenta-se o intervalo de valores de referencia a que a madeira de Freixo pertence.

Tabela 12 - Densidade das principais madeiras folhosas de Portugal [15].

Nome comercial	Densidade (kg/m ³) a 12% de H	Classificação
Acácia	550-650	Med pesada
Azinho	800-950	Pesada
Carvalho	600-900	Med pesada
Castanho	550-700	Med pesada
Choupo	400-580	Muito leve a leve
Eucalipto	700-850	Med pesada
Faia	650-800	Med pesada
Freixo	650-880	Med pesada
Nogueira	600-750	Med pesada
Plátano	650-800	Med pesada
Sobreiro	700-950	Pesada
Ulmeiro	700-800	Med pesada

Segundo a Tabela 12 retirada da referência [15] podemos verificar que a densidade do Freixo em estudo tem valores de 709 Kg/m³ quando seca e tem o valor de 724 Kg/m³ quando saturada, o que podemos ver que corresponde ao intervalo [650-700]. Na Figura seguinte apresentam-se a densidade obtida para ambas as espécies de madeira em estudo.

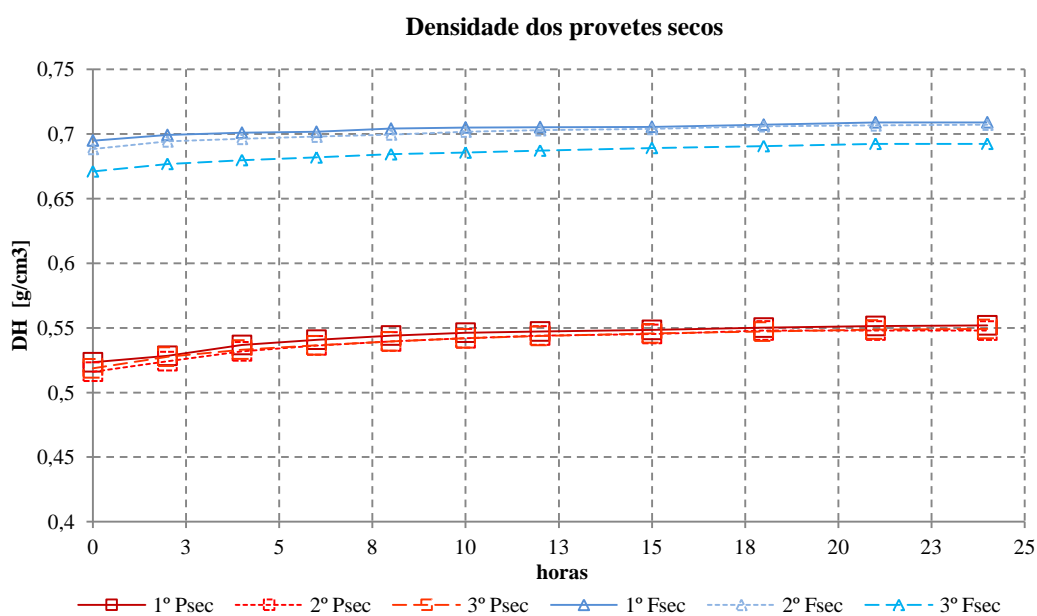


Figura 58 - Densidade dos provetes secos e saturados.

Com a análise dos gráficos da Figura 58 podemos verificar que a madeira mais densa é o Freixo em relação ao Pinho quer esteja seca quer esteja saturada.

CAPÍTULO V

RESISTÊNCIA MECÂNICA À TRAÇÃO

A caracterização das propriedades mecânicas da madeira de Pinho e de Freixo, assente na determinação dos valores da resistência mecânica à tração, tensão de rotura, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson é feita mediante ensaios de tração.

Para identificação dos provetes e interpretação dos resultados gráficos foi usada a designação apresentada na Tabela 13.

Tabela 13 - Nomenclaturas referentes às espécies da madeira.

PL	Provetes de Pinho cortados no sentido longitudinal às fibras
PT	Provetes de Pinho cortados no sentido transversal às fibras
FL	Provetes de Freixo cortados no sentido longitudinal às fibras
FT	Provetes de Freixo cortados no sentido transversal às fibras

A Resistência à tração no sentido longitudinal e transversal em relação às fibras do Pinho e Freixo é um tema ainda não estudado, assim não há valores de referência. Já foi feito um estudo de resistência á tração do castanho pela universidade do Minho cujos autores são o Artur O. Feio, José S. Machado e Paulo B. Lourenço cujo tema é "caracterização da resistência da madeira de castanho à tração paralela ao fio".

V.1 Determinação do coeficiente de Poisson

O coeficiente de Poisson (ν) é a relação entre a deformação transversal e a deformação longitudinal dentro da região elástica, em função da expressão seguinte

$$\nu = - \frac{\epsilon_{transversal}}{\epsilon_{longitudinal}} \quad 8$$

Os provetes foram instrumentados com extensómetros elétricos e tracionados na direção longitudinal sofrendo não só um alongamento no sentido longitudinal mas também uma contração no sentido transversal e vice-versa.

O alongamento (Δl) é sempre acompanhado de um decréscimo de dimensão transversal (Δd) do provete. Assim:

$$\varepsilon_{longitudinal} = \frac{\Delta l}{l} \quad 9$$

$$\varepsilon_{transversal} = \frac{\Delta d}{d} \quad 10$$

Em que, Δl é o alongamento no sentido longitudinal; l o comprimento inicial do corpo de prova; Δd o encurtamento no sentido transversal do corpo de prova; d a largura inicial do corpo de prova.

Os valores médios obtidos através dos diferentes ensaios são os apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Coeficiente de Poisson.

Coeficiente de Poisson	
PL	0,49
PT	Valor nulo
FL	0,59
FT	0,05

V.2 Resistência mecânica à tração

As propriedades mecânicas definem o comportamento da madeira quando submetida a esforços, resultando diretamente nas suas propriedades. O seu estudo reveste-se de grande interesse por permitir deduzir as condições de aplicabilidade de uma dada espécie para um determinado fim. Assim, pretende-se caracterizar a madeira quanto às suas especificidades mecânicas em duas direções, uma vez que se trata de um material anisotrópico. Serão determinadas as propriedades no sentido longitudinal ao fio e no sentido perpendicular ao fio. No sentido do fio, segundo o eixo das fibras, a resistência da madeira é superior à capacidade resistente na direção perpendicular ao fio.

Os ensaios de tração normal foram regidos pela EN 408. A deformação ficou confinada à região central do corpo de prova. A máquina de ensaios universal foi programada para alongar o provete a uma velocidade constante igual a 0,5 mm/min.

V.2.1 Análise do Freixo na direção longitudinal às fibras

Os provetes foram maquinados numa máquina CNC, representando-se na Tabela 15 em síntese os valores médios das dimensões de cada provete a ensaiar.

Tabela 15 - Dimensões dos provetes.

	Espessura média a [mm]	Largura média b [mm]	Área inicial da zona útil do provete S_0 [mm ²]	Comprimento da parte útil L_0 [mm]
FL1	9,22	30,38	280,104	115,0
FL2	9,2	30,85	283,82	115,0
FL3	9,0	30,45	274,05	115,0
FL4	9,02	30,46	274,75	115,0
FL5	9,24	30,43	281,17	115,0

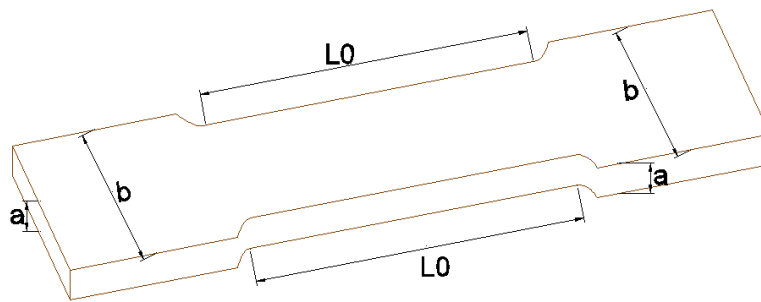


Figura 59 - Esquema das dimensões dos provetes

Segundo a direção longitudinal foram ensaiados 5 provetes de Freixo, obtendo-se a curva tensão-deformação para cada provete apresentada na Figura 60.

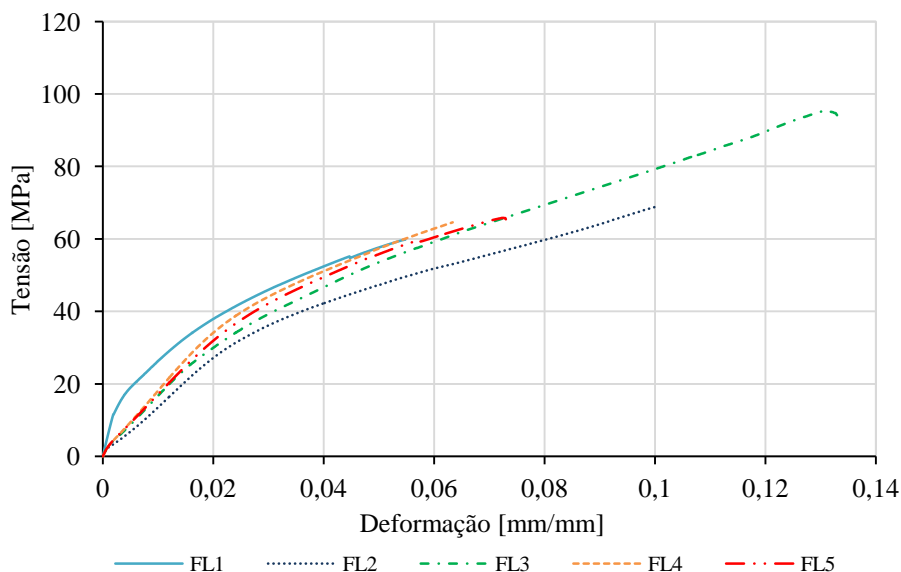


Figura 60 - Relação tensão-deformação para os provetes de Freixo na direção longitudinal.

Da análise das curvas apresentadas verifica-se, numa fase inicial, um desenvolvimento constante designado por zona elástica, que termina para deformações de aproximadamente 0,02 mm/mm e corresponde a uma tensão de 25 MPa. Acima deste valor os provetes entram na chamada zona plástica até rotura, sem verificação de oscilações do carregamento na passagem entre a zona elástica e plástica. Os provetes apresentam deformações últimas distintas, a que correspondem tensões de rotura superiores a 60 MPa. Na Tabela 16 são apresentados os valores das tensões de rotura e respetivas deformação.

Tabela 16 - Valores de rotura dos provetes.

	Tensão de rotura [MPa]	Deformação [mm/mm]
FL1	59,80	0,0548
FL2	68,86	0,100
FL3	95,29	0,133
FL4	64,60	0,122
FL5	65,78	0,073

Após a realização dos ensaios destrutivos, e confirmando o que teoricamente seria esperado [16], foram obtidos resultados, em termos de padrões de rotura, semelhantes aos previstos, Figura 61.

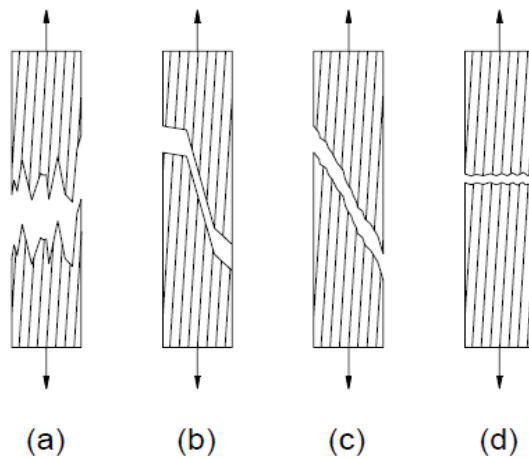


Figura 61 - Rotura típica nos provetes de madeira (a) lascado; (b) combinação de tração com corte; (c) corte; (d) tração pura [6].

Após a realização dos ensaios destrutivos e analisados os provetes, verificou-se que os resultados obtidos seriam os esperados em termos de padrão de rotura como se pode constatar na Figura 62.

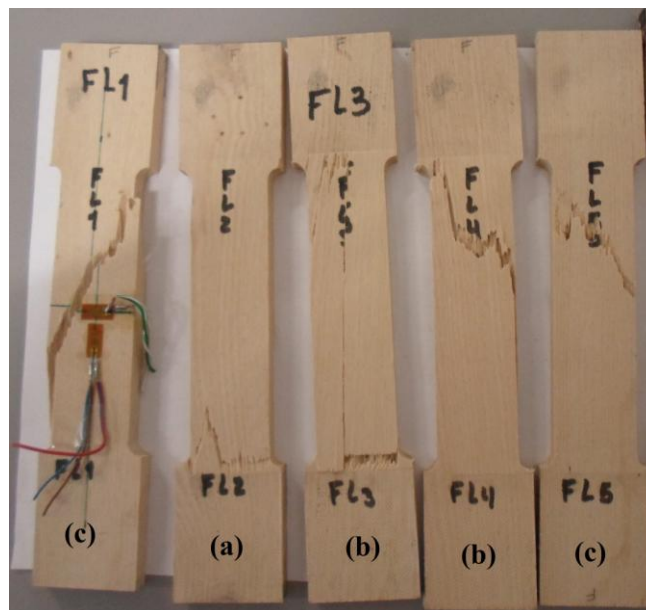


Figura 62- Tipos de rotura observados no ensaio: (a) lascado; (b) combinação de tração com corte; (c) corte.

Na Tabela 17 apresenta-se o resumo dos valores obtidos nos ensaios dos provetes.

Tabela 17- Síntese dos valores obtidos.

	Tensão de rotura [MPa]	Tensão de cedência [MPa]	Força exercida [KN]
FL1	59,80	8,67	16,75
FL2	68,86	4,88	19,54
FL3	95,29	5,23	26,12
FL4	64,60	8,72	17,75
FL5	65,78	7,26	18,5
Média	70,87	8,97	19,73
Desvio Padrão	14	2	4

A tensão de rotura média foi de 70,87 MPa e a tensão de cedência foi de 8,97 MPa.

Com o calculo do desvio padrão pode concluir-se que nos provetes analisados quanto à o FL3 poderia ser eliminado do estudo pois tem valor de tensão de rotura e de força muito superior aos restantes provetes.

V.2.2 Análise do Freixo na direção transversal às fibras

Na Tabela 18 é apresentada a síntese das dimensões dos provetes maquinados segundo a direção transversal às fibras.

Tabela 18- Dimensões dos provetes.

	Espessura média a [mm]	Largura média b [mm]	Área inicial da zona útil do provete S_0 [mm²]	Comprimento da parte útil L_0 [mm]
FT1	9,19	40,02	367,81	110,0
FT2	9,13	40,08	365,93	108,08
FT3	9,22	40,1	369,72	108,64
FT4	9,14	39,99	366,31	108,14
FT5	9,18	40,03	367,48	108,31
FT6	9,18	40,0	367,2	108,27

No gráfico da Figura 63 apresenta-se as curvas tensão-deformação para cada provete ensaiado.

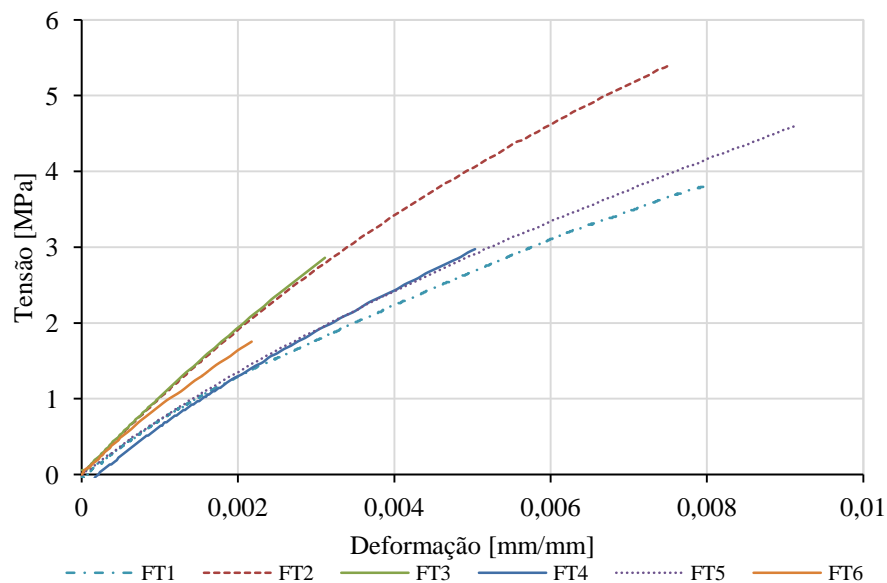


Figura 63- Relação tensão-deformação para os provetes de Freixo segundo a direção transversal.

Da análise das curvas verifica-se, numa fase inicial, um desenvolvimento constante designado por zona elástica, que termina com deformações de aproximadamente 0,001 mm/mm a que corresponde uma tensão de 0,9 MPa. Acima deste valor os provetes entram na chamada zona plástica até à rotura, sem verificação de oscilações do carregamento na passagem entre a zona elástica e plástica. Os provetes apresentam tensões de rotura distintas, dentro de um intervalo entre 1,8 MPa e 5,3 MPa, com diferentes deformações últimas

Os provetes romperam com tensões e deformações diferentes, que são apresentadas na Tabela 19.

Tabela 19 - Valores de rotura dos provetes.

	Tensão de rotura [MPa]	Deformação [mm/mm]
FT1	3,80	0,008
FT2	5,41	0,0075
FT3	2,86	0,003
FT4	2,98	0,005
FT5	4,60	0,0091
FT6	1,75	0,0022

Após a realização dos ensaios destrutivos, e confirmando o que teoricamente seria esperado [16], foram obtidos resultados, em termos de padrões de rotura, semelhantes aos previstos, Figura 61.

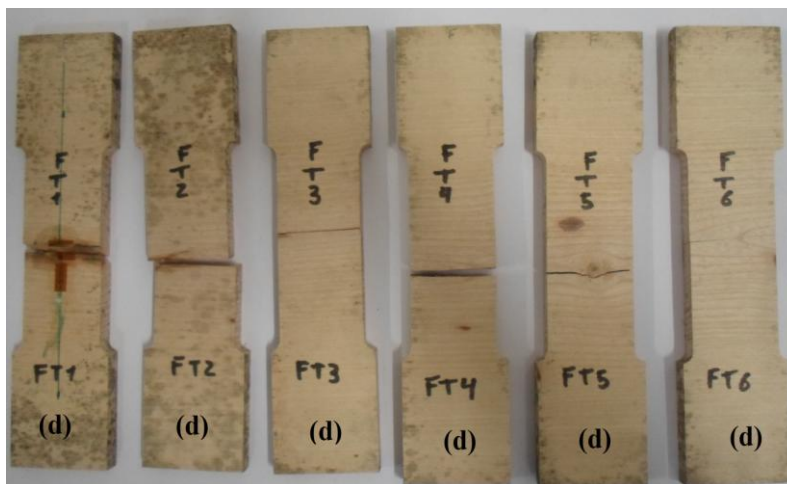


Figura 64 - Tipos de rotura observados no ensaio: (d) tração pura [6].

Na Tabela 20 são apresentados os valores obtidos nos ensaios dos 6 provetes.

Tabela 20 - Síntese dos valores obtidos

	Tensão de rotura [MPa]	Tensão de cedência [MPa]	Força máxima [KN]
FT1	3,80	2,77	1,40
FT2	5,41	5,41	1,98
FT3	2,86	2,86	1,06
FT4	2,98	2,32	1,09
FT5	4,60	3,14	1,69
FT6	1,75	1,75	0,62
Média	3,57	3,04	1,31
Desvio padrão	1	1	0.4

A tensão de rotura média foi de 3,57 MPa e a tensão de cadência média foi de 3,04 MPa. Analisando o desvio padrão pode concluir-se que os valores das tenções e das forças dos provetes ensaios são semelhantes .

V.2.3 Análise do Pinho na direção longitudinal às fibras

Na Tabela 21 apresenta-se as dimensões de cada provete a ensaiar.

Tabela 21 - Dimensões dos provetes.

	Espessura média a [mm]	Largura média b [mm]	Área inicial da zona útil do provete S_0 [mm ²]	Comprimento da parte útil L_0 [mm]
PL2	9,00	31,05	279,45	94,45
PL3	9,06	31,03	281,13	94,73
PL4	8,97	30,70	275,38	93,76
PL5	9,08	31,0	281,48	94,79
PL6	9,10	30,89	281,10	94,73

Segundo a direção longitudinal foram ensaiados 5 provetes de Pinho, obtendo-se a curva tensão-deformação para cada provete apresentada na Figura 65.

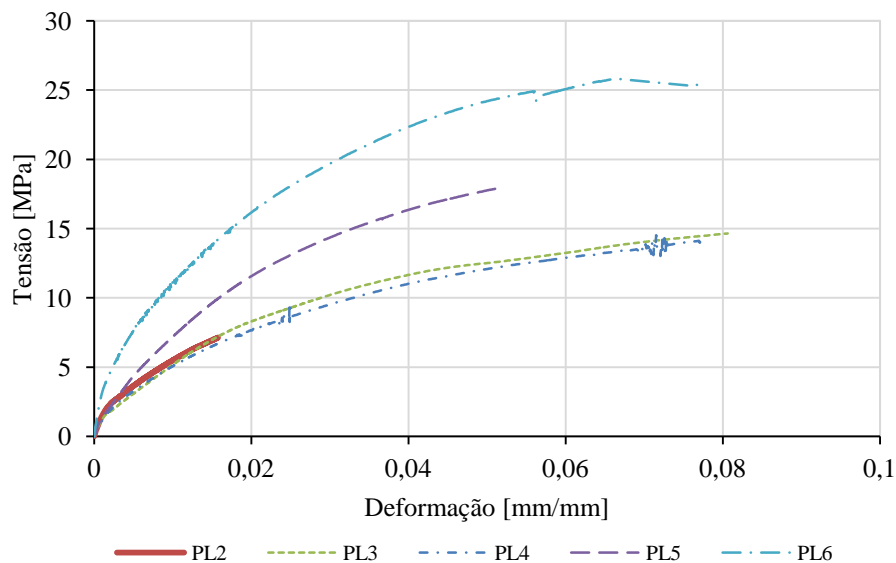


Figura 65- Relação tensão-deformação para os provetes de Pinho segundo a direção longitudinal.

Da análise das curvas apresentadas verifica-se, numa fase inicial, um desenvolvimento constante designado por zona elástica, que termina para deformações de aproximadamente 0,005 mm/mm e corresponde a uma tensão de 2,5 MPa. Acima deste valor os provetes entram na chamada zona plástica até rotura, sem verificação de oscilações do carregamento na passagem entre a zona elástica e plástica. Os provetes apresentam deformações últimas distintas, a que correspondem tensões de rotura com

valores entre 7 MPa e os 25 MPa. Os provetes romperam com tensões e deformações diferentes, que são apresentadas na Tabela 22.

Tabela 22 - Valores de rotura dos provetes.

	Tensão de rotura [MPa]	Deformação [mm/mm]
PL2	18,59	0,0157
PL3	24,29	0,0807
PL4	18,67	0,0781
PL5	26,76	0,0769
PL6	25,85	0,0769

Após a realização dos ensaios destrutivos foram obtidos os de padrões de rotura, semelhantes aos previstos, Figura 61.

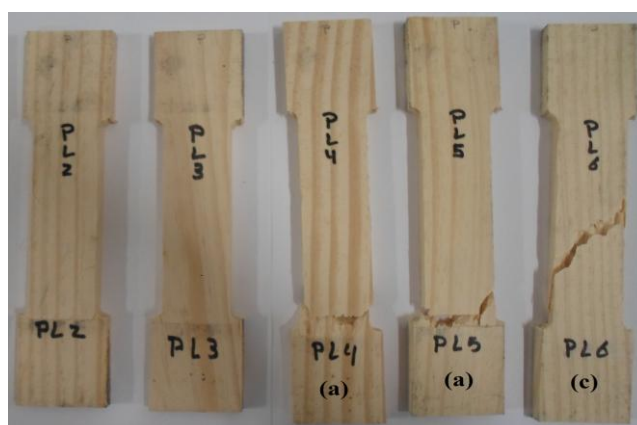


Figura 66 - Tipos de rotura observados no ensaio: (a) lascado; (c) corte.

Na Tabela 23 é feita a síntese dos valores obtidos nos ensaios dos 5 provetes.

Tabela 23-Síntese dos valores obtidos.

	Tensão de rotura [MPa]	Tensão de cedência [MPa]	Força máxima [KN]
PL2	18,59	2,70	5,19
PL3	24,29	4,14	6,83
PL4	18,67	3,45	5,14
PL5	26,76	3,29	7,53
PL6	25,85	6,24	7,26
Média	22,08	3,40	6,17
Desvio Padrão	4	1	1

A tensão de rotura média dos 5 provetes é de 22,08 MPa e a tensão de cedência média dos 5 provetes igual a 3,40 MPa. O valor do desvio referente à tensão de rotura tem um valor elevado devido a tensão dos provetes PI2 e PI4 que tem valores dispersos dos restante provetes.

V.2.4 Análise do Pinho na direção transversal às fibras

Na Tabela 24 são apresentadas as dimensões dos provetes de Pinho maquinados segundo a direção transversal às fibras.

Tabela 24 -Dimensões dos provetes.

	Espessura média a [mm]	Largura média b [mm]	Área inicial da zona útil do provete S_0 [mm ²]	Comprimento da parte útil L_0 [mm]
PT3	8,99	40,32	362,477	107,57
PT4	8,82	40,15	354,123	106,32
PT5	8,74	40,32	352,39	106,06
PT6	8,76	40,17	351,889	105,98

No gráfico da Figura 67 apresentam-se as curvas tensão-deformação dos provetes de Pinho ensaiados à tração uniaxial.

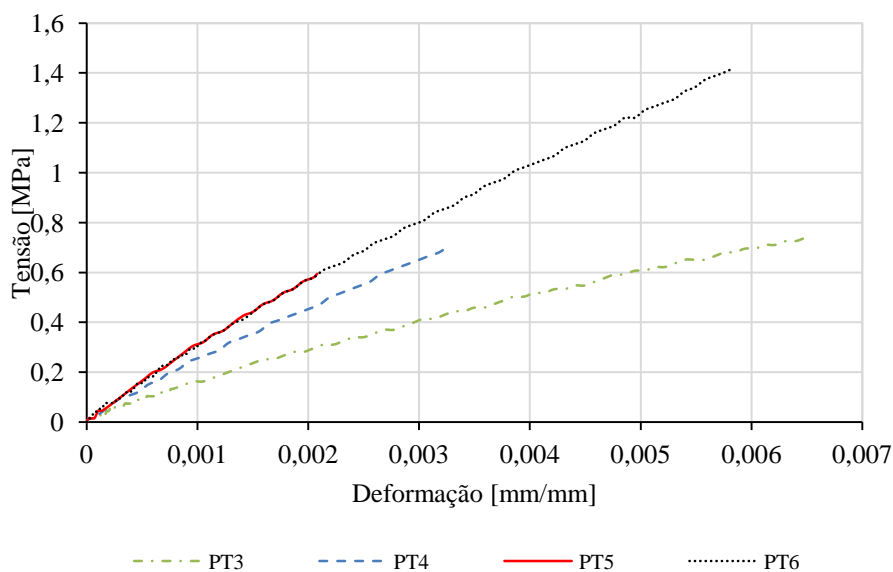


Figura 67- Relação tensão-deformação para os provetes de Pinho segundo a direção longitudinal.

Da análise das curvas apresentadas verifica-se, numa fase inicial, um desenvolvimento constante na elástica, que termina para deformações de aproximadamente 0,0005 mm/mm e corresponde a uma tensão de 0,19 MPa. Acima deste valor os provetes entram na zona plástica até rotura. Os provetes apresentam deformações últimas distintas, com tensões de rotura entre os 0,6 MPa e 1,4 MPa. Os provetes romperam com tensões e deformações diferentes, que são apresentadas na Tabela 25.

Tabela 25- Valores de rotura dos provetes.

	Tensão de rotura [MPa]	Deformação [mm/mm]
PT3	0,755	0,0065
PT4	0,713	0,0033
PT5	0,594	0,0021
PT6	1,42	0,0058

Foram também obtidos os resultados, em termos de padrões de rotura, Figura 68.

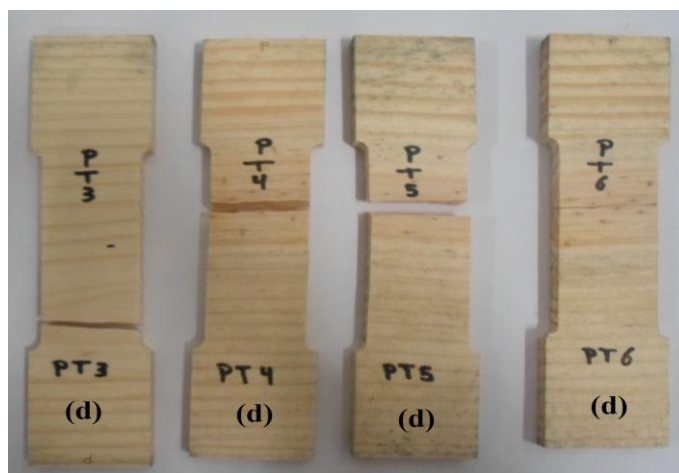


Figura 68-Tipos de rotura observados no ensaio: (d) tração pura [6].

Na Tabela 26 é feita a síntese dos valores obtidos nos ensaios.

Tabela 26- Síntese dos valores obtidos.

	Tensão de rotura [MPa]	Tensão de cedência [MPa]	Força máxima [KN]
PT3	0,755	0,0148	0,274
PT4	0,713	0,6519	0,252
PT5	0,594	0,5790	0,2093
PT6	1,42	1,0527	0,499
Média	0,8703	0,5746	0,3087
Desvio padrão	0.4		

A tensão de rotura média foi de 0,8703 MPa e a tensão de cedência média foi de 0,5746 MPa.

V.2.5 Módulo de Elasticidade

O Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young (E) é um parâmetro que proporciona uma medida da rigidez do material sólido, e é determinado pela razão entre a tensão uniaxial aplicada e a deformação resultante nesta direção, dentro do limite elástico. A Figura 69 apresenta os módulos de elasticidade obtidos para as madeiras de Pinho e Freixo segundo a direção longitudinal e transversal.

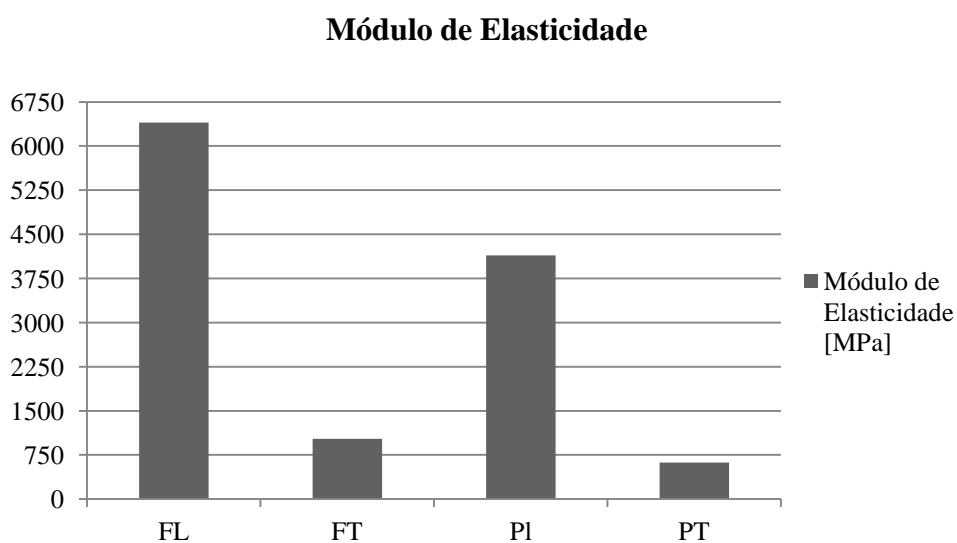


Figura 69- Valores médios do módulo de Elasticidade.

Com a análise da Figura 69 verificar-se que os valores do módulo de Elasticidade para o Freixo, cortado segundo direção longitudinal às fibras foi de 6400,42MPa e de 1025.47MPa na direção transversal às fibras. Para a madeira de Pinho, no sentido longitudinal às fibras foi de 3869,96 MPa e no sentido transversal às fibras foi de 620,068 MPa. Os valores de referência do Freixo são 11900-13900 MPa [17] verifica-se assim que os valores obtidos são inferiores aos de referência. A divergência entre os ensaios realizados e a bibliográfica consultada pode acontecer devido a uma série de fatores que afetam as características da madeira tais como: teor de humidade, massa volúmica, temperatura, duração da carga e corte da madeira.

CAPÍTULO VI

SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Uma análise numérica permite avaliar a resposta de uma determinada estrutura, de modo a objetivar a formulação implementada, a sua extensão para outros materiais e a aplicabilidade das condições de carregamento. Os métodos numéricos são capazes de transformar estruturas contínuas em sistemas discretos, com números finitos de graus de liberdade. Entre os métodos numéricos, o mais conhecido é o método de elementos finitos (MEF) que prevê a divisão do domínio de integração em um número finito de pequenas regiões denominadas elementos finitos, conectadas entre si através de um número discreto de pontos nodais. Numa fase inicial e para compreender o método de cálculo do programa ANSYS é apresentada a formulação utilizada por este programa em análises lineares. Numa fase inicial, são demonstrados os passos realizados para as simulações numéricas e apresentados os resultados e uma discussão dos mesmos.

Para as duas espécies de madeiras Freixo e Pinho foram feitas 4 simulações: duas em provetes com as fibras no sentido longitudinal e as outras duas simulações em provetes com as fibras no sentido transversal.

Na pesquisa anteriormente feita foi encontrado um artigo com o tema "Mechanical behaviour of wood in the orthotropic directions" realizado por J. L. Morais, J. C. Xavier, N. M. Dourado, J. L. Lousada do departamento de Engenharias, ICETA/UTAD e departamento de Florestal, ICETA/UTAD, Portugal. O artigo baseia-se na análise numérica no programa ANSYS do pinho. O modelo do provete não tem as dimensões similares ao modelo em estudo, por este motivo os resultados apresentados no artigo não podem ser valores de referência.

VI.1 Observações sobre o modelo numérico

No presente trabalho, foram reproduzidos modelos com elementos tridimensionais 3D. A seguir, faz-se um breve comentário sobre os elementos finitos escolhidos e os critérios utilizados.

VI.2 Modelação geométrica

Para a construção do modelo geométrico computacional, que represente o domínio envolvido, foi necessário utilizar as dimensões e geometria dos provetes experimentais.

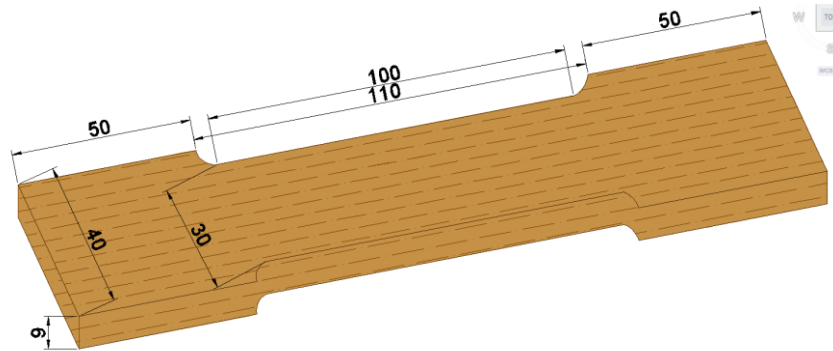


Figura 70- Dimensões dos provetes com as fibras no sentido longitudinal ao cerne.

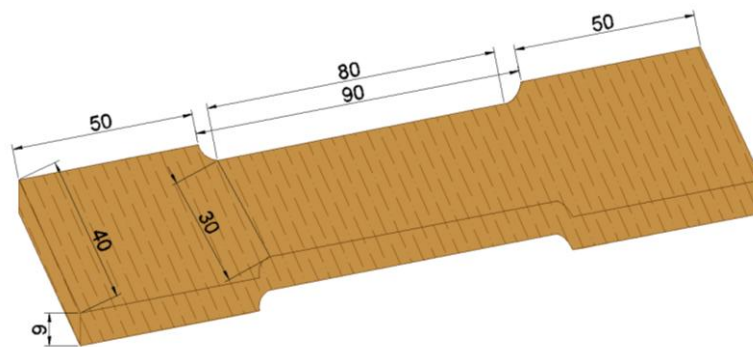


Figura 71- Dimensões dos provetes com as fibras no sentido longitudinal ao cerne.

Na Figura 72 encontra-se representado o modelo 3D geométrico a utilizar no programa ANSYS.

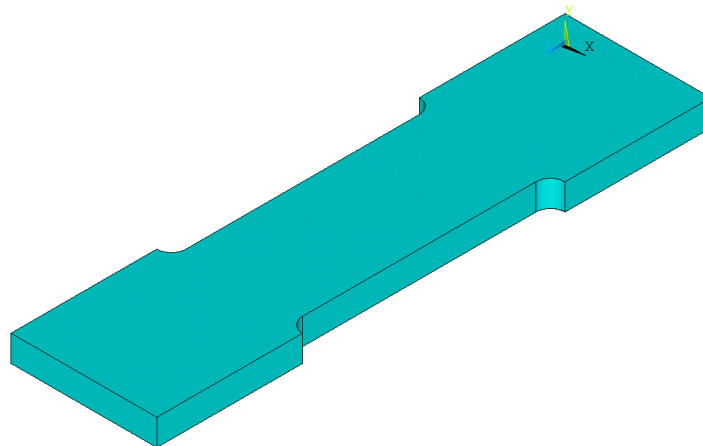


Figura 72- Modelo 3D no ANSYS.

VI.3 Malha dos elementos finitos

Para a formação da malha num componente foi necessário escolher o tipo de elemento finito. . O tipo de elemento utilizado para a malha 3D foi o SOLID186 com 20 nós, possuindo 3 graus de liberdade por nó, conforme se representa na Figura 73 e Figura 74.

Foi adotada uma malha automática, atendendo à geometria dos provetes e respectivos arredondamentos por ser considerada adequada para o estudo em questão.

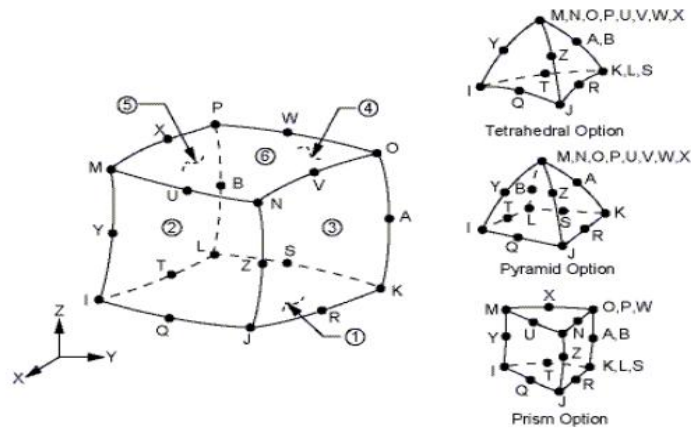


Figura 73- Elemento SOLID 186.

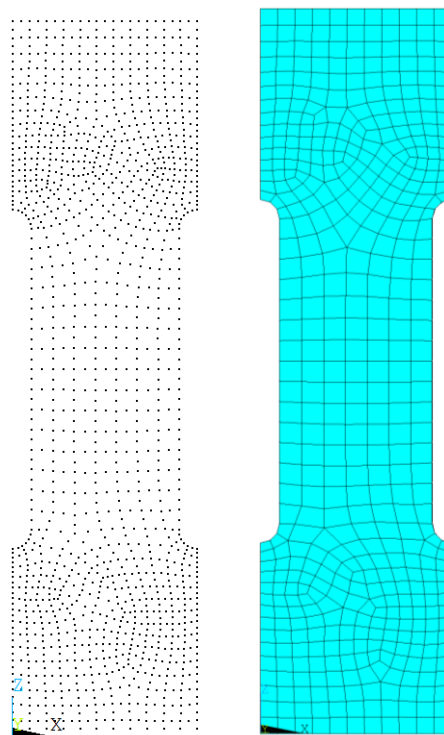


Figura 74- Malha de elementos finitos.

VI.4 Condições de carregamento

Após o modelo ter a malha definida pode impor-se as condições de fronteira em estudo. O ANSYS permite introduzir condições que podem ser impostas sobre as entidades geométricas como o as linhas, áreas e volumes, que são transferidas às entidades de malha.

Todos os modelos em estudo estão submetidos, numa das extremidades, a um carregamento axial e na outra extremidade o modelo é considerado fixo. Foi efetuada uma análise estrutural incremental com uma força aplicada entre 0 a 40 kN durante um intervalo de tempo igual a 100 segundos.

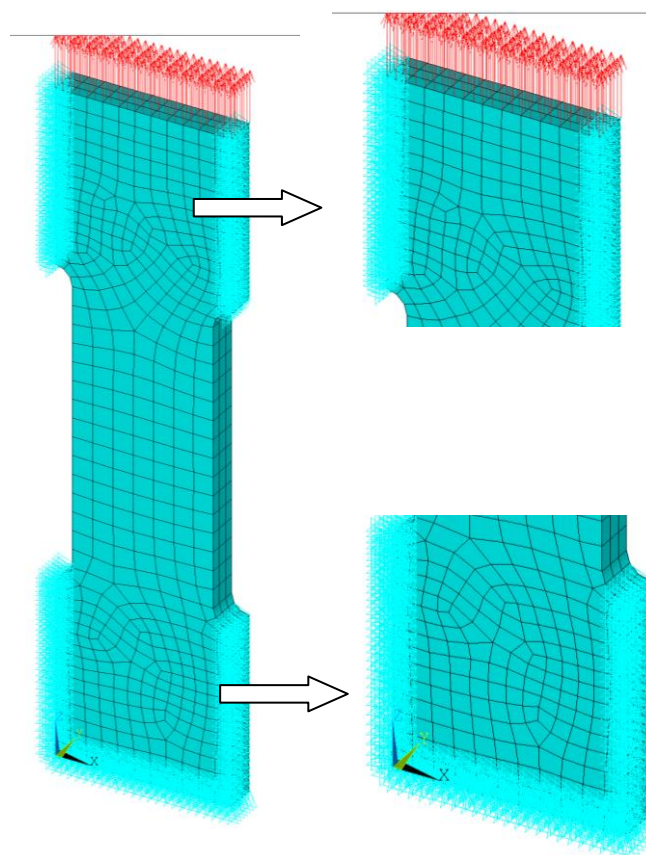


Figura 75 - Condições de fronteira e carregamento dos modelos em estudo.

VI.5 Propriedades mecânicas e curvas dos materiais

Um dos pontos importante para realização de uma análise numérica é a colocação das características dos materiais. Foram utilizados modelos de material não linear. Com base nos ensaios de caracterização mecânica efetuados às diferentes madeiras foram utilizados os valores médios relativos ao módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson

para a parte elástica das propriedades. Para a parte não linear das propriedades, foram impostas as curvas tensão-deformação também obtidas com base nos valores médios dos ensaios.

Sendo a madeira um material pouco rígido e para a caracterização correta do carregamento considerou-se que o topo do provete tenha uma rigidez superior, conforme a figura 76.

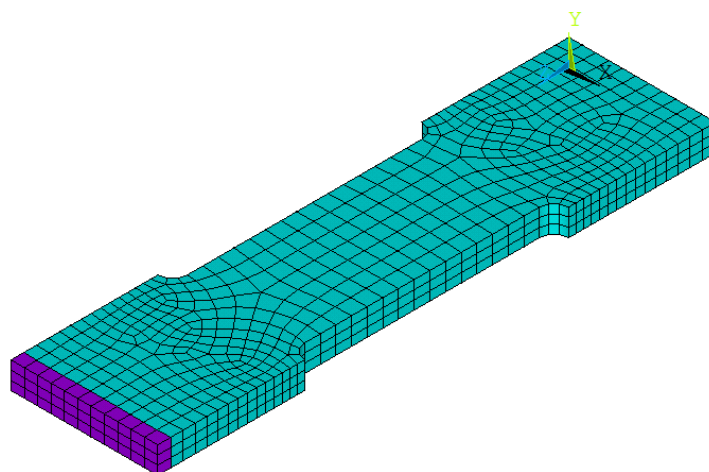


Figura 76- Modelo com os dois tipos de material.

Na tabela a seguir são apresentados os valores das propriedades dos materiais aplicados:

Tabela 27- Propriedades elásticas dos materiais.

	Material 1 (Madeira)	Material 2 (material rijo)
Modelo de Freixo Longitudinal	EX:6474 MPa	EX:200000000 MPa
	PRX: 0,3	PRX: 0,3
Modelo de Freixo Transversal	EX:1025	EX:200000000 MPa
	PRX: 0,3	PRX: 0,3
Modelo de Pinho Longitudinal	EX: 4141 MPa	EX:200000000 MPa
	PRX: 0,3	PRX: 0,3
Modelo de Pinho Transversal	EX:620 MPa	EX:200000000 MPa
	PRX: 0,3	PRX: 0,3

Na Tabela 28 apresentam-se os valores representativos de cada material para a constituição das curvas tensão-deformação na componente não-linear.

Tabela 28- Curvas tensão-deformação.

		Deformação [%]	Tensão [MPa]
Freixo Longitudinal	1	0,00139	9
	2	0,086	70,9
Freixo Transversal	1	0,0029326	3
	2	0,006762	3,6
Pinho Longitudinal	1	0,000951	3,9
	2	0,109	22,8
Pinho Transversal	1	0,000974	0,57
	2	0,0063	0,96

Nas figuras seguintes estão apresentados os gráficos tensão-deformação de cada modelo utilizados no ANSYS.

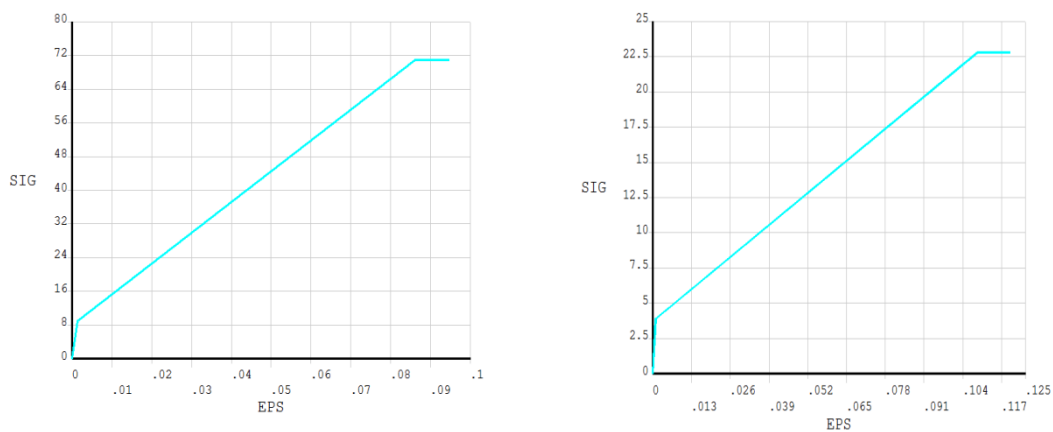


Figura 77- Gráficos do Freixo e Pinho longitudinal.

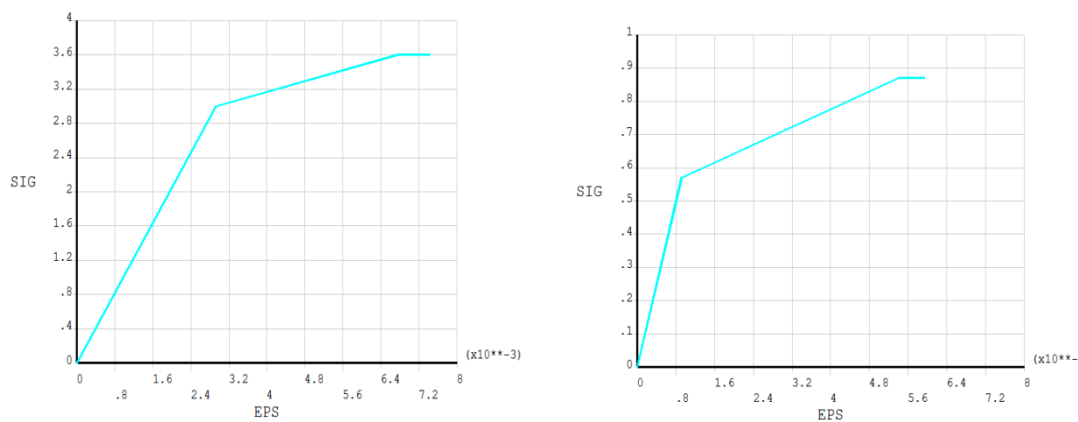


Figura 78 - Gráficos do Freixo e Pinho transversal.

VI.6 Resultados para o Freixo na direção longitudinal às fibras

A Figura 79 representa o deslocamento vertical ao longo do modelo e verifica-se que o maior deslocamento é de 13,35 mm. O deslocamento começa em zero, na extremidade onde o provete está fixo e vai aumentando à medida que se aproxima da zona onde são aplicadas as forças.

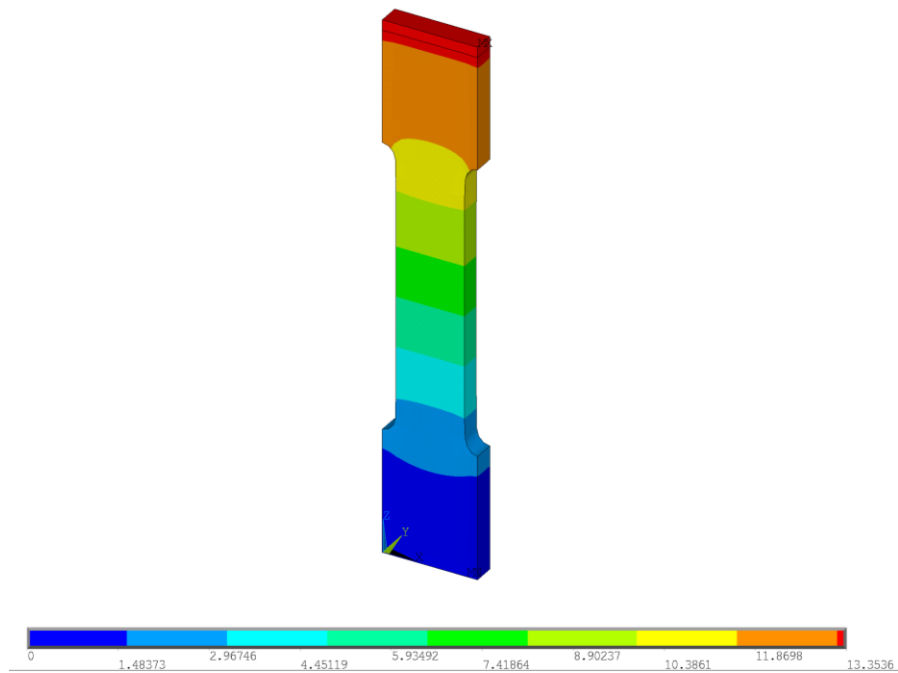


Figura 79- Deslocamento vertical U_{zz} , [mm].

O corpo de prova sofre maior deformação na chamada parte útil do provete tal como era esperado. O maior valor de deformação é de 0,16 e está no raio de concordância como se verifica na Figura 80.

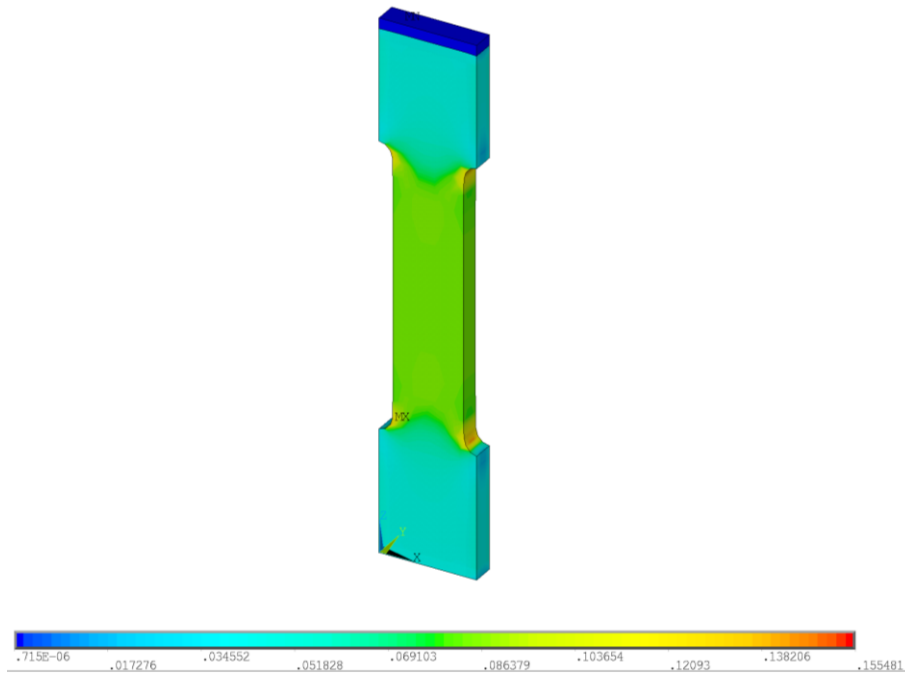


Figura 80- Deformação total.

A deformação total foi avaliada no centro do provete, com base nas deformações plásticas e elásticas ao longo da análise e até ao instante último da simulação numérica. Na Tabela 29 é feita a síntese dos valores obtidos para a deformação total.

Tabela 29 - Deformação total (FL).

Tempo	Deformação linear	Deformação plástica	Deformação total [%]
2	4,58E-04	0	0,05
4	9,16E-04	0	0,10
6	1,37E-03	0	0,16
8	1,83E-03	0	0
10	2,29E-03	0	0,04
12	2,74E-03	0	0,09
14	3,20E-03	3,45E-03	0,137
16	3,66E-03	7,04E-03	0,52
18	4,12E-03	1,06E-02	0,93
20	4,58E-03	1,42E-02	1,33
22	5,03E-03	1,78E-02	1,74
24	5,49E-03	2,14E-02	2,14
26	5,95E-03	2,50E-02	2,55
28	6,41E-03	2,86E-02	2,95
30	6,87E-03	3,22E-02	3,36
32	7,32E-03	3,58E-02	3,76
34	7,78E-03	3,94E-02	4,17
36	8,24E-03	4,30E-02	4,57
38	8,70E-03	4,66E-02	4,98
40	9,15E-03	5,02E-02	5,39
42	9,61E-03	5,38E-02	5,79
44	1,01E-02	5,74E-02	6,20
46	1,05E-02	6,09E-02	6,60
47	1,08E-02	6,45E-02	7,01

A tensão de von Mises é um escalar positivo que descreve o estado de tensão, muitos materiais têm colapso quando a tensão de von Mises ultrapassa um determinado valor.

A tensão de von Mises foi usada para determinar a força ao longo do carregamento avaliada na parte central do provete.

$$\sigma_{\text{tensão}} = \frac{\text{Força}}{\text{Área}} \quad (=) \text{Força} = \text{Área} \times \sigma_{\text{tensão}} \quad 11$$

A força é determinada multiplicando a área da secção útil do provete (9x30 cm²) pela tensão obtida ao longo do ensaio. Na Tabela 30 são apresentados os valores da força ao longo da análise numérica.

Tabela 30- Força calculada ao longo do carregamento (FL).

Tempo de ensaio	Tensão Von Mises [MPa]	Área [m²]	Força calculada [kN]
2	0		0,80
4	2,96		1,60
6	5,92		2,40
8	8,89		3,19
10	11,84		3,99
12	14,80		4,79
14	17,76		5,59
16	20,73		6,39
18	23,69		7,19
20	26,66		7,99
22	29,62		8,79
24	32,59		9,60
26	35,55	2,7 E-04	10,40
28	38,52		11,20
30	41,48		12,00
32	44,45		12,80
34	47,41		13,60
36	50,38		14,40
38	53,34		15,20
40	56,30		16,00
42	59,27		16,80
44	62,23		17,60
46	65,19		18,40
47	68,15		18,80

Como se pode verificar na Tabela 30 à medida que o ensaio decorre a força vai aumentando até à rotura do provete. A força máxima atingida foi de 18800 N. Depois de

determinadas as deformações e obtidas as tensões é possível obter um gráfico tensão-deformação conforme apresentado na figura 81.

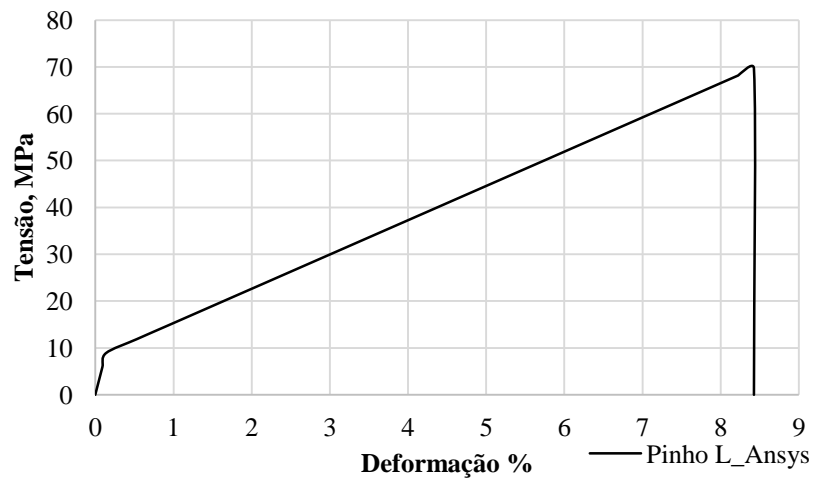


Figura 81 -Tensão-Deformação (FL).

VI.7 Resultados para o Freixo na direção transversal às fibras

A Figura 82 ilustra o deslocamento vertical obtido para a madeira de Freixo segundo a direção transversal às fibras. Como se pode verificar o deslocamento vertical máximo foi de 0,08622 mm

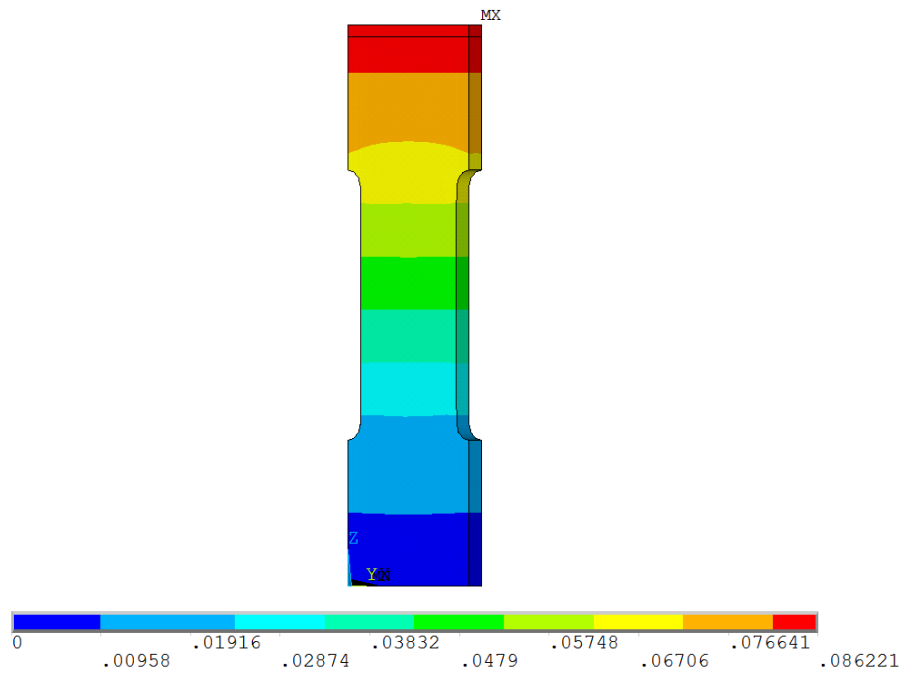


Figura 82- Deslocamento vertical U_{zz} , [mm].

Quanto aos deslocamentos horizontais pode-se constatar, na Figura 83, que o maior valor absoluto foi de 0,0032 mm. O corpo de prova sofre uma contração na direção x, e à medida que se analisa o efeito entre as extremidades e o interior do provete constata-se que o deslocamento vai diminuindo.

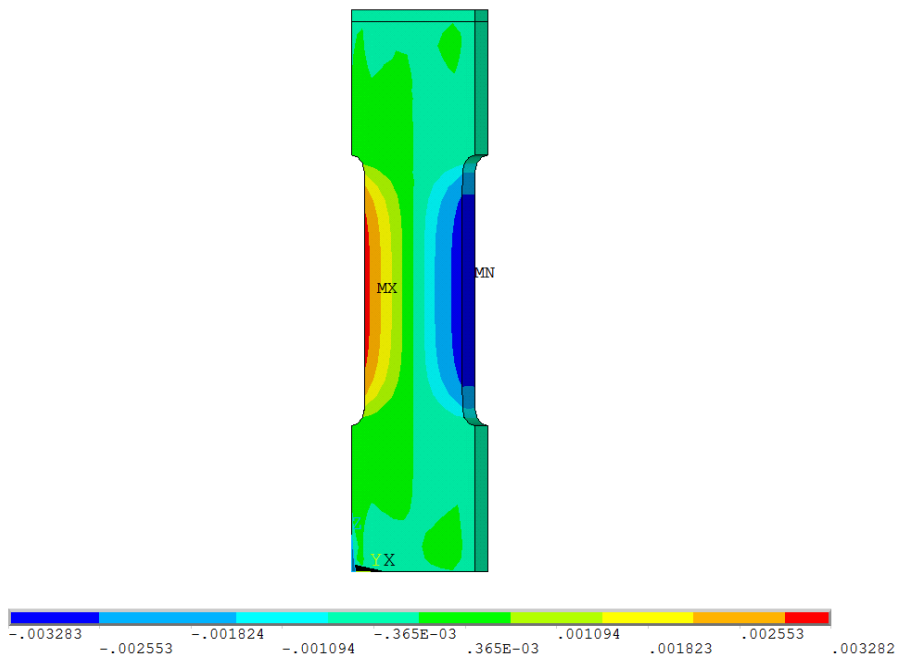
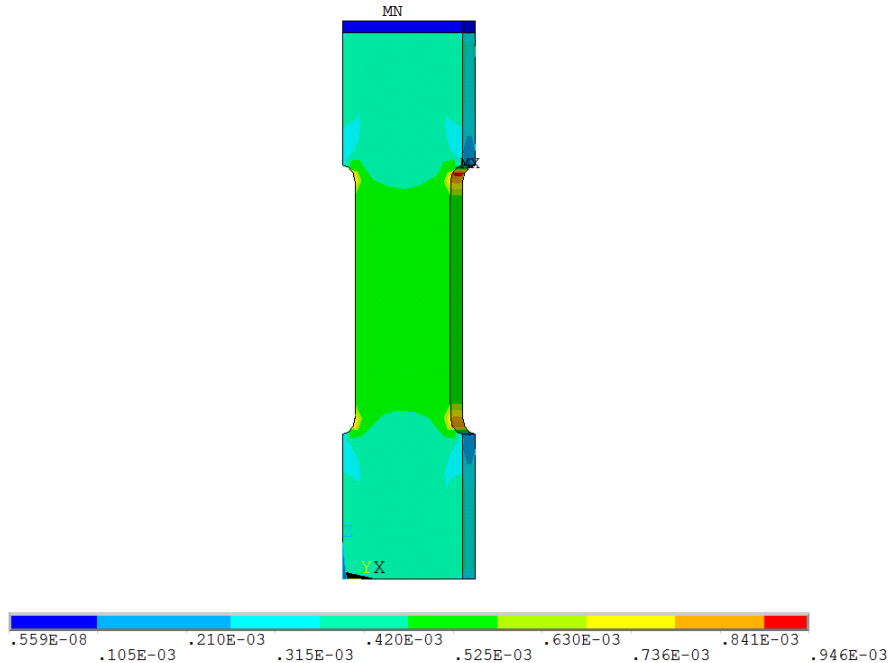


Figura 83- Deslocamento horizontais U_{xx} , [mm].

O corpo de prova sofre maior deformação na chamada parte útil do provete tal como era esperado. O maior valor de deformação é de 0,000946 no raio de concordância como se verifica na Figura 84.



A deformação total foi determinada num ponto nodal central do provete, somando as deformações plásticas e elásticas ao longo do ensaio. Na Tabela 31 está apresentada a síntese dos valores de deformação total do freixo na direção transversal às fibras.

Tabela 31 - Deformação total (FT).

Tempo	Deformação linear	Deformação plástica	Deformação total [%]
0.5	0	0	0,05
1.0	5,48E-04	0	0,10
1.5	1,10E-03	0	0,16
2.0	1,64E-03	0	0,21
2.5	2,19E-03	0	0,27
3.0	2,74E-03	0	0,50
3.1	3,26E-03	1,83E-03	0,58
3.2	3,37E-03	2,43E-03	0,64

A força é determinada multiplicando a área da secção útil do provete (9x30cm) pela tensão obtida. Na Tabela 32 são apresentados os valores da força ao longo do tempo.

Tabela 32 - Força calculada ao longo do carregamento (FT).

Tempo de ensaio	Tensão Von Mises [MPa]	Área [m ²]	Força calculada [KN]
0.5	0,56		0,15
1.0	1,12		0,30
1.5	1,68		0,45
2.0	2,24		0,60
2.5	2,80	2,7 E-04	0,75
3.0	3,33		0,90
3.1	3,44		0,93
3.2	3,55		0,96

Como se pode verificar na Tabela 32 à medida que o ensaio decorre a força vai aumentando até à rotura do provete e força máxima de 960,3 N. Após determinadas as deformações e obtidas as tensões pode-se obter o gráfico tensão-deformação apresentado Figura 85.

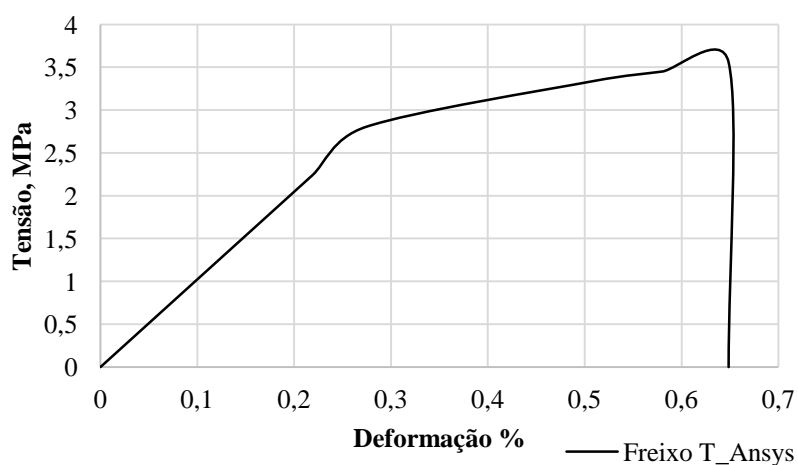


Figura 85 - Tensão-Deformação FT.

VI.8 Resultados para o Pinho na direção longitudinal às fibras

A Figura 86 evoluem evolução dos deslocamentos verticais ao longo do provete e verifica-se que o deslocamento vertical de maior valor foi de 16,315 mm.

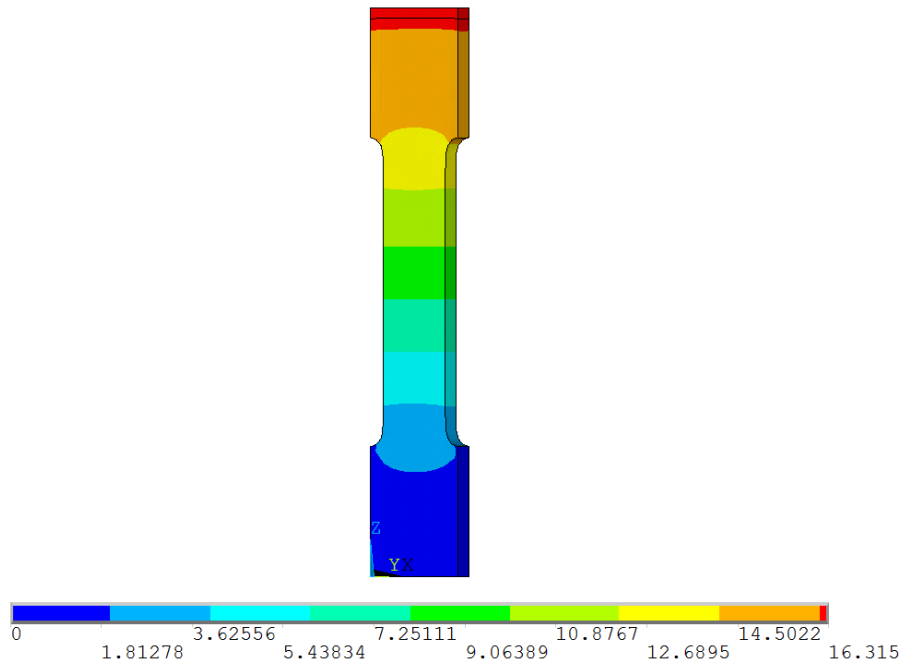


Figura 86 - Deslocamento vertical U_{zz} , [mm].

No que se refere aos deslocamentos horizontais pode constatar-se, Figura 87, que o maior valor absoluto foi de 0,8216.

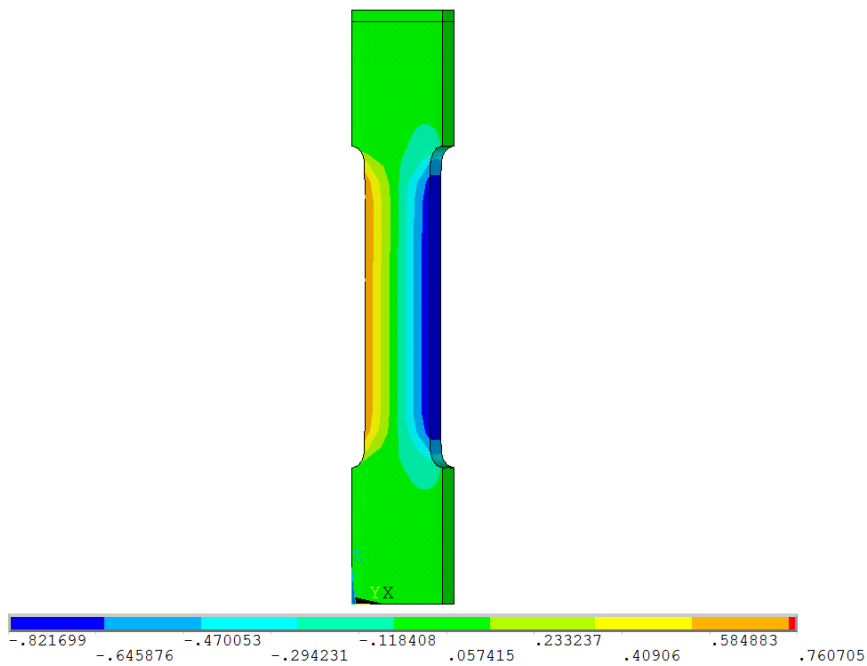


Figura 87- Deslocamento horizontais U_{xx} , [mm].

O corpo de prova sofre maior deformação na chamada parte útil do provete tal como os anteriores provetes. O maior valor de deformação foi de 0,2 no raio de concordância como se verifica na Figura 88.

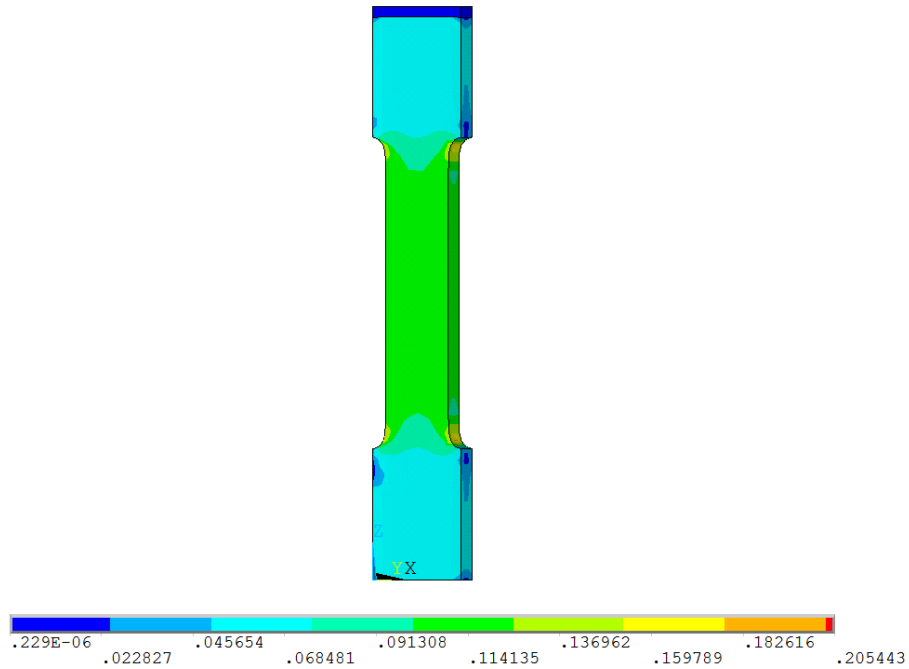


Figura 88- Deformação total.

A deformação total foi determinada num ponto central do provete tal como anteriormente. Na Tabela 33 é feita a síntese dos valores obtidos.

Tabela 33- Deformação total (PL).

Tempo	Deformação linear	Deformação plástica	Deformação total [%]
2	1,08 E-04	0	0,01
14	7,59E-04	0	0,07
26	1,41E-03	1,03E-02	1,16
38	2,06E-03	2,49E-02	2,69
50	2,71E-03	3,95E-02	4,21
56	3,04E-03	4,68E-02	4,98
66	3,58E-03	5,90E-02	6,25
78	4,23E-03	7,36E-02	7,77
86	4,66E-03	8,32 E-02	8,79
98	5,31E-03	9,79E-02	10,32
100	5,42E-03	1,00E-01	10,57

Na Tabela 34 são apresentados os valores da força ao longo do tempo de análise.

Tabela 34- Força calculada ao longo do carregamento (PL).

Tempo	Tensão Von Mises [MPa]	Área [m²]	Força calculada [kN]
2	0,44		0,12
14	3,11		0,84
26	5,77		1,55
38	8,43		2,27
50	11,109		2,99
56	12,44	2,7 E-04	3,36
66	14,67		3,96
78	17,33		4,68
86	19,11		5,16
98	21,78		5,88
100	22,22		6,00

Como se pode verificar na Tabela 34 a força vai aumentando até um valor máximo de 6001 N. Depois de determinadas as deformações e tensões regista-se a curva tensão-deformação respetiva.

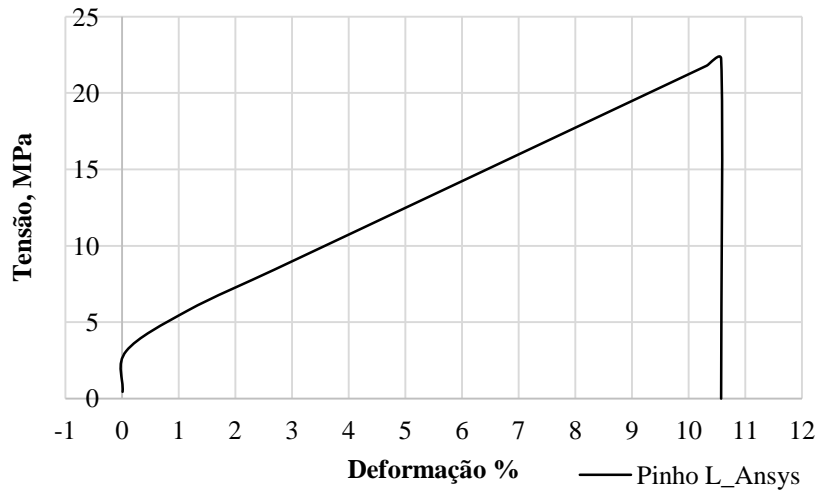


Figura 89 - Tensão-Deformação (PL).

VI.9 Resultados para o Pinho na direção transversal às fibras

O deslocamento vertical máximo obtido neste provete é de 0,0713, conforme os resultados da figura 90.

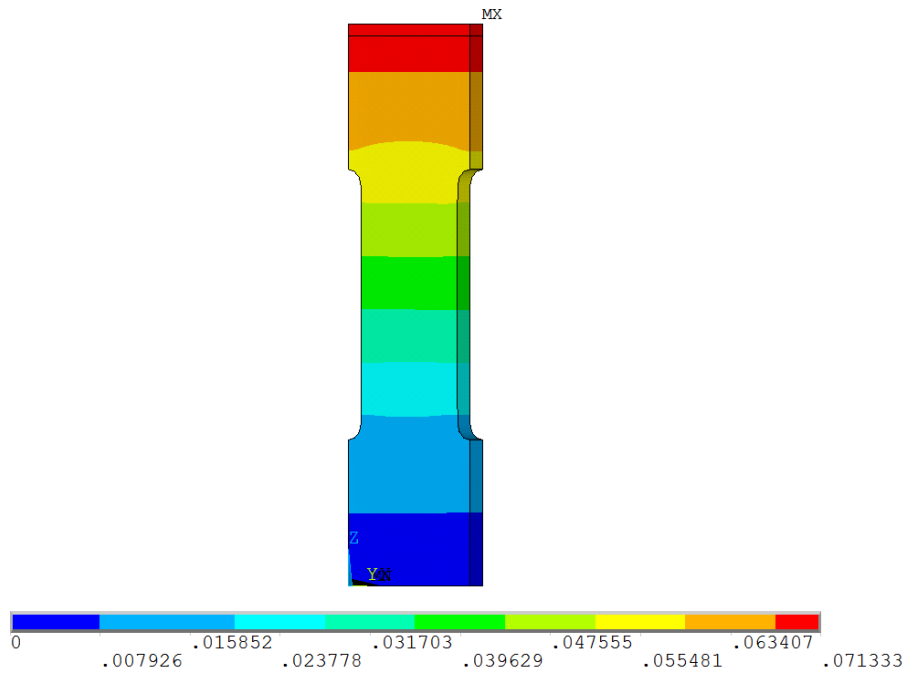


Figura 90- Deslocamento vertical Uzz, [mm].

No que se refere a deslocamentos horizontais pode constatar-se, na Figura 91, que o maior valor absoluto foi de 0,002856 mm.

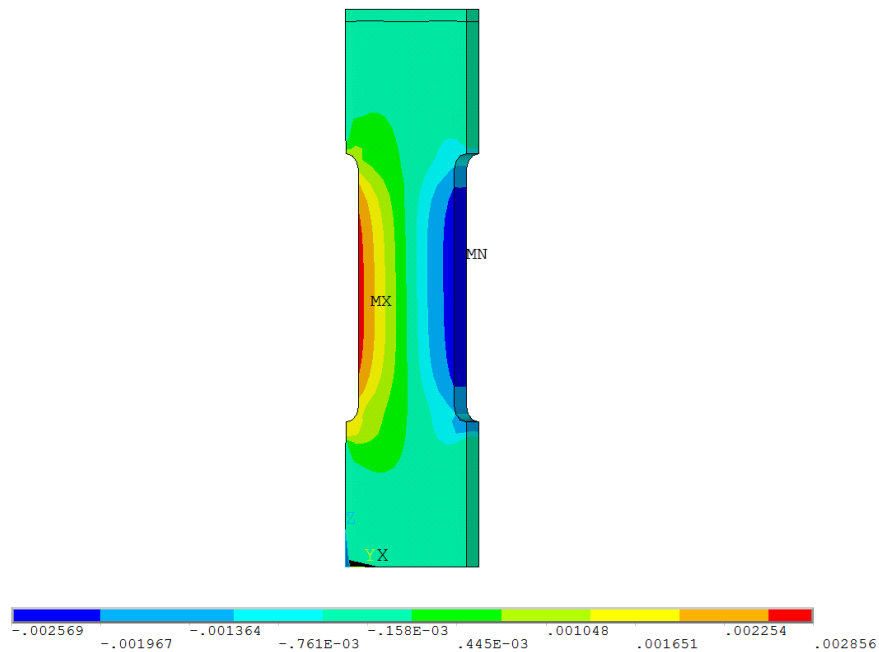


Figura 91- Deslocamento horizontais Uxx, [mm].

Foi também determinada a deformação total em um ponto central do provete. Na Tabela 35 é efetuada a síntese dos valores obtidos da deformação total.

Tabela 35 - Deformação total (PT).

Tempo de ensaio	Deformação linear	Deformação plástica	Deformação total [%]
0.25	4,50E-04	0	4,50 E-02
0.5	0,90 E-04	0	9,03 E-02
0.75	1,35 E-04	3,55 E-04	4,89 E-01

A força foi determinada multiplicando a área da secção útil do provete (9x30cm) pela tensão obtida, conforme a Tabela 36.

Tabela 36- Força calculada ao longo do carregamento (PT).

Tempo de ensaio	Tensão Von Mises [MPa]	Área [m²]	Força calculada [kN]
0.25	0,27		0,07
0.5	0,56	2,7 E-04	0,15
0.75	0,83		0,22

Como se pode verificar na Tabela 37 a força máxima atingida foi de 225,8 N. Depois de determinadas as deformações e obtidas a tensões no mesmo ponto obtém-se o gráfico tensão deformação apresentado.

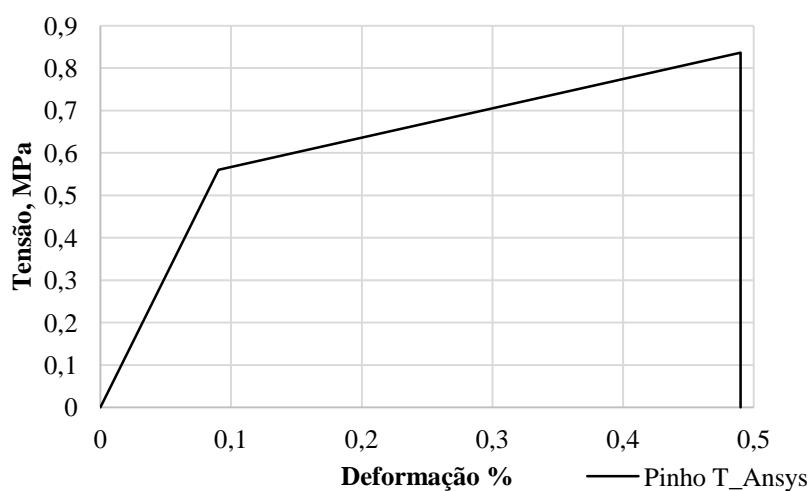


Figura 92- Tensão- Deformação (PT).

CAPÍTULO VII

COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS NOS ENSAIOS À TRAÇÃO

Neste capítulo vai ser apresentada a comparação dos resultados obtidos nos ensaios experimentais com os resultados com a simulação numéricos.

VII.1 Madeira de Freixo na direção longitudinal às fibras

A Figura 93 mostra como evoluem as curvas tensão-deformação, nos ensaios realizados quer experimental quer numericamente, para a madeira de Freixo cortada segundo a direção longitudinal às fibras. Como se pode verificar a curva numérica acompanha as curvas experimentais.

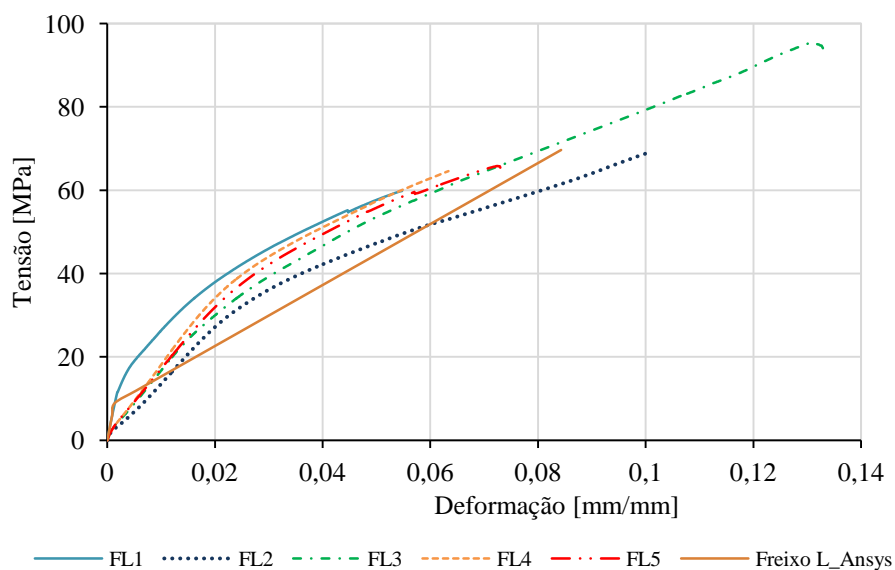


Figura 93- Gráfico tensão-deformação para os provetes de Freixo segundo a direção longitudinal.

Na Tabela 37 são apresentados os valores tensão deformação obtidos nos ensaios experimentais e na simulação numérica. Da análise da Tabela 37 pode verificar-se que o valor de tensão e deformação numérica está entre os valores obtidos na análise experimental para os vários provetes ensaiados.

Tabela 37- Valores de rotura dos provetes.

EXPERIMENTAL			ANSYS		
	Tensão de rotura [MPa]	Deformação [mm/mm]		Tensão de rotura [MPa]	Deformação [mm/mm]
FL1	59,80	0,054	FL	68,15	0,084
FL2	68,86	0,100			
FL3	95,29	0,133			
FL4	64,60	0,122			
FL5	65,78	0,073			

A Tabela 38 mostra os valores das forças máximas obtidas nos ensaios experimentais e na simulação numérica, tendo-se registado o valor médio de 19,73 kN e de 18,80 kN respetivamente.

Tabela 38- Valores da força máxima.

Experimental	ANSYS
19,73	18,80

VII.2 Madeira de Freixo na direção transversal às fibras

A Figura 94 mostra como evoluem as curvas tensão-deformação, experimental e numérica, para a madeira de Freixo cortada segundo a direção transversal às fibras. Como se pode verificar na análise da Figura 94, a curva correspondente à análise numérica tem um comportamento próximo das curvas experimentais.

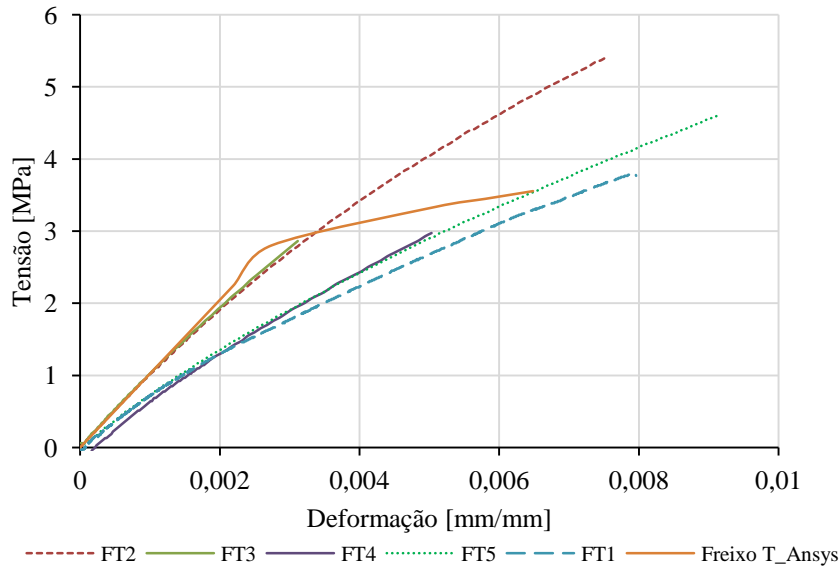


Figura 94- Gráfico tensão-deformação para os provetes de Freixo segundo a direção transversal.

Na Tabela 39 são apresentados os valores tensão deformação obtidos nos ensaios experimentais e numérica. Da análise da Tabela 39 pode verificar-se que os valores de tensão e deformação da análise numérica estão compreendidos entre os valores obtidos na análise experimental para os vários provetes ensaiados.

Tabela 39 - Valores de rotura dos provetes.

EXPERIMENTAL			ANSYS		
	Tensão de rotura [MPa]	Deformação [mm/mm]		Tensão de rotura [MPa]	Deformação [mm/mm]
FT1	3,80	0,008	FT	3,55	0,006
FT2	5,41	0,007			
FT3	2,86	0,003			
FT4	2,98	0,005			
FT5	4,60	0,009			
FT6	1,75	0,002			

A Tabela 40 representa os valores das forças máximas obtidas nos ensaios experimentais e na simulação numérica, tendo-se registado o valor médio de 1,31 kN e de 0,95 kN respetivamente.

Tabela 40- Valores da força máxima.

EXPERIMENTAL	ANSYS
1,31	0,96

VII.3 Madeira de Pinho na direção longitudinal às fibras

A Figura 95 mostra a evolução das curvas tensão-deformação, para a madeira de Pinho cortada segundo a direção longitudinal às fibras. Como se pode verificar na análise da Figura 95, a curva correspondente à análise numérica tem um comportamento próximo das curvas experimentais.

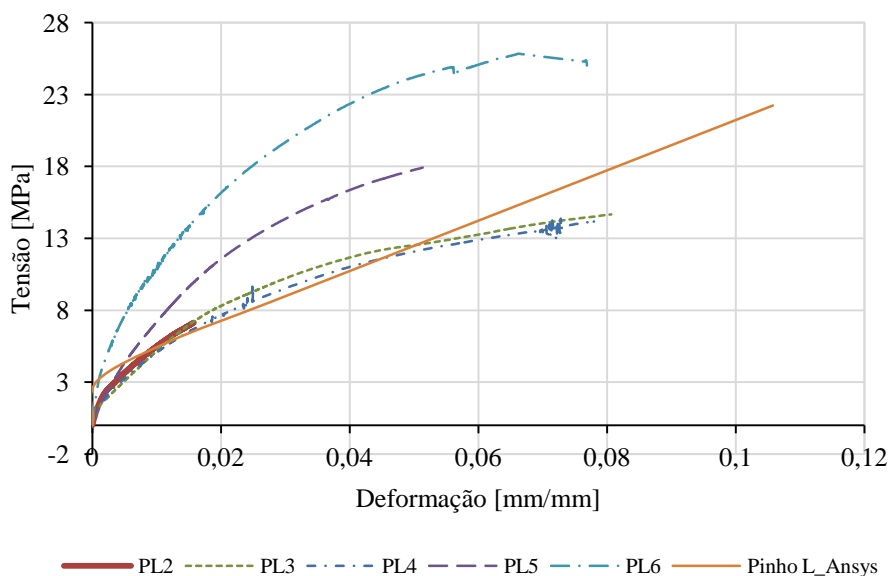


Figura 95- Gráfico tensão-deformação para os provetes de Pinho segundo a direção longitudinal.

Na Tabela 41 são apresentados os valores tensão deformação obtidos nos ensaios experimentais e na simulação numérica. Da análise da Tabela 41 pode verificar-se que o valor de tenção e deformação da análise numérica está entre os valores obtidos na análise experimental para os vários provetes ensaiados.

Tabela 41- Valores de rotura dos provetes.

EXPERIMENTAL			ANSYS		
	Tensão de rotura [MPa]	Deformação [mm/mm]		Tensão de rotura [MPa]	Deformação [mm/mm]
PL2	18,59	0,015	PL	22,22	0,015
PL3	24,29	0,080			
PL4	18,67	0,078			
PL5	26,76	0,076			
PL6	25,85	0,076			

A Tabela 42 mostra os valores das forças máximas obtidas nos ensaios experimentais e na simulação numérica, tendo-se registado o valor médio de 6,17 kN e de 6,0 kN respetivamente.

Tabela 42- Valores da força máxima.

EXPERIMENTAL	ANSYS
6,17	6,0

VII.4 Madeira de Pinho na direção transversal às fibras

Na Figura 96 mostra como evoluem as curvas tensão-deformação para a madeira de Pinho cortada segundo a direção transversal às fibras.

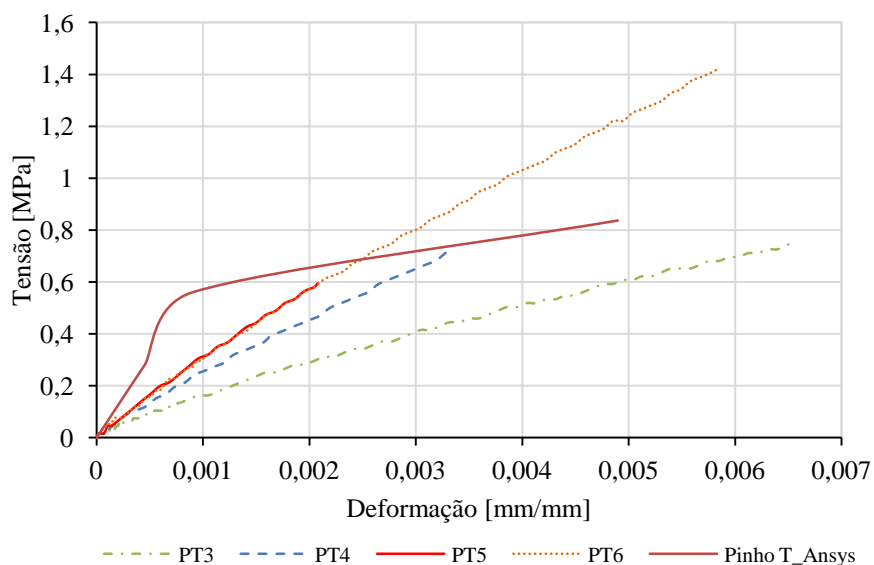


Figura 96 - Gráfico tensão-deformação para os provetes de Pinho segundo a direção transversal.

Na Tabela 43 são apresentados os valores tensão deformação obtidos nos ensaios.

Tabela 43 - Valores de rotura dos provetes.

EXPERIMENTAL			ANSYS		
	Tensão de rotura [MPa]	Deformação [mm/mm]		Tensão de rotura [MPa]	Deformação [mm/mm]
PT3	0,755	0,0065	PT	0,83	0,0049
PT4	0,713	0,0033			
PT5	0,594	0,0021			
PT6	1,42	0,0058			

A Tabela 44 mostra os valores das forças máximas obtidas nos ensaios experimentais e na simulação numérica, tendo-se registado o valor médio de 0,3 kN e de 0,22 kN.

Tabela 44 - Valores da força máxima.

EXPERIMENTAL	ANSYS
0,3	0,22

CAPÍTULO VIII

CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

VIII.1 Considerações finais

Ao longo de todo o trabalho realizado para o desenvolvimento desta dissertação e com base nos resultados obtidos foi possível chegar a várias conclusões.

Os provetes de Pinho ensaiados revelaram variações dimensionais de ordem de grandeza superior às do Freixo, contudo é necessário relembrar que a anisotropia é um fator de grande influência no estudo do comportamento da madeira e nada garante que, perante outras amostras, os resultados sejam rigorosamente iguais aos obtidos na fase experimental desta dissertação. Uma observação a tirar deste facto, é necessário levar em conta a variação dimensional das várias madeiras em estudo mas não os valores exatos por si só já que a variabilidade que se verificou é de importância elevada. Lembrar que madeiras resinosas tem comportamento expressivo e que compreende-lo e permiti-lo sem que para isso haja danos graves é talvez um dos poucos modos de obter uma boa durabilidade; claro que sempre com a ajuda de uma boa manutenção. Como seria de esperar a variação dimensional segundo a direção longitudinal é sempre superior que na direção transversal.

Foi bem claro ao longo de todas as fases experimentais que cada tipo de madeira estabiliza ao seu respetivo teor de água de equilíbrio e que as movimentações dimensionais são uma das ferramentas que a madeira usa para obter o equilíbrio com o meio envolvente

Com a contínua utilização do higrómetro foi possível a comparação das suas medições com as medições através de pesagem, variação de peso e teor de água, que este não revela um teor de água exato e correto mas que apesar disso revela uma uniformidade que o torna ainda assim muito útil, isto é, o higrómetro é um instrumento de medição muito útil para medições. Denotou-se, que a madeira de Freixo é mais resistente comparada com a de Pinho. Como seria de esperar a resistência segundo a direção longitudinal é sempre superior que na direção transversal.

VIII.2 Desenvolvimentos futuros

Para desenvolvimentos futuros poderá estudar-se o comportamento da madeira simulando de forma mais realista o que acontece à madeira quando totalmente exposta às condições ambientais, variando a humidade e a temperatura.

Um dos comportamentos que a madeira evidenciou aquando da retração foi o empeno, estudar este comportamento, de modo a ser restringido para a madeira ter mais utilidade.

Os diferentes resultados obtidos nos ensaios a tração deve-se ao teor de humidade da madeira, assim, para desenvolvimentos futuros seria realizar ensaios à tração com diferentes teores de humidade nas duas direções em relação às fibras.

A comparação entre o comportamento do lenho juvenil e o lenho já formado pode trazer surpresas quanto às variações dimensionais, assim como variações do teor de água, a diferença de tempo que ambas demoram a estabilizar quando submetidas aos mesmos gradientes.

Os provetes das espécies em estudo deveriam ter a mesma dimensões de forma a entender com mais precisão os tempos de estabilização e a capacidade de perda/ganho de água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. Sousa, “Avaliação Experimental da Estabilidade Dimensional de Elementos em Pinho Bravo e Madeira Tratada Termicamente,” Dissertação de Mestrado em Construção e Reabilitação Sustentável, Universidade do Minho, 2012.
- [2] J. Martins, J. Araújo, Sebenta " Madeiras, Materiais de Construção", 2005.
- [3] J. Coutinho, “Madeiras,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1999.
- [4] D. Coelho, "Modelo Computacional para Avaliação Térmica e Mecânica de Estruturas em Madeira" Relatório final de Dissertação do Instituto Politécnico de Bragança ,2011.
- [5] Samuel Pereira "Caracterização mecânica da madeira" , Dissertação submetida para satisfação dos requisitos do grau de mestrado da Universidade do Porto, 2009.
- [6] J. Costa, “Influência da Água no Comportamento de Madeiras Resinosas,” Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, 2011.
- [7] *NP 614*, Instituto Português da Qualidade, 1973
- [8] *NP 616*, Instituto Português da Qualidade, 1973
- [9] NBR 7190, Projeto de estruturas de madeira 1997
- [10] A. Carvalho, Lisboa: Madeiras Portuguesas. Estruturas anatómica. Propriedades. Utilizações.- Vol.I, 1996.
- [11] *NP 615*, Técnicas, ABNT-Associação Brasileira de Normas, 1997
- [12] N. Machado, “Variação Dimensional da Madeira Devido ao seu Comportamento Higroscópico,” Dissertação submetida para obtenção do grau de Mestrado em Construção de Edifícios pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006.
- [13] "Pin Sylvestre" [online] Available http://www.hobbeworld.com/botanique/arbre/pinus_sylvestris.php
- [14] "Le frene commun" [online] Available <http://educatif.eau-et-rivieres.asso.fr/pdf/frene.pdf>
- [15] César Gonçalves, " Contributos para uma maior e melhor utilização da madeira de pinho bravo em Portugal", Dissertação submetida para satisfação parcial do grau de mestrado, Universidade do Porto.
- [16] A. Feio, J. Machado e P. Lourenço, “Caracterização da resistência da madeira de Castanho à tração paralela ao fio” Artigo da Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2011
- [17] A. Carvalho, Lisboa: Madeiras Portuguesas- Vol.II, 1997.

- [18] A. Ganhão, “Construção Sustentável - Propostas de melhoria da eficiência energética em edifícios de habitação,” Dissertação para obtenção do Grau de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011
- [19] P. Cachim, "Construções em Madeira - A Madeira como Material de Construção", Porto: Publindustria, 2007.
- [20] G. Dalcin, “Ensaio dos Materiais,” Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Santo Ângelo, 2007
- [21] J. Prim, Piovesan e Angela, “Estudo sobre as Propriedades de duas Espécies de Madeiras Utilizadas na Construção Civil,” *Unoesc & Ciência - ACET*, 2011
- [22] Martins, S. F. " Estruturas de madeira – Inspeção e diagnóstico". Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho, 2009
- [23] Ramos, N. M, " Modelação da variação da humidade relativa no interior de edifícios". Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 200
- [24] "Le frêne" [online] Available http://franceboisforet.com/wp-content/uploads/2014/07/129_LE-FRENE_BD.pdf
- [25] "Frêne commun" [online] Available http://creargos.free.fr/nouveau_fichier2.htm
- [26] "Anatomie du Bois, Densité/Dureté" [online] Available http://www.cndb.org/?p=densite_durete
- [27] "Pin Sylvestre" [online] Available <http://www.selection-vosges.com/fr/pin-sylvestre.html>
- [28] " Fiche Essences/Épicéa" [online] Available <http://delhezbois.be/wp-content/uploads/2012/07/FICHE-EPICEA.pdf>
- [29] " Coradin, V.T.R. & Camargos, J.A.A." *Noções sobre anatomia da madeira e identificação anatômica*". Brasília, IBAMA, 2001 "
- [30] "Madeira Estrutural- Estruturas de Madeira," [Online]. Available: <http://madeiraestrutural.wordpress.com>. [Acedido em 14 Novembro 2013].