



## Fluência de materiais

**SOFIA VANESSA SILVA CARVALHO**

dezembro de 2015

# Fluência de materiais

Sofia Vanessa Silva Carvalho

Dissertação apresentada ao Instituto de Engenharia do Porto para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil – Ramo Construções

Orientador: Eng<sup>o</sup> Duarte Barroso Lopes

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Outubro de 2015



**ÍNDICE GERAL**

RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
AGRADECIMENTOS	v
ÍNDICE GERAL	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABELAS	xiii
TERMINOLOGIA	xv
1.INTRODUÇÃO	1
2.ESTADO DA ARTE	4
3.MATERIAL E MÉTODO	52
4.RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
5.CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	86
6.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

**Resumo**

A presente dissertação apresenta uma abordagem ao tema Fluência, com um desenvolvimento geral para quatro materiais: madeira, alumínio, betão e aço. No entanto, particularizou-se este estudo apenas para dois destes materiais, a madeira e o alumínio.

A madeira é um material viscoelástico, logo fortemente influenciado quando submetido a uma ação constante (Fluência) sendo agravada com alterações do teor em água.

Iniciou-se o estudo, com uma introdução aos objetivos principais e a revisão teórica do conhecimento da propriedade mecânica (Fluência). Efetuou-se o estudo inicial para os quatro materiais indicados.

Posteriormente, fez-se avaliação do efeito mecânico sortivo durante 60 dias com sete ciclos, em provetes de dimensões 20 x 20 x 400 mm<sup>3</sup> (escala 1:10) de madeira de *Eucalyptus globulus* Labill. Recorrendo ao levantamento de um conjunto de modelos numéricos, procedeu-se ao ajuste e extrapolação do comportamento, em Fluência, para distintos períodos de tempo (1, 10 e 50 anos). Os resultados obtidos demonstraram que a madeira de Eucalipto não apresenta um limite no seu comportamento em Fluência, logo instável para os 60 dias de duração de ensaio.

Os diferentes modelos de Fluência (x6) apresentaram uma variabilidade crescente de resultados, de acordo com o aumento de extrapolação dos resultados. Para a espécie de madeira de Eucalipto constatou-se ainda, que o ajuste e extrapolação de deformação para 50 anos ultrapassaram os valores sugeridos pelo *Eurocódigo 5*. A última parte deste trabalho, incidiu sobre o desenvolvimento da metodologia do ensaio em flexão de 3 provetes de alumínio similares, cujas dimensões eram de 20 x 20 x 400mm<sup>3</sup>. O objetivo desta metodologia foi avaliar o seu comportamento em Fluência. Numa primeira fase, foi aplicada uma carga contante de 160 kN. E numa segunda fase, foi aplicada o dobro dessa carga sujeita adicionalmente a uma temperatura bastante superior à temperatura ambiente (a rondar os 50 °C).

Conclusivamente verificou-se que o alumínio não apresenta deformação por Fluência, para as condições de ensaio apresentadas.

**Palavras-chave:** Limite de Fluência; Mecânico sortivo; Fluência

**Abstract**

The following dissertation presents an approach to the Creep subject with a general development towards four materials: wood, aluminum, concrete and steel, but with a close approach to wood and aluminum.

Wood is a viscoelastic material, therefore it is highly influenced when submitted to a constant action (Creep), which can aggravate with the increase of water content.

This study started with an introduction to the main objectives and theoretical knowledge of the mechanical properties of the four materials when subjected to the action Creep.

an evaluation was performed to the mechanical sortive effect, during sixty days, with seven cycles, using 20 x 20 x 400 mm<sup>3</sup> samples (scale 1:10) of *Eucalyptus Globulus* Labill wood species.

Using six numeric models, it was carried out an adjustment and extrapolation to the behavior while submitted to the action Creep in different time periods (1, 10 and 50 years).

The results allowed to conclude that Eucalyptus wood shows a limitless creep behavior, therefore unstable to the sixty days duration test.

The different modules of creep (x6) show different results, meaning that the variation of the extrapolated results increases as the time increases. It was further found that the adjustment and extrapolation of creep for fifty years exceed the values suggested by Eurocode 5.

The last part of this work focused on the development of the bending test methodology of three similar aluminum samples (20 x 20 x 400 mm<sup>3</sup>). The objective of this methodology was to evaluate the bending behavior. On a first stage 16Kg constant weight was applied. In a second stage, double the weight with the addition of increased temperature far superior to the ambient temperature (rounding the 50 °C).

As conclusion, it was verified that aluminum doesn't react to creep, to the test conditions mentioned before and it hardly shows signs of creep to the normal ambient temperatures, as well as full-scale dimensions.

**Key words:** Creep limit; Sorptive mechanical; Creep

## **Agradecimentos**

O presente documento, resulta de um longo e árduo trabalho. E gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos, a todos aqueles que o tornaram possível.

Em primeiro lugar, queria agradecer ao meu orientador desta dissertação, o professor Doutor Duarte Lopes, pelo apoio e por todos os ensinamentos transmitidos. Também, pela sua disponibilidade, bem como o tempo que me cedeu.

Gratifico-o igualmente, pelo grau de exigência que me impôs, para que deste modo, fizesse sempre mais e melhor.

Agradeço ao Professor Manuel Bravo de Faria Cruz, do departamento de Matemática do Instituto superior de Engenharia do Porto, pelas dúvidas esclarecidas relativamente à análise estatística dos dados e pelo seu interesse.

Um muito obrigado à empresa Extrusal, que me cedeu os provetes de alumínio. Sem os quais não seria possível a realização dos ensaios.

Aos meus colegas, amigos e namorado, que me apoiaram e suportaram nas fases mais difíceis. Por último, agradeço à minha família principalmente aos meus Pais, pelo carinho e amor incondicional e pela força que sempre me dedicam.

A todos, o meu sincero agradecimento.

**Índice de Texto**

<b>1.</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1	Enquadramento geral .....	1
1.2	Objetivos .....	2
1.3	Estrutura da Dissertação .....	2
<b>2.</b>	<b>Estado da Arte.....</b>	<b>4</b>
2.1	Conceitos de Fluência .....	4
2.2	Modelos de Fluência .....	6
2.3	Fluência no betão.....	7
2.3.1	Descrição do fenómeno da Fluência no betão .....	8
2.3.2	Fatores que influenciam a Fluência .....	9
2.3.2.1	Materiais e dosagem do cimento .....	9
2.3.2.2	Aditivos e adições .....	10
2.3.2.3	Humidade relativa do ambiente e temperatura.....	10
2.3.2.4	Geometria do elemento estrutural .....	13
2.3.2.5	Idade do carregamento .....	13
2.3.2.6	Tensão e resistência.....	14
2.3.3	Previsão da Fluência pelo <i>Eurocódigo 2</i> .....	14
2.3.3.1	Cálculo do coeficiente de Fluência pelo Anexo B do <i>Eurocódigo 2</i> .....	16
2.3.4	Exemplo prático da previsão da Fluência pelo <i>Eurocódigo 2</i> .....	18
2.3.4.1	Coeficiente de Fluência pelo Anexo B .....	18
2.4	Fluência na madeira .....	20
2.4.1	Interpretação do fenómeno da Fluência .....	20
2.4.2	Comportamento viscoelástico .....	22
2.4.3	Parâmetros que afetam a Fluência .....	23
2.4.3.1	Nível de esforço aplicado.....	23

2.4.3.2	Temperatura ambiente.....	24
2.4.3.3	Conteúdo de humidade .....	24
2.4.3.4	Tempo de carregamento .....	24
2.4.4	Comportamento mecânico sortivo de Fluência.....	24
2.4.5	Modelos matemáticos de Fluência .....	26
2.4.5.1	Coeficiente $k_{DEF}$ .....	29
2.5	Fluência nos Metais: aço e alumínio .....	31
2.5.1	Comportamento geral da Fluência .....	31
2.5.2	Mecanismos de Fluência.....	33
2.5.2.1	Fluência por difusão.....	33
2.5.2.2	Fluência de deslocamento .....	34
2.5.3	Comportamento em Fluência do Aço Cr-Mo.....	34
2.5.4	Comportamento em Fluência dos Aços inoxidáveis .....	36
2.5.5	Comportamento em Fluência de um Aço de alta resistência em temperatura ambiente. ....	38
2.5.6	Degradação microestrutural de um aço submetido a tensões baixas durante a Fluência .....	39
2.5.7	Relaxação de tensões nos metais .....	41
2.5.8	Conceitos gerais sobre o alumínio .....	41
2.5.9	Ligas de alumínio .....	42
2.5.9.1	Tipos de Têmpera .....	43
2.5.9.2	Propriedades mecânicas.....	44
2.5.9.3	Comportamento em Fluência das ligas de alumínio .....	44
2.5.9.4	Fluência do alumínio em condições isotérmicas e submetido a cargas cíclicas	46
2.6	Madeira de Eucalipto .....	46
2.6.1	Aspeto Estrutural .....	47

2.6.2	Constituição anatômica da madeira .....	47
2.6.3	Propriedades físicas e mecânicas .....	48
2.6.3.1	Resistência mecânica .....	49
2.6.3.1.1	Módulo de elasticidade.....	50
2.6.3.2	Massa volúmica/densidade .....	51
<b>3</b>	<b>Material e Método .....</b>	<b>52</b>
3.1	Introdução.....	52
3.2	Madeira de eucalipto .....	52
3.3	Alumínio .....	53
3.4	Ferramentas estatísticas .....	54
3.4.1	Parâmetro estatístico <b>R<sup>2</sup></b> .....	55
3.4.2	<i>Box plot</i> .....	56
3.4.3	Medidas de posição .....	57
3.4.4	Medidas de dispersão.....	57
3.4.5	Outras medidas.....	58
<b>4</b>	<b>Resultados e Discussão.....</b>	<b>59</b>
4.1	Madeira de eucalipto .....	59
4.1.1	Modelos matemáticos .....	59
4.1.2	Modelo parabólico.....	59
4.1.3	Modelo Lei de 1/3 (Andrade ).....	60
4.1.4	Modelo Logaritmico.....	60
4.1.5	Modelo Polinomial.....	60
4.1.6	Modelo Seno Hiperbólico .....	61
4.1.7	Modelo De Lacombe.....	61
4.2	Considerações sobre o ajuste dos modelos às curvas experimentais .....	61

---

4.3	Resultados do ajuste efetuado a partir dos resultados de Fluência aos seis provetes de Madeira .....	62
4.4	Análise estatística de cada modelo utilizando a ferramenta <i>box plot</i> .....	68
4.4.1	Análise para tempo igual a 63 dias .....	70
4.4.2	Análise para tempo igual a 1 ano.....	70
4.4.3	Análise para tempo igual a 10 anos .....	71
4.4.4	Análise para tempo igual a 50 anos.....	71
4.5	Considerações sobre a eleição do melhor ajuste .....	72
4.6	Comparação dos resultados com <i>Eurocódigo 5</i> .....	77
4.7	Reflexões sobre os modelos de Fluência .....	78
4.8	Resultados ensaio de alumínio .....	81
4.8.1	Ensaio provete 1 de alumínio .....	84
4.8.2	Ensaio do provete 2 de alumínio .....	85
4.8.3	Ensaio do provete 3 de alumínio .....	85
<b>5</b>	<b>Conclusões e Desenvolvimentos futuros .....</b>	<b>86</b>
5.1	Considerações finais.....	86
5.2	Desenvolvimentos futuros.....	87
<b>6</b>	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>88</b>

## Índice de Figuras

<b>Figura 1-</b> Exemplo das curvas de deformação por Fluência, para diferentes níveis de tensão em materiais (adaptado de Bodig 1982 em Santos 2009) .....	4
<b>Figura 2-</b> Decomposição da curva de deformação nas suas componentes (adaptado de Bodig 1982 em Santos 2009) .....	5
<b>Figura 3-</b> Comportamento tensão-deformação da argamassa, do agregado e do betão (adaptado de Metha e Monteiro 1984 em Miller 2008) .....	8
<b>Figura 4-</b> Efeito da humidade relativa do ar sobre a Fluência do betão (adaptado de Neville, 1980 em Miller, 2008).....	11
<b>Figura 5-</b> Deformação por Fluência de vigas de argamassa armazenadas em humidade relativa cíclica (adaptado de Neville 1970) .....	12
<b>Figura 6-</b> Método para a determinação do coeficiente de Fluência $\phi(t, t_0)$ , para betão em condições de ambiente normais e ambiente exterior para RH= 80 %; C35/45; $t_0=5$ dias; $h_0=400$ mm; cimento 32.5 N (classe N) .....	15
<b>Figura 7-</b> Exemplo de cálculo de laje simplesmente apoiada (adaptado de Pacheco 2011) .....	18
<b>Figura 8-</b> Modelo de comportamento básico de elasticidade [adaptado de Santos 2009] .....	22
<b>Figura 9-</b> Modelo de Maxwell para o comportamento viscoelástico (adaptado de Santos 2009)..	23
<b>Figura 10-</b> Exemplos do efeito mecânico sortivo na Fluência-Resultados de um teste de Fluência à compressão em humidade relativa constante cíclica (adaptado de Alfthan, 2002) .....	25
<b>Figura 11-</b> Exemplos das representações gráficas do modelo parabólico de Fluência, com diferentes valores atribuídos às constantes a e m ((a) e (b)) (adaptado de Santos 2009) .....	27
<b>Figura 12-</b> Fotomicrografias de provetes de bainita ( <a href="http://www.cienciadosmateriais.org/">http://www.cienciadosmateriais.org/</a> ).....	35
<b>Figura 13-</b> Fotomicrografias de provetes de perlita ( <a href="http://www.cienciadosmateriais.org/">http://www.cienciadosmateriais.org/</a> ) .....	35
<b>Figura 14-</b> Resistência à Fluência (0,01 % em 1.000 h) e tensão de rotura (100.00 h) dos aços 1Cr-0,5 Mo e 1,25Cr-0,5Mo (adaptado de Moares 2014) .....	36
<b>Figura 15-</b> Dimensões padrão do provete de ensaio (adaptado de Kawakami).....	37
<b>Figura 16-</b> Vista em 3D de uma chapa de aço.....	37
<b>Figura 17-</b> Taxa de Fluência no tempo, a uma temperatura de 600 °C e uma tensão constante de 70 MPa (adaptado de Sawada et al, 2008) .....	40
<b>Figura 18-</b> Perfis de alumínio utilizados em Construção civil ( <a href="http://www.directindustry.es/">http://www.directindustry.es/</a> ).....	42
<b>Figura 19-</b> Comportamento da Fluência no alumino (fonte : <a href="http://www.scielo.br">www.scielo.br</a> ).....	45
<b>Figura 20-</b> Secções transversal, radial e tangencial de um provete de madeira de <i>Eucalyptus globulus</i> . Vaso(1), fibra(2), raio unisseriado(3a), raio multisseriado(3b), parênquima axial (4), traqueído marginal (5) (adaptado de Esteves 2006) .....	48

<b>Figura 21-</b> (a) Esquema do carregamento do ensaio realizado e arranjo da molhagem. (b)- Profundidades, a partir da superfície molhada radial (3,8 e 15 mm) superior, dos pontos de medida do teor de humidade na secção transversal do provete (não foram avaliados neste trabalho).....	53
<b>Figura 22</b> - Exemplo de um gráfico <i>box plot</i> . .....	57
<b>Figura 23-</b> Ajuste dos seis modelos de Fluência (ver <b>Tabela 1</b> ) à curva de deformação relativa em Fluência dos provetes de Eucalipto em temperatura $\pm 20$ °C; ① provete 1, ② provete 2 e ③ provete 3.....	63
<b>Figura 24-</b> Ajuste dos seis modelos de Fluência (ver <b>Tabela 1</b> ) à curva de deformação relativa em Fluência dos provetes de Eucalipto em temperatura $\pm 20$ °C, ④ provete 4, ⑤ provete 5 e ⑥ provete 6.....	64
<b>Figura 25</b> Deformação relativa média dos modelos de Fluência (ver <b>Tabela 1</b> ) dos provetes de Eucalipto em temperatura $\pm 20$ °C; ① t = 63 dias, ② t = 1 ano, ③ t = 10 anos e ④ t = 50 ano.....	69
<b>Figura 26-</b> Ajuste dos seis modelos de Fluência para tempo igual a 21 dias (ver <b>Tabela 1</b> ) à curva de deformação relativa em Fluência dos provetes de Eucalipto em temperatura $\pm 20$ °C; ① provete 1, ② provete 2 e ③ provete 3.....	73
<b>Figura 27-</b> Ajuste dos seis modelos de Fluência para tempo igual a 21 dias (ver <b>Tabela 1</b> ) à curva de deformação relativa em Fluência dos provetes de Eucalipto em temperatura $\pm 20$ °C, ④ provete 4, ⑤ provete 5 e ⑥ provete 6.....	74
<b>Figura 28-</b> Relação da média das deformações diferidas e média das deformações instantânea (Calvo et al 2001). .....	79
<b>Figura 29-</b> Resultados da deformação de ensaios experimentais e curvas de ajuste através de modelos exponenciais (Okimoto 2001) .....	81
<b>Figura 30-</b> Deformação relativa para cada provete de alumínio; ① provete de alumínio sujeito a uma carga de 16 kN e temperatura de 20 °C ② provete de alumínio sujeito a uma carga de 32 kN e temperatura de 20 °C e ③. Provete de alumínio sujeito a uma carga de 32 kN e temperatura de 50 °C.....	83
<b>Figura 31-</b> Disposição do ensaio de flexão do provete de alumínio da liga Liga EN AW-6060 (Al MgSi) .....	84

## Índice de Tabelas

<b>Tabela 1-</b> Modelos empíricos mais comuns para a previsão de Fluência (adaptado de Bodig, Jayne 1986 em Lopes 2013) .....	26
<b>Tabela 2-</b> Classes de duração de carga .....	30
<b>Tabela 3-</b> Valores de $K_{DEF}$ (adaptado de EC5).....	31
<b>Tabela 4-</b> Temperatura de fusão para alguns metais .....	32
<b>Tabela 5-</b> Aços inoxidáveis e respetiva composição química .....	37
<b>Tabela 6-</b> Solução sólida de Ti e Nb .....	38
<b>Tabela 7-</b> Tabelas da composição das diferentes séries dos alumínios para a deformação plástica (www.informet.com.br).....	43
<b>Tabela 8-</b> Subdivisão da Têmpera.....	44
<b>Tabela 9-</b> Valores médios de propriedades da madeira de 15 espécies de Eucalipto (adaptado de Rodrigues 2002). .....	49
<b>Tabela 10-</b> Parâmetros dos diferentes modelos (ver <b>Tabela 1</b> ) e resultados estatísticos -provete 1 .....	65
<b>Tabela 11-</b> Parâmetros dos diferentes modelos (ver <b>Tabela 1</b> ) e resultados estatísticos – provete 2 .....	65
<b>Tabela 12-</b> Parâmetros dos diferentes modelos (ver <b>Tabela 1</b> ) e resultados estatísticos - provete 3 .....	66
<b>Tabela 13-</b> Parâmetros dos diferentes modelos (ver <b>Tabela 1</b> ) e resultados estatísticos - provete 4 .....	66
<b>Tabela 14-</b> Parâmetros dos diferentes modelos (ver <b>Tabela 1</b> ) e resultados estatísticos - provete 5 .....	67
<b>Tabela 15-</b> Parâmetros dos diferentes modelos (ver <b>Tabela 1</b> ) e resultados estatísticos - provete 6 .....	68
<b>Tabela 16-</b> Dados estatísticos obtidos através do gráfico <i>box-Plot</i> (t = 63 dias,1 ano,10 anos e 50 anos), Origin® .....	72

---

<b>Tabela 17</b> -Extrapolação de deformações encontradas para 21 dias, 63 dias (extrapolado) e 63 dias (ensaios, ver <b>Figura 23</b> ) para o provete 1 nos 6 modelos.....	75
<b>Tabela 18</b> - Extrapolação de deformações encontradas para 21 dias, 63 dias (extrapolado) e 63 dias (ensaios, ver <b>Figura 23</b> ) para o provete 2 nos 6 modelos.....	75
<b>Tabela 19</b> - Extrapolação de deformações encontradas para 21 dias, 63 dias (extrapolado) e 63 dias (ensaios, ver <b>Figura 23</b> ) para o provete 3 nos 6 modelos.....	76
<b>Tabela 20</b> - Extrapolação de deformações encontradas para 21 dias, 63 dias (extrapolado) e 63 dias (ensaios, ver <b>Figura 24</b> ) para o provete 4 nos 6 modelos .....	76
<b>Tabela 21</b> - Extrapolação de deformações encontradas para 21 dias, 63 dias (extrapolado) e 63 dias (ensaios, ver <b>Figura 24</b> ) para o provete 5 nos 6 modelos.....	76
<b>Tabela 22</b> - Extrapolação de deformações encontradas para 21 dias, 63 dias (extrapolado) e 63 dias (ensaios, ver <b>Figura 24</b> ) para o provete 6 nos 6 modelos.....	77

**Terminologia****Notações escalares Latinas maiúsculas**

A	Área
AISI	American Iron and Steel Institute/ Instituto Americano do Ferro e do Aço
$A_c$	Área da seção transversal do betão
C-Mo	Aço ferrítico de carbono e molibdênio
Cr-Mo	Aço ferrítico de cromo e molibdênio
$C_{x,y,z}$	Constante de proporcionalidade para a correspondente direção
DOP(12 %)	Massa específica aparente a 12 % de humidade (kg/m <sup>2</sup> )
E	Módulo de Elasticidade, forma abreviada
$E_c$	Módulo de elasticidade do betão
$E_{c0}$	Módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão
$E_{cm}$	Representa o módulo de elasticidade secante;
EC 5	Eurocode V standard, EN 1995:1-1
EN	Norma Europeia
$E_s$	Módulo de elasticidade do Aço
F1	Nível de carga instável
F2	Nível de carga crescimento lento
F2	Nível de carga estável
$F_{c0}$	Resistência à compressão paralela as fibras

---

$F_v$	Resistência ao cisalhamento
HT	Tratamentos térmicos
$I$	Inercia
$K_{DEF}$	Fator de deformação
L	Vão
LVDT	Linear variable differential transduce / Transformador diferencial variável
$M$	Momento
MPa	Mega Pascal, unidade de tensão, similar a $Nmm^{-2}$
N	Newton
Nb	Elemento químico Nióbio
NHT	Deformações a frio
NP	Norma Portuguesa
$P$	Peso, carga, peso morto
PP	Peso Próprio
Q	Energia de ativação térmica de Fluência ( $J \cdot mol^{-1}$ )
R	Constante universal dos gases perfeitos $8.31 (J \cdot mol^{-1} K^{-1})$
$R^2$	Coeficiente de determinação de uma correlação
RCP	Restantes cargas permanentes
RH-	Humidade Relativa
RSS	Soma residual dos quadrados
SC	Sobrecarga

---

T	Temperatura
$T_e$	Temperatura do ensaio
TEM	Microscopia eletrônica de transmissão convencional
$T_f$	Temperatura de fusão do material
$T_i$	Elemento químico titânio
TH	Temperatura homóloga
TSS	Soma total dos quadrados
$T_K$	Temperatura absoluta de Fluência

**Notações escalares Latinas minúsculas**

$b$	Vetor de vergas
$b$	Largura
$d$	Coefficiente auto difusão
$f_{cm}$	Valor médio da resistência do betão à compressão
$f_{ck(t_0)}$	Valor característico da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 de idade
$f_{yd}$	Valor de cálculo da tensão de cedência à tração do aço das armaduras para betão armado
$f_{yk}$	Valor característico da tensão de cedência à tração do aço das armaduras para betão armado
$h$	Altura
$h_0$	Espessura equivalente do elemento
kN	Quilonewton
kg	Kilograma mass (9.81N)

---

$mm$	Dimensão em milímetros
$t$	Variável tempo
$t_0$	Idade do betão no momento do carregamento
$t_{0,T}$	Idade do betão à data do carregamento, corrigida em função da temperatura
$t_T$	Idade do betão corrigida em função da temperatura,
$u_{fin}$	Tensão final
$u_{inst}$	Tensão instantânea ou linear de acordo com o EC5
$y$	Deslocamento

**Notações escalares Gregas**

$\Delta_{t_i}$	Número de dias em que se mantém a temperatura $T$
$\Delta_4$	Flecha de deformação, curvatura entre os suportes de carga
$\alpha$	Expoente função do tipo de cimento
$a_1; a_2; a_3$	Coefficientes que tem em conta a influência da resistência do betão
$\beta$	Parâmetro de Fluência dependendo da função modelo
$\beta_0$	Coefficiente de deformação unitária inicial
$\beta_{c(t,t_0)}$	Coefficiente que traduz a evolução da Fluência no tempo, após carregamento
$\beta_{(f_{cm})}$	Fator da influência da resistência do betão no coeficiente de Fluência convencional
$\beta_1, \beta_2, \beta_3$	Coefficientes da deformação por Fluência primária
$\beta_H$	Coefficiente que depende da humidade relativa (RH em %) e da espessura equivalente do elemento ( $h_0$ )

$\gamma_c$	Coeficiente parcial relativo do betão
$\gamma_s$	Coeficiente parcial relativo ao aço das armaduras para betão armado
$\varepsilon(t)$	Deformação primária total
$\varepsilon_{inst}$	Deformação instantânea
$\varepsilon_{irr}$	Deformação elástica não recuperável, viscoplástico
$\varepsilon_{rec}$	Deformação elástica, recuperável
$\varepsilon_{x,y,z}$	Deformações unitárias em cada uma das direções
$\delta_t$	Deformação a cada instante
$\delta_0$	Deformação inicial ao fim de 30 segundos
$\mu$	Coeficiente de atrito entre os cabos e as bainhas
$\sigma$	Tensão aplicada
$\sigma_c$	Tensão de compressão do betão
$\sigma_{x,y,z}$	Tensões unitárias em cada uma das direções
$\varphi(t,t_0)$	Coeficiente de Fluência do betão
$\varphi_0$	Coeficiente de Fluência
$\varphi_{RH}$	Fator da influência da humidade relativa no coeficiente de Fluência
$\chi^2$	Distribuição quantitativa de chi quadrado

## 1. Introdução

### 1.1 Enquadramento geral

A construção com materiais leves, não está muito divulgada no nosso país. A madeira e o alumínio são pouco utilizados como materiais estruturais de edifícios. Este tipo de construção é uma solução rápida e eficaz, que pode satisfazer as necessidades do mercado atual. A sua aplicação está associada a processos construtivos, diferentes dos materiais tradicionais como o betão. Possuem características particulares a nível de transporte, colocação em obra e pormenores construtivos.

A junção de estruturas de madeira com o aço, já é conhecida em outros países, como a construção seca e sustentável. Este tipo de construção permite uma estrutura leve e quase tão resistente como as de betão. São materiais de fácil transporte, fator determinante para locais de difícil acesso, além disso, a construção com estes materiais é mais célere do que com materiais tradicionais. Tornando esta, uma solução lógica e eficaz adequada às necessidades do mercado atual.

O betão é classificado como um material pesado e tem diversas potencialidades. O betão armado é uma técnica tradicional de construção, que envolve materiais simples (aço e betão) e que pelas suas propriedades individuais e características como material composto, conduz a grandes edificações com elevada resistência.

No entanto, todos estes materiais abordados possuem desvantagens. A principal é o seu comportamento à deformação por Fluência, sendo que, apresentam elevada sensibilidade à deformação, em função do tempo, devido às cargas aplicadas.

A Fluência é uma propriedade mecânica de alguns materiais e deve ser avaliada. Essa medição pode ser efetuada, através de ensaios laboratoriais em condições próximas das reais.

Em estruturas mistas de aço e betão, este fenómeno é de extrema relevância, uma vez que causa uma redução de tensões no betão e conseqüentemente um aumento destas no aço. Deve ser devidamente considerada, para que se assegure, que não seja atingida a tensão de cedência do aço.

Materiais, como o betão e a madeira, exibem um comportamento viscoelástico. A viscoelasticidade é explicitada através dos ensaios de Fluência e de relaxação, uma vez que a manifestação destes dois fenómenos são duas respostas distintas à viscoelasticidade.

A Fluência dos materiais é assim um tema clássico, no entanto numa época de permanente desenvolvimento tecnológico, torna-se essencial para aprimorar e desenvolver novas técnicas de construção e a novos materiais que possam vir a ser utilizados. Assim, esta propriedade não deverá ser descorada em projeto.

## **1.2 Objetivos**

O objetivo geral da dissertação visa na compreensão e caracterização do estudo em madeira - eucalipto (propriedades mecânicas). Nomeadamente, o seu comportamento de deformação ao longo do tempo, Fluência. Este fenómeno foi estudado para determinados materiais, tais como: betão, madeira, metais (aço e alumínio).

O objetivo deste estudo centrou-se, particularmente, na avaliação da Fluência da madeira de eucalipto, através da modelação matemática de equações, para o ajuste de curvas. Este ajuste devolve parâmetros estatísticos, que permitem conhecer, qual o modelo matemático que melhor descreve o comportamento à Fluência. Associado ao estudo deste fenómeno, abordaram-se várias propriedades de cada material, bem como a sua influência na propriedade, Fluência.

Os ensaios realizados com o material alumínio foram a principal novidade, uma vez que é um estudo pouco abordado na literatura relativamente à propriedade mecânica (Fluência). Para tal, foi desenvolvido um *Set-up* que permitiu perceber o comportamento à Fluência deste material em provetes de escala reduzida.

## **1.3 Estrutura da Dissertação**

Para a execução dos objetivos descritos anteriormente, esta dissertação foi organizada da seguinte forma:

No primeiro Capítulo, é feito um enquadramento geral da dissertação, bem como os objetivos atingir e a organização do estudo efetuado.

O segundo Capítulo trata do estado da arte deste tema em Portugal. Aborda-se o conceito Fluência, começando por cada material estudado: betão, madeira, alumínio e aço. Descrevem-se todos os fatores que influenciam a Fluência e também os modelos de Fluência estudados.

No terceiro Capítulo, apresentam-se os materiais utilizados para a realização do estudo. Descreve-se a metodologia utilizada para a realização do mesmo. E são mostradas algumas ferramentas estatísticas utilizadas, no tratamento de informação do capítulo 4.

O quarto Capítulo trata dos resultados do estudo em causa, onde se apresentam todos os ajustes efetuados para os provetes de madeira utilizados e o resultado do ensaio de alumínio. Associando as ferramentas estatísticas do capítulo anterior.

No quinto Capítulo são expostas as notas finais e conclusões deste estudo. Indicam-se algumas sugestões de trabalhos futuros possíveis.

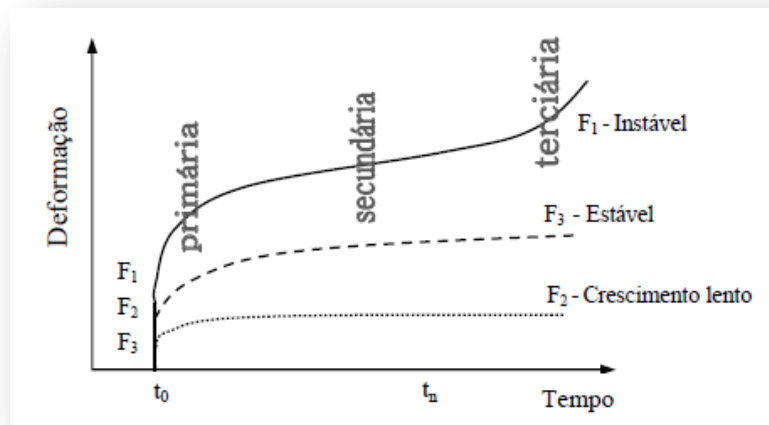
Por fim, no sexto Capítulo descreve-se toda a bibliografia utilizada.

## 2. Estado da Arte

### 2.1 Conceitos de Fluência

Entende-se como Fluência, um fenómeno que se baseia no aumento progressivo no tempo, da deformação instantânea de um elemento estrutural, quando sujeita a uma tensão constante. A Fluência é observada em diversos materiais, e muitas vezes limita o tempo de vida de uma estrutura.

Pode ser descrita através de três zonas distintas na curva de Fluência, tal como ilustrado na **Figura 1**. A deformação por Fluência tende para um valor constante, no qual existe uma progressão lenta numa fase inicial e um aumento na fase final até à rotura.



**Figura 1**-Exemplo das curvas de deformação por Fluência, para diferentes níveis de tensão em materiais (adaptado de Bodig 1982 em Santos 2009)

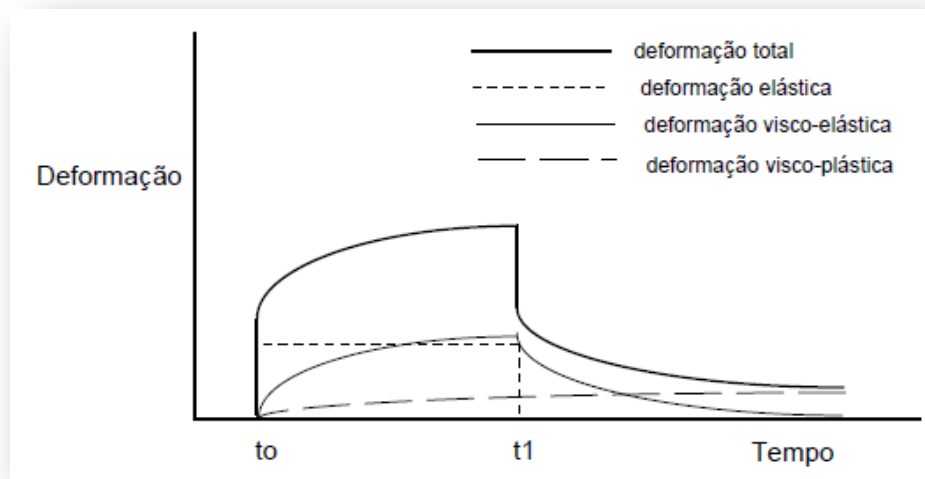
A **Figura 1** apresenta exemplos de curvas de deformação por Fluência, para diferentes níveis de tensão F1, F2 e F3. O nível de carga F1 consiste numa carga elevada e corresponde a uma situação de comportamento de deformação instável, F2 corresponde a uma carga média e uma situação de crescimento lento e F3 representa um nível de tensão baixo, 5 a 10 % da rotura e a uma situação de deformação estável.

Analisando a curva de deformação F1, e sendo esta uma curva típica de Fluência tem-se: o primeiro segmento com a concavidade voltada para baixo representa a Fluência primária (primeira derivada negativa). Este tipo de estado de Fluência apresenta valores de velocidade de deformação decrescente ao longo do tempo (em geral em curto espaço de tempo) até se atingir uma taxa constante (Santos 2009).

A Fluência secundária é representada pelo segundo segmento, aproximadamente reto e a velocidade de deformação neste caso poderá considerar-se constante, devido ao equilíbrio existente entre os processos de endurecimento por deformação e recuperação. Esta velocidade neste estado de Fluência, poderá denominar-se de, velocidade mínima de Fluência e é um elemento importante a considerar para efeitos de projeto.

A Fluência terciária é representada pelo terceiro segmento, com a concavidade voltada para cima e neste verifica-se, uma crescente evolução da Fluência até à rotura.

Este fenómeno é uma propriedade mecânica, importante dos materiais e como tal a curva de Fluência poderá ser decomposta em quatro componentes, ver **Figura 2**.



**Figura 2-** Decomposição da curva de deformação nas suas componentes (adaptado de Bodig 1982 em Santos 2009)

A decomposição da curva de Fluência é decomposta em: deformação elástica, deformação viscoelástica e deformação viscoplástica. Na deformação elástica, o material está sujeito a níveis de tensões tais, que quando estas deixam de atuar, este volta à sua forma original sem perda de propriedades. Portanto define-se como, uma deformação reversível no tempo, sendo estudada pela lei de Hooke. Na deformação viscoelástica, a aplicação de tensões por um longo período de tempo provoca um comportamento viscoso, e portanto uma deformação permanente. No entanto quando aplicação da deformação é muito rápida, as moléculas que constituem o material não se adaptam à deformação imposta e induzem uma resposta viscoelástica A deformação, neste caso, é parcialmente reversível. A deformação viscoplástica ocorre, quando a deformação viscoelástica é recuperada, mas o material não regressa a forma original (nem parcialmente). Este efeito de deformação permanente

acentua-se ao longo do tempo. Ao conjunto destas deformações, tem-se a deformação total por Fluência do material.

No item 4, utilizou-se o conceito de Fluência ou deformação relativa. Este denomina-se através da razão, do incremento da deformação em qualquer momento, pela deformação inicial (ver expressão 1). Permite obter, apenas o comportamento da deformação diferida, ou seja, o aumento da deformação em percentagem (%), mesmo sabendo que existe uma deformação inicial mas que não é mostrada.

$$\text{Deformação relativa (\%)} = \frac{\delta_t - \delta_0}{\delta_0} \quad (1)$$

Sendo que,  $\delta_t$  a deformação a cada instante e  $\delta_0$  a deformação inicial ao fim de 30 segundos.

Em geral, a Fluência é analisada para quase todos os materiais utilizados como elementos estruturais sujeitos a elevadas temperaturas. No entanto, para materiais compósitos e polímeros, a temperatura não é um fator tão relevante, uma vez que esta propriedade torna-se significativa a temperaturas superiores a 40 % da temperatura de fusão do material. Nos materiais compósitos e polímeros ocorre Fluência unicamente, devido à aplicação de uma carga, em função do tempo.

No âmbito desta dissertação, estudou-se a Fluência em três tipos de materiais: betão, madeira e metais, dos quais o aço e o alumínio.

## **2.2 Modelos de Fluência**

Atualmente existe na bibliografia, diferentes expressões matemáticas aplicáveis à modelação dos dados experimentais, provenientes dos ensaios de Fluência. Estas permitem que os resultados de curta duração efetuados possam ser extrapolados para maiores períodos de tempo.

No item 4 desta dissertação, será apresentado com um maior detalhe o estudo deste modelos, bem como a comparação entre eles.

Os modelos podem ser utilizados para previsão do comportamento à Fluência de qualquer material, no entanto apenas será realizado o estudo destes modelos para a madeira.

Os mecanismos de humidade e temperatura têm impactos na previsão destas equações, uma vez que todas as constantes são determinadas experimentalmente, portanto, estão mais suscetíveis a estes condicionantes durante as experiências. Qualquer variação de humidade e/ou temperatura, mais especificamente variações cíclicas, terão efeitos aceleradores, exponenciais para a deformação.

Os resultados das deformações obtidos devem ser comparados com as normas existentes, para cada material. Estas normas limitam e preveem o comportamento do material em Fluência, para os estados limites de utilização.

No caso do betão, a norma que é sugerida para a previsão da Fluência é o *Eurocódigo 2-Projeto de estruturas de betão*, parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios

Para a madeira é sugerido o *Eurocode 5: Design of timber structures-Part 1-1: general common rules and rules for buildings*.

Estes eurocódigos contêm regras simplificadas. No caso dos metais, não existe ainda nenhuma norma /eurocódigo que preveja o comportamento das deformações do material em Fluência sob o efeito de temperatura.

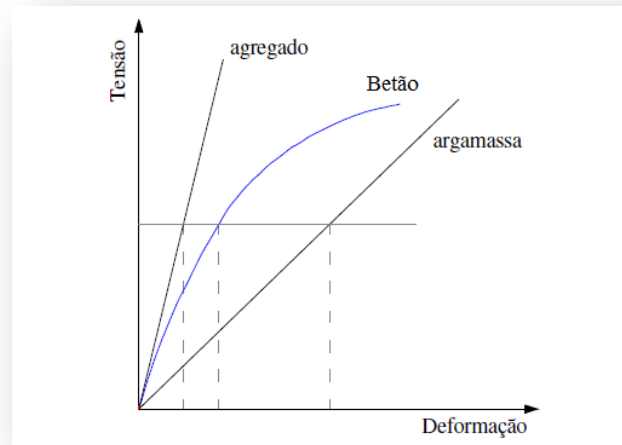
### **2.3 Fluência no betão**

O betão é sem dúvida o material mais utilizado na construção civil. É composto pela mistura proporcionada de agregados (brita, areia ou godo), com um ligante hidráulico (cimento, água) e eventualmente adjuvantes e/ou adições.

As componentes que constituem o betão vão reagindo ao longo do tempo e desta forma, as suas propriedades são igualmente dependentes do período de tempo decorrido

O desempenho ao longo do tempo do betão, devido às propriedades de Fluência, contribui no desempenho das estruturas de betão, podendo provocar excessivas deformações e uma redistribuição de tensões.

A **Figura 3** apresenta a deformabilidade do betão, agregado e argamassa de forma isolada, pelo qual o betão é composto. É notório que há uma maior deformação no betão, comparativamente ao agregado (ver **Figura 3**).



**Figura 3-** Comportamento tensão-deformação da argamassa, do agregado e do betão (adaptado de Metha e Monteiro 1984 em Miller 2008)

A Fluência ocorre essencialmente na pasta do cimento e a principal causa deste fenómeno está relacionada, com a perda de água intracristalina sob pressão constante. Isto porque, a Fluência é afetada pela disponibilidade de água do composto. No entanto, não só a relação água-cimento provoca variação na deformação a longo prazo, existem muitos outros fatores relevantes.

Além das deformações que ocorrem no betão causadas pela perda de água, ocorre outro tipo de deformação denominada de retração, contudo não será alvo de estudo nesta dissertação.

### 2.3.1 Descrição do fenómeno da Fluência no betão

O fenómeno denominado de Fluência, como referido anteriormente, consiste no aumento progressivo, no tempo, da deformação de um provete de betão, quando aplicada uma carga constante. Ocorre devido à variação de volume da pasta de cimento que envolve os agregados. Esta origina efeitos diferidos, que são devidos à deformação ao longo do tempo.

A Fluência no betão pode ser classificada em dois tipos de deformação: Fluência básica e Fluência de secagem lenta. A Fluência básica é a deformação de um provete de betão sem qualquer intercâmbio de humidade. A Fluência de secagem é a deformação total do material, quando não é isolado do meio ambiente e existe um intercâmbio de humidade.

De acordo com Rüsç (1981), a Fluência do betão deve ser atribuída à migração de água causada pela carga aplicada. Podem-se destacar alguns efeitos da Fluência no comportamento das estruturas de

betão, como as perdas da força de pré-esforço (relaxação de tensões) em elementos pré tensionados e pós tensionados, no caso do betão pré-esforçado.

### **2.3.2 Fatores que influenciam a Fluência**

Existem diversos fatores que podem estar relacionados com a Fluência. A título de exemplo tem-se: a natureza do material, a composição da mistura, o envelhecimento do betão, as condições de humidade ao longo do tempo, a geometria do material e o módulo de elasticidade.

Dos inúmeros condicionantes é possível destacar como principais, o nível de tensão e a carga imposta à peça de betão. No qual a carga imposta provoca um nível de tensão tal, que parte da água presente na mistura é expulsa por meio do inúmeros poros capilares presentes no betão. Por este motivo a deformação aumenta. Se a carga imposta à peça do betão for transferida para o agregado, este material deforma-se elasticamente.

De acordo com Neville (1995), a Fluência varia linearmente com a relação entre a tensão aplicada e a tensão de rotura do betão. A relação em questão varia para um intervalo de valores da ordem de 0,4 a 0,7.

Seguidamente apresenta-se detalhadamente os fatores que influenciam a Fluência (acima mencionados neste item).

#### **2.3.2.1 Materiais e dosagem do cimento**

De acordo com Mehtha e Monteiro (2008), o efeito no consumo de cimento e da relação água-cimento do betão na Fluência não é direto. Pois um aumento no volume da pasta de cimento causa uma diminuição da fração do agregado, o que se traduz num aumento nas deformações dependentes da humidade no betão.

Com o aumento da relação água-cimento, a permeabilidade aumenta e a resistência diminui, em consequência a Fluência também aumenta.

De acordo com Neville (1970), o tipo de cimento é um interveniente relevante na Fluência, uma vez que é o material que determina a hidratação da matriz. Cimentos que possuem alta resistência inicial apresentam uma menor Fluência.

Contrariamente ao cimento, a principal função do agregado é diminuir a Fluência. Se o seu teor aumentar de 65 % para 75 % pode reduzir a Fluência em 10 % (Neville 1970).

Existem certas propriedades mecânicas que influenciam a deformação do betão, a título de exemplo destaca-se o módulo de elasticidade. Quanto maior este módulo for, menor é a Fluência.

Segundo Miller (2008), o limite de elasticidade indica a deformação máxima permitida antes do material adquirir deformação permanente. Por outro lado é uma forma de identificar o grau de restrição da deformação. Este limite pode ser obtido a partir da curva tensão-deformação resultante de um ensaio de compressão axial.

### **2.3.2.2 Aditivos e adições**

O efeito dos aditivos e adições, quanto à Fluência do betão, é uma questão pouco desenvolvida e com algumas dúvidas na literatura, devido à escassez de informação sobre os efeitos dos diversos tipos de aditivos nesta propriedade (Miller 2008).

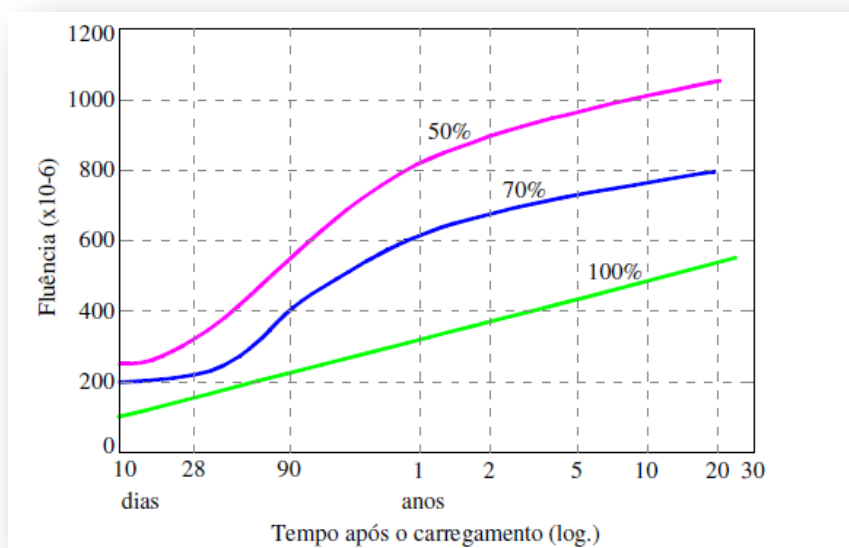
Através dos dados disponíveis, estes apresentam uma enorme gama de distintos ensaios, realizados sob diferentes condições, não permitindo retirar uma conclusão sucinta acerca do efeito destes constituintes.

Em geral apenas se espera que os aditivos aumentem a Fluência. Através da bibliografia consultada pode-se inferir que não há nenhum modelo fiável do efeito dos aditivos sobre a Fluência.

### **2.3.2.3 Humidade relativa do ambiente e temperatura**

Um dos fatores externos mais importantes promotor de Fluência é a humidade relativa do ar que envolve o betão. Em geral, quanto menor a humidade relativa do ar, maior a Fluência.

A **Figura 4** demonstra a influência da humidade relativa do ar na Fluência, segundo Neville (1970).



**Figura 4-** Efeito da humidade relativa do ar sobre a Fluência do betão (adaptado de Neville, 1980 em Miller, 2008)

Pode-se verificar na **Figura 4**, que para uma humidade relativa do ar de 50% a Fluência é mais elevada em cerca de duas a três vezes, do que uma humidade relativa de 100 %.

Experiências realizadas por Muller e Pristl (1993) em Kataoka (2010) permitiram concluir que para temperatura constante, as deformações por Fluência em peças de betão foram aceleradas em ambientes com humidade relativa cíclica. Demonstrando um aumento de 20 % em relação à exposição do betão a humidade relativa média constante.

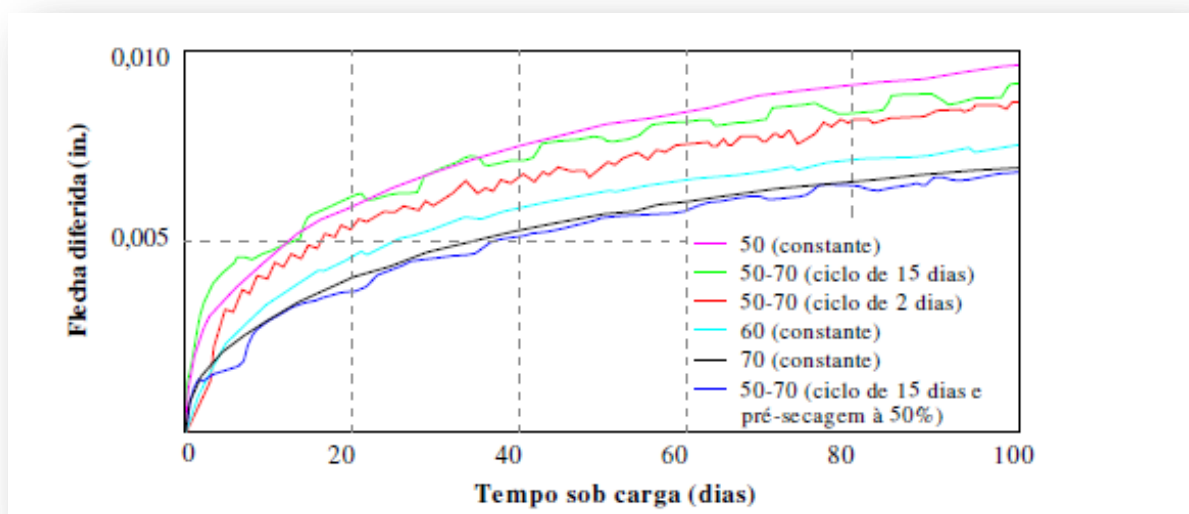
Contudo, Sakata e Ayano (2000) em Kataoka (2010) afirmam que a variação do coeficiente de Fluência devido a condições cíclicas de humidade relativa é pequena. É possível expressar este coeficiente em função da média da humidade relativa do ar. Todavia, a influência da humidade relativa do ar é baixa, quando os elementos de betão atingem o equilíbrio higroscópico com o meio, antes da aplicação da carga. Desta forma, não é a humidade relativa do ar que tem efeito direto sobre a Fluência, mas sim o processo de secagem do betão.

A Fluência não depende unicamente da perda de água que ocorre durante este fenómeno, mas também, da quantidade de água no momento da aplicação do carregamento.

Hansen (1960) realizou um estudo para verificar a Fluência, a partir de ensaios em laboratório, considerando um teor de humidade relativa do ar constante em peças de betão à escala real, sendo

estas condições difíceis de se aplicar. Dos resultados que obteve, permitiram concluir que a humidade relativa do ar alternada em dois limites resulta em deformações por Fluência maiores do que as obtidas ao manter a humidade relativa constante.

Outro estudo realizado pelo mesmo autor, foi a análise da influência das condições de armazenamento das peças antes da realização das experiências. Onde, é possível descartar que a influência da variação cíclica da humidade relativa é maior no caso das peças que não sofreram a pré-secagem.



**Figura 5-** Deformação por Fluência de vigas de argamassa armazenadas em humidade relativa cíclica (adaptado de Neville 1970)

Observando a **Figura 5** e comparando-se as curvas verdes e azul, verifica-se que a influência cíclica da humidade é mais pronunciada no caso em que não houve pré-secagem (curva verde). Relacionando as curvas verdes e vermelha, a variação de humidade ocorre lentamente. A curva de Fluência coincide praticamente com a obtida para o limite de humidade constante de 50 %. Quando o ciclo diminui, o comportamento das curvas aproxima-se do obtido para uma humidade relativa constante média do intervalo de variação.

Relativamente ao efeito da temperatura ambiente, este fator aumenta a Fluência no caso da estrutura ou peça de betão estarem submetidas a altas temperaturas geralmente, superior a 30 °C. Um exemplo deste facto é o caso de, pontes em betão armado, no qual o tabuleiro é constituído por betão. Sobre este, existe uma camada de asfalto que quando exposto à radiação solar atinge temperaturas acima de 40 °C, durante um longo período de tempo. No entanto se o aumento da

temperatura ocorrer antes do carregamento, este efeito ocorrerá no sentido de diminuir as deformações por Fluência (Mehtha e Monteiro 1994). Deste modo, os fatores mais importantes de influência da elevada temperatura no desenvolvimento desta ao longo do tempo são: a temperatura antes do carregamento, a temperatura durante o carregamento e variação de temperatura durante o carregamento. É importante distinguir, entre a temperatura durante o período de cura precedente da aplicação da carga e da temperatura enquanto o betão está sob a carga constante. Como já referido anteriormente, o aumento de temperatura antes do carregamento do betão para um longo período de tempo, irá acelerar o processo de hidratação no betão. Em consequência, o betão ficará com um maior grau de maturidade.

Por outro lado também se pode constatar e de acordo com Neville (1983), que para uma determinada temperatura elevada, a Fluência é significativamente menor, para betões que estão submetidos continuamente a essa temperatura. Ao invés de, quando a temperatura é aumentada num curto período de tempo, antes do carregamento. Neste último caso, a Fluência aumenta significativamente.

#### **2.3.2.4 Geometria do elemento estrutural**

A espessura de uma peça de betão condiciona a variação da Fluência. A Fluência diminui com o aumento das dimensões da peça.

A geometria da peça condiciona a passagem da taxa de água que é expelida através do fenómeno de Fluência. É um fator condicionante, uma vez que o principal motivo que causa Fluência é a dificuldade de evaporação de água no betão. O tamanho e a forma da peça de betão determinam a magnitude desta propriedade (Kataoka 2010).

#### **2.3.2.5 Idade do carregamento**

A idade do betão no momento do carregamento é um fator crucial na Fluência. Se o betão é carregado numa idade jovem, a Fluência será mais elevada do que se fosse um carregamento aos 28 dias de idade, que é o normal na prática corrente. Este comportamento é justificado pelo facto dos betões com maior idade possuírem um maior grau de hidratação, isto devido à modificação que ocorre na sua estrutura interna. Tornando-se mais compacta e possuindo um conteúdo de água diminuto, ao contrário do que acontece no betão precoce.

De acordo com Miller (2008) e adaptado de estudos efetuados por Reis (2003), demonstraram que após os 28 dias de idade de carregamento do betão, os resultados de Fluência não se alteram significativamente, revelando este fator pouco relevante a partir dessa idade. Tornando-se apenas relevante para a Fluência num período de idade jovem.

#### **2.3.2.6 Tensão e resistência**

A tensão aplicada e a Fluência têm uma relação proporcional. Esta proporção varia geralmente entre 0,4 a 0,6 da carga de rotura. No entanto, não se verifica a mesma relação no caso de elementos carregados a idades menores.

A rotura por Fluência dá-se quando a relação tensão e resistência aumenta proporcionalmente e o limite de proporcionalidade é ultrapassado. Esta relação varia de 0,80 a 0,90 da resistência a curto prazo.

Em termos da resistência, existe uma relação inversamente proporcional da resistência do betão no momento da aplicação da carga relativamente à Fluência, ou seja, quando a resistência do betão aumenta, a Fluência diminui.

#### **2.3.3 Previsão da Fluência pelo *Eurocódigo 2***

A deformação causada pela Fluência nas estruturas de betão compromete o desempenho dos elementos que a constituem. Assim, é importante prever a magnitude e a taxa de Fluência ao longo do tempo. No entanto os testes laboratoriais que determinam a deformação por Fluência são demorados e com custos elevados.

Todavia, os eurocódigos, possuem modelos de previsão que estimam a Fluência para uma determinada altura.

O *Eurocódigo 2* está inteirado num conjunto de euro normas europeias que complementarmente estabelecem o quadro normativo a adotar no projeto de estruturas. Este documento rege a utilização do betão, como elemento estrutural. Neste trabalho, só será focada a Parte 1.1 do *Eurocódigo 2*, no que diz respeito à Fluência.

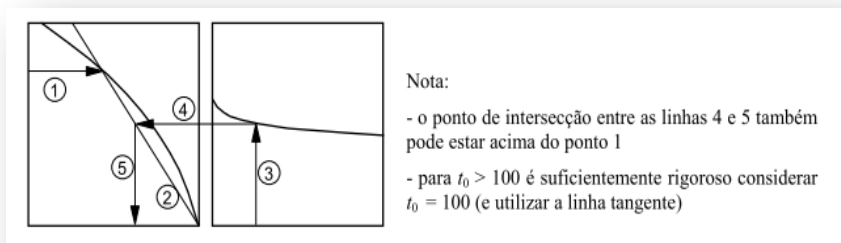
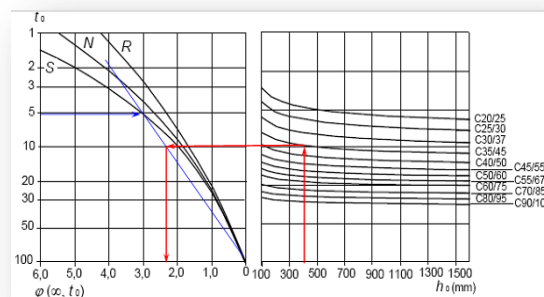
O modelo de previsão de Fluência definido no *Eurocódigo 2*, está restrito a tensões constantes de serviço, isto é  $0,45f_{ck}(t_0)$ . Para o qual é admitida ser linearmente dependente da tensão.

A Fluência do betão depende da humidade ambiente, das dimensões do elemento e da composição do betão. Também depende da idade do betão no primeiro carregamento assim como, da duração e da intensidade de carga. O coeficiente de Fluência,  $\varphi(t, t_0)$ , é função do módulo de elasticidade tangente  $E_c$ , que poderá ser considerado igual a  $1,05E_{cm}$ . No entanto, para se saber a evolução da Fluência com o tempo, calcula-se o coeficiente acima descrito pelo apresentado no Anexo B do *Eurocódigo 2* e o processo de cálculo está referido no ponto 2.3.3.1 deste trabalho.

A deformação do betão por Fluência,  $\varepsilon_{cc}(\infty, t_0)$ , na idade  $t = \infty$  para tensão de compressão constante  $\sigma_c$ , aplicada na idade do betão,  $t_0$ , é obtida por:

$$\varepsilon_{cc}(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) \times \left(\frac{\sigma_c}{E_c}\right) \quad (2)$$

Para o calculo do coeficiente,  $\varphi(t, t_0)$ , pode-se recorrer ao método indicado na **Figura 6** para condições de ambiente exterior de 50 % e 80 %, ou como, já referido anteriormente recorrendo ao anexo B do Eurocódigo 2 para uma forma mais rigorosa.



**Figura 6-** Método para a determinação do coeficiente de Fluência  $\phi(t, t_0)$ , para betão em condições de ambiente normais e ambiente exterior para RH= 80 %; C35/45;  $t_0=5$  dias;  $h_0=400$  mm; cimento 32.5 N (classe N)

### 2.3.3.1 Cálculo do coeficiente de Fluência pelo Anexo B do Eurocódigo 2

O coeficiente de Fluência,  $\varphi(t, t_0)$ , poderá ser calculado a partir de:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \times \beta_c(t, t_0) \quad (3)$$

Onde  $\varphi_0$  é calculado da seguinte forma:

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \times \beta(f_{cm}) \times \beta(t_0) \quad (4)$$

O fator de Fluência que contabiliza a humidade relativa no coeficiente de Fluência  $\varphi_{RH}$  é dado por:

$$\bullet \quad \varphi_{RH} = 1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0.1 \times \sqrt[3]{h_0}}, \text{ para } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa} \quad (5)$$

$$\bullet \quad \varphi_{RH} = \left[ 1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0.1 \times \sqrt[3]{h_0}} \times \alpha_1 \right] \times \alpha_2, \text{ para } f_{cm} > 35 \text{ MPa} \quad (6)$$

Onde,  $RH$  é a humidade relativa do meio ambiente em (%) e  $\beta(f_{cm})$  é fator que tem em conta a influência de resistência do betão no coeficiente de Fluência convencional:

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}} \quad (7)$$

O parâmetro  $f_{cm}$  é o valor médio de tensão de rotura do betão à compressão, em MPa, aos 28 dias de idade e  $\beta(t_0)$ , é o fator que tem em conta a influência da idade do betão à data do carregamento no coeficiente de Fluência:

$$\beta(t_0) = \frac{1}{(0,1 + t_0^{0,20})} \quad (8)$$

Em que  $h_0$  é a espessura equivalente do elemento, em mm,  $Ac$  é a área da secção transversal e o  $\mu$  é a parte do perímetro do elemento em contacto com o ambiente.

$$h_0 = \frac{2 \times Ac}{\mu} \quad (9)$$

$$\beta_c(t, t_0) = \left[ \frac{(t - t_0)}{(\beta_H + t - t_0)} \right]^{0,3} \quad (10)$$

Sendo que:  $t$  é a idade do betão, em dias, na data considerada,  $t_0$  é a idade do betão, em dias, à data do carregamento, e  $t-t_0$  é a duração não corrigida do carregamento, em dias. E ainda  $\beta_H$  é o coeficiente que depende da humidade relativa (RH em %) e da espessura equivalente do elemento ( $h_0$  em mm). Poderá ser estimado a partir de:

$$\beta_H = 1,5 * [1 + (0,012RH)^{18}]h_0 + 250 \leq 1500 \text{ para } f_{cm} \leq 35 \quad (11)$$

$$\beta_H = 1,5 * [1 + (0,012RH)^{18}]h_0 + 250 \alpha_3 \leq 1500\alpha_3 \text{ para } f_{cm} \geq 35 \quad (12)$$

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  são coeficientes que têm em conta a influência da resistência do betão:

$$\alpha_1 = \left[\frac{35}{f_{cm}}\right]^{0,7} \quad (13)$$

$$\alpha_2 = \left[\frac{35}{f_{cm}}\right]^{0,2} \quad (14)$$

$$\alpha_3 = \left[\frac{35}{f_{cm}}\right]^{0,5} \quad (15)$$

A influência do tipo de cimento no coeficiente de Fluência do betão poderá ser tida em conta corrigindo a idade à data do carregamento  $t_0$  de acordo com a seguinte expressão:

$$t_o = t_{0,T} * \left( \frac{9}{2 + t_{0,T}^{1,2}} + 1 \right)^\alpha \geq 0,5 \quad (16)$$

Em que,  $t_{0,T}$  é a idade do betão à data do carregamento, em dias, corrigida em função da temperatura e  $\alpha$  é o expoente função do tipo de cimento:

- Igal a (-1) para cimento da classe S;
- Igal a (0) para cimento da classe N;
- Igal a ( 1) para cimento da classe R;

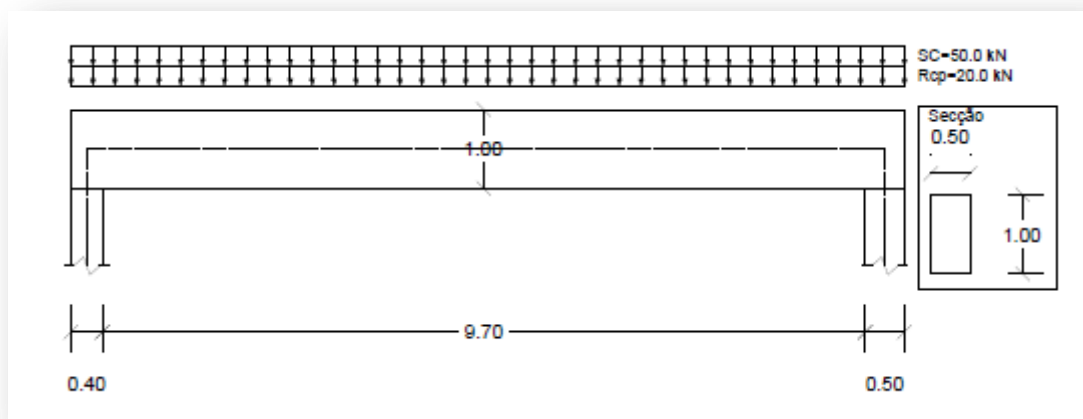
A influência de temperaturas elevadas ou baixas, no intervalo de 0 °C a 80 °C, na maturidade do betão poderá ser considerada corrigindo a idade do betão de acordo com a seguinte expressão:

$$t_T = \sum_{i=1}^n e^{-\left(\frac{4000}{[273+T(\Delta t_i)]^{-13,65}}\right)} * \Delta t_i \quad (17)$$

Em que,  $t_T$  é a idade do betão corrigida em função da temperatura, que substitui  $t$ , nas expressões correspondentes e  $T(\Delta t_i)$  é a temperatura em °C durante o intervalo de tempo  $\Delta t_i$ . Sendo que o  $\Delta t_i$  é o número de dias em que se mantém a temperatura  $T$ .

### 2.3.4 Exemplo prático da previsão da Fluência pelo Eurocódigo 2

Considerando uma viga simplesmente apoiada, sujeita à ação do peso próprio, sobrecarga (zonas de habitação) e restantes cargas permanentes com a configuração indicada na **Figura 7**. Os materiais a utilizar serão betão C 20/25 e Aço A 400.



**Figura 7**- Exemplo de cálculo de laje simplesmente apoiada (adaptado de Pacheco 2011)

#### Dados:

**Secção:** Altura ( $h$ )= 1 m; Largura ( $b$ )= 0.50 m

**Ações:** Peso Próprio (PP)=  $25 \text{ kn/m}^3$ ; Restantes Cargas permanentes (RCP) =  $20 \text{ kn/m}$  ; Sobrecarga (SC)=  $20 \text{ kn/m}$

**Propriedades dos materiais:**  $f_{yk} = 400 \text{ MPa}$  ;  $E_s = 200 \text{ MPa}$ ;  $\gamma_c = 1.5$ ;  $\gamma_s = 1.1$ ;

#### 2.3.4.1 Coeficiente de Fluência pelo Anexo B

A combinação a utilizar será a combinação quase permanente, que é utilizada para efeitos a longo prazo.

Para o cálculo da deformação do betão por Fluência é necessário calcular o coeficiente de Fluência, na idade  $t = \infty$  para uma tensão de compressão constante aplicada na idade  $t_0$ .

O coeficiente de Fluência é traduzido pela seguinte expressão:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \times \beta_c(t, t_0) \quad (18)$$

Sendo:  $t = \infty$  e  $t = 28$  dias

De acordo com as expressões mencionadas no item 2.3.3.1:

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{28}} = 3.175$$

Considerando que o betão atinge a capacidade resistente aos 28 dias:

$$\beta(t_0) = \frac{1}{(0,1 + 28^{0,20})} = 0.4888$$

$$h_0 = \frac{2 \times Ac}{\mu} = \frac{0,5}{3} = 333.3 \text{ mm}$$

Sendo uma humidade Relativa de 40 % e  $f_{ctm} = 28 \text{ Mpa} < 35 \text{ Mpa}$  então:

$$\varphi_{RH} = 1 + \frac{1 - \frac{40}{100}}{0.1 \times \sqrt[3]{333.3}} = 1.721$$

Assim, o coeficiente de Fluência relativo é dado por:

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \times \beta(f_{cm}) \times \beta(t_0) = 1.721 \times 3.175 \times 0.4888 = 2.669$$

O coeficiente  $\beta(t, t_0)$  para  $f_{ctm} = 28 \text{ Mpa} < 35 \text{ Mpa}$ , toma o valor:

$$\beta_H = 1,5 * [1 + (0,012RH)^{18}] * h_0 + 250 = 749.95$$

$$\beta_c(t, t_0) = \left[ \frac{(t - t_0)}{(\beta_H + t - t_0)} \right]^{0,3} = 0.37$$

Para  $t = \infty$  o valor de  $\beta_c(t, t_0)$  aproxima – se da unidade sendo:  $\beta_c(t, t_0) \cong 1$

Deste modo o coeficiente de Fluência toma o valor de:

- $\varphi(\infty, 28) = 2.669$

## 2.4 Fluência na madeira

A madeira é um material complexo, sendo anisotrópico e poroso. A sua composição varia significativamente de espécie para espécie, mas os constituintes comuns são: celulose, hemicelulose e lenhina.

A molécula de celulose contém grupos de hidroxilo (-OH), em intervalos regulares. Estes são responsáveis pela adsorção das moléculas de água e pela colagem de ambas as moléculas nos cristais que formam a estrutura da parede celular.

A presença de água condiciona o comportamento plástico da madeira, enfraquecendo as ligações entre as cadeias da celulose. Um aumento de temperatura também influencia as ligações deixando-as enfraquecidas pelo aumento do movimento térmico molecular.

Contudo, se as tensões aplicadas não forem suficientes para quebrar estas ligações, a madeira vai-se comportar elasticamente.

### 2.4.1 Interpretação do fenómeno da Fluência

A madeira pode ser considerada um bom material estrutural. Apresenta elevada resistência mecânica e baixa massa específica comparativamente a outros materiais.

As propriedades mecânicas deste material e dos compostos a base de madeira são obtidas pelas respostas desses quando submetidos a uma dada tensão. Manifestando a sua capacidade de desenvolverem deformações reversíveis, irreversíveis e de resistência à fratura (Pazzeto 2009).

O conhecimento do comportamento elástico e de Fluência da madeira é uma das propriedades mecânicas mais importantes para a maior parte das aplicações estruturais.

O comportamento das estruturas de madeira submetidas a esforços de cargas constantes e de longa duração irá condicionar o efeito de deformação inicial e a longo prazo.

A duração das cargas tem uma importante contribuição na resistência das peças de madeira, bem como na sua deformação. Na generalidade constata-se que a resistência deste material diminui com o aumento da duração das cargas ou seja ao longo do tempo, e a deformação aumenta proporcionalmente.

De acordo com Bodig, Jayne (1982) a resistência mecânica da madeira é conhecida pois o material é comprimido, fletido ou tracionado sob o efeito da aplicação da carga, ocorrendo deformação instantânea e deformação diferida ou por Fluência, dependendo do tempo de permanência da atuação da carga.

A deformação total da madeira pode ser diferenciada em três componentes distintas (Lopes 2013). Esta veracidade é demonstrada a partir da equação (19). É uma condição válida para situações de carga, temperatura e humidade constantes. No caso de variações cíclicas de algum destes fatores, terá de se adicionar à equação dois componentes:  $\varepsilon_{ms}$  e  $\varepsilon_S$ .

$$\varepsilon = \varepsilon_{inst} + (\varepsilon_{rec} + \varepsilon_{irr}) \quad (19)$$

A deformação instantânea ( $\varepsilon_{inst}$ ), depende do módulo de elasticidade e da rigidez da peça de madeira. Nesta fase, a madeira possui uma deformação reversível, isto é, ao suspender a carga, o material recupera a sua forma inicial. No entanto é importante referir que não existem materiais perfeitamente elásticos e haverá uma mínima deformação após a retirada da carga. Este comportamento pode ser descrito pela simples expressão da equação da Lei de Hooke. Segundo esta equação, o módulo de elasticidade é dado pela razão entre a tensão aplicada e a deformação resultante. Esta relação é proporcional ao esforço até ao limite de elasticidade. A deformação instantânea  $\varepsilon_{inst}$ , pode calcular-se admitindo um comportamento elástico da peça, o qual é válido em geral, para um nível de esforço menor que 35 % da resistência instantânea da madeira. As propriedades elásticas são verificadas somente quando o nível de carga aplicada se situa abaixo do limite proporcional, acima deste ocorrerão deformações plásticas, seguidas de rotura. Este comportamento elástico é uma característica própria de cada material e na madeira varia também de espécie para espécie.

A deformação por Fluência, é um comportamento que se produz posteriormente ao carregamento e que varia em função do tempo e de outros fatores como: da duração, da intensidade das cargas, do conteúdo de humidade, e da temperatura ambiente. O conteúdo de humidade juntamente com a duração das cargas é o parâmetro que maior incidência tem na deformação por Fluência. Esta componente pode ser dividida numa componente elástica que depende do tempo e é recuperável sendo designada por  $\varepsilon_{rec}$  e noutra componente que não é recuperável e designada por um comportamento visco-plástico  $\varepsilon_{irr}$ . Estes dois comportamentos, são considerados componentes

aditivos de Fluência e são influenciados principalmente pelo tempo, humidade relativa do ar e mudanças da humidade. Como já referido, se nenhuns destes parâmetros (temperatura, humidade relativa e carga) permanecerem constantes, deverão ser adicionados dois componentes à equação (19) tais como: o comportamento mecânico sortivo e  $\varepsilon_{ms}$  e a retracção  $\varepsilon_s$ .

É importante perceber as propriedades de Fluência que cada tipo de madeira possui. Dependendo do nível de tensão aplicada, esta pode ser suportada se for aplicada num curto espaço de tempo. Caso contrário se esta ação permanecer mais tempo, pode levar o material à rotura.

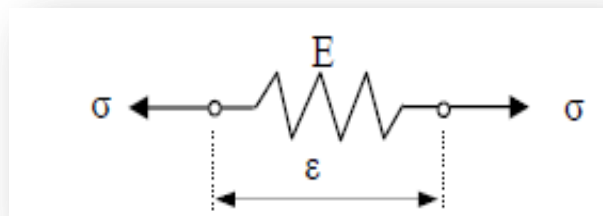
#### 2.4.2 Comportamento viscoelástico

O comportamento viscoelástico é uma manifestação inicial da madeira, que quando sujeita a uma carga permanente cuja tensão está muito abaixo da tensão de resistência, possui uma certa elasticidade. A madeira não recupera completamente o comportamento inicial mas aproxima-se bastante dele (como já referido no item 2.4.1). Para explicar este comportamento existem na literatura bastantes modelos demonstrados por vários autores. Alguns são apresentados seguidamente.

O modelo de comportamento que corresponde ao modelo básico da elasticidade é dado pela Lei de Hooke (ver equação (20)).

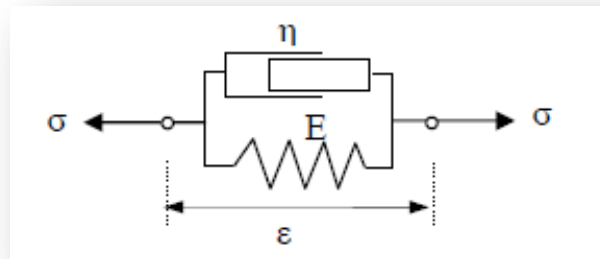
$$\sigma_{x,y,z} = C_{x,y,z} * \varepsilon_{x,y,z} \quad (20)$$

Onde  $\sigma_{x,y,z}$  e  $\varepsilon_{x,y,z}$  correspondem a tensões e a deformações unitárias para cada uma das direções principais e  $C_{x,y,z}$  representa a constante de proporcionalidade para a correspondente direção, que convencionalmente se apresenta pela letra E.



**Figura 8-** Modelo de comportamento básico de elasticidade [adaptado de Santos 2009]

O modelo de Maxwell é a forma geral do modelo linear para a viscoelasticidade. Este, têm em conta que a relaxação não ocorre num determinado tempo mas sim, numa distribuição temporal. Este modelo corresponde à ligação em série de uma mola a um amortecedor.



**Figura 9-** Modelo de Maxwell para o comportamento viscoelástico (adaptado de Santos 2009)

### 2.4.3 Parâmetros que afetam a Fluência

Os principais parâmetros que influenciam a deformação por Fluência são:

- O nível de esforço aplicado;
- Temperatura ambiente;
- O conteúdo de humidade da peça;
- Tempo de Carregamento;

#### 2.4.3.1 Nível de esforço aplicado

Existe uma relação linear e diretamente proporcional entre a Fluência e o nível de tensão aplicado, isto é válido para as mesmas condições de temperatura e humidade.

Estudos efetuados por Ballarin et al (1998) em Melo e Menezzi (2010), demonstram que a Fluência ocorre mesmo em níveis de baixas tensões e temperatura ambiente, sendo mais pronunciada em esforços de flexão e compressão perpendicular. A maioria das experiências levadas a cabo neste âmbito, são realizadas utilizando corpos submetidos à flexão. Isto porque, é mais simples medir estas deformações do que variações longitudinais originadas por esforços de tração ou compressão. Por outro lado, o uso estrutural da madeira, torna-se mais relevante para deformações diferidas em elementos submetidos à flexão ao invés de submetidos a esforços axiais.

#### **2.4.3.2 Temperatura ambiente**

Para temperaturas mais elevadas a Fluência apresenta-se acentuada. Acima de temperaturas de 55 °C existe alteração na lignina e a hemicelulose amolece.

O aumento de temperatura faz com que os elementos da estrutura da madeira apresentem uma maior plasticidade.

#### **2.4.3.3 Conteúdo de humidade**

O teor de humidade afeta a Fluência e no geral influência em todas propriedades mecânicas da madeira.

Um baixo teor em humidade implica uma maior resistência mecânica. A variação da resistência e do teor de humidade difere com o tipo de tensão aplicada.

#### **2.4.3.4 Tempo de carregamento**

A duração de atuação da carga que exerce numa peça de madeira é um fator relevante, mesmo atuando de uma forma permanente ou periódica. Este fator vai alterar a resistência mecânica da peça.

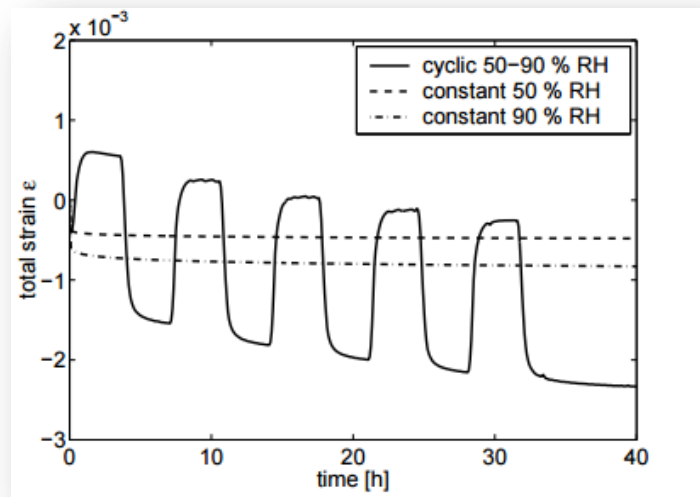
O carregamento pode-se dividir em 5 classes de duração do carregamento, ver **Tabela 2**. A madeira é um material que apresenta variações reológicas, isto é, as suas propriedades dependem do tempo e o conhecimento do tempo de permanência da carga é um dado fundamental para a sua análise. Se a carga aplicada à estrutura ou peça for bastante elevada e a sua duração também, ocorrerá eventualmente rotura por Fluência. E desta forma a deformação será bastante mais elevada.

#### **2.4.4 Comportamento mecânico sortivo de Fluência**

Este comportamento é designado pela deformação que ocorre quando a madeira, sob a ação de uma força de valor constante, sofre alteração de teor de água e/ou de temperatura. O que acontece quando sujeita a variação das condições ambientais (Santos 2009).

A madeira quando sujeita às alterações do conteúdo de humidade, exhibe uma maior percentagem de deformação. Ao invés de que quando está apenas sujeita a condições de humidade constante, tal como no betão.

A **Figura 10** demonstra a veracidade destes factos, como se pode verificar a deformação total após alguns ciclos de humidade excede a deformação em qualquer dos casos mantendo humidade constante (tende para a RH =50 % ou RH = 90 %).



**Figura 10-** Exemplos do efeito mecânico sortivo na Fluência-Resultados de um teste de Fluência à compressão em humidade relativa constante cíclica (adaptado de Alfthan, 2002)

Uma série de fatores influenciam o comportamento mecânico sortivo. A natureza da madeira é determinante, pois diferentes espécies comportam-se de maneira distinta. Os diferentes modos de carregamento também alteram este comportamento.

Alguns modelos de estudo foram desenvolvidos por vários autores, tais como: Hoffmeyer (1990) e Hunt (1991), no entanto existem algumas diferenças entre eles, muitas vezes esta diferença está relacionada com a distinta interpretação dos resultados. Estes modelos são de natureza fenomenológica, não existindo uma explicação física para este comportamento na Fluência.

Habeger and Coffin sugeriram que o comportamento mecânico-sortivo de Fluência é um resultado do inchaço não homogêneo e da não linearidade de Fluência. Que neste contexto significa um aumento de tensão, que causa um aumento na taxa de Fluência. E este aumento é muito maior que a alteração da tensão.

Devido ao heterogêneo inchaço, uma mudança no conteúdo de humidade vai dar origem a uma distribuição de tensão no material. O volume médio dessas tensões é zero.

Quando estas tensões internas são relacionadas com um estado de tensão causada por cargas mecânicas externas, as tensões resultantes serão maiores numa das partes do material (em compressão) e inferiores noutras (em tração). Em consequência, origina taxas de Fluências superiores e inferiores.

#### 2.4.5 Modelos matemáticos de Fluência

De entre os modelos mais usuais existentes, na **Tabela 1** são apresentados modelos empíricos do comportamento em Fluência por Bodig, Jayne (1982).

**Tabela 1-** Modelos empíricos mais comuns para a previsão de Fluência (adaptado de Bodig, Jayne 1986 em Lopes 2013)

Modelo	Equação	Coefficientes
<i>Parabólico</i>	$\varepsilon(t) = \beta_0 + \beta_1 \times t^{\beta_2}$	$\beta_0, \beta_1, \beta_2$
<i>Lei 1/3</i>	$\varepsilon(t) = \beta_0 \times \left[ 1 + \beta_1 \times t^{\frac{1}{3}} \right] \times e^{t \cdot \beta_2}$	$\beta_0, \beta_1, \beta_2$
<i>Logaritmo</i>	$\varepsilon(t) = \beta_0 + \beta_1 \times \log(t)$	$\beta_0, \beta_1$
<i>Polinomial</i>	$\varepsilon(t) = \beta_0 + \beta_2 \times t^{\beta_2} + \beta_3 \times t^{\beta_4}$	$\beta_0, \beta_2, \beta_3, \beta_4$
<i>Seno Hiperbólico</i>	$\varepsilon(t) = \beta_0 + \beta_1 \times \sinh \beta_2 \times t^{\beta_3}$	$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3 = 0.333$
<i>De Lacombe</i>	$\varepsilon(t) = \beta_0 + \beta_1 \times t^{\frac{1}{\beta_2}} + \beta_3 \times t^{\frac{2}{\beta_2}} \times \beta_4 \times t^{\frac{3}{\beta_2}}$	$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$

**Legenda:** t – tempo; coeficientes de Fluência:  $\beta_i$  com  $i=0$  até 4

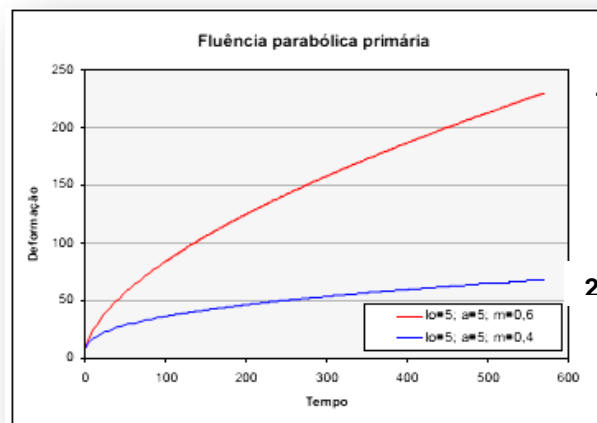
Os modelos utilizados são: o Parabólico, Lei 1/3 (Andrade) e o Logaritmo que estudam a Fluência primária, os modelos Seno hiperbólico e Polinomial, que estudam a Fluência primária e secundária. Por fim o modelo de Lacombe analisa a Fluência primária, secundária e terciária.

As constantes/parâmetros que se apresentam nestes modelos são definidas através de ajustamentos em ensaios experimentais. Normalmente o primeiro termo de cada expressão representa a deformação elástica e o segundo termo a deformação por Fluência.

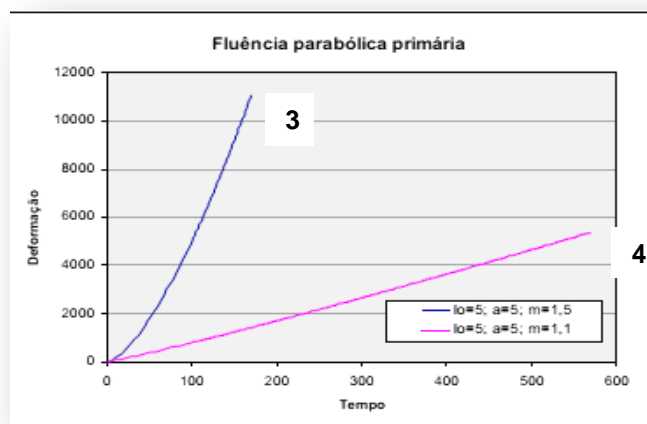
A partir destes modelos consegue-se modelar as curvas ao ajuste de ensaios experimentais, modificando as contantes.

Santos (2009) realizou duas simulações para o modelo parabólico no sentido de avaliar a influência dos valores das constantes na configuração das curvas de Fluência. Estas simulações são apresentadas na **Figura 11**.

Onde  $a$  e  $m$  são constantes e assemelham-se às apresentadas na **Tabela 1** para este modelo:  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ .



a)



b)

**Figura 11-** Exemplos das representações gráficas do modelo parabólico de Fluência, com diferentes valores atribuídos às constantes  $a$  e  $m$  ((a) e (b)) (adaptado de Santos 2009)

Sendo que, para a curva (1) o valor dos seguintes parâmetros:  $\beta_1 = 5$  e  $\beta_2 = 0.6$  e para a curva (2) são :  $\beta_1 = 5$  e  $\beta_2 = 0.4$  e  $l_0 = \beta_0$ .

Para a curva (3),  $\beta_1 = 5$  e  $\beta_2 = 1,5$  e para a curva (4)  $\beta_1 = 5$  e  $\beta_2 = 1,1$

No capítulo 4, estes modelos irão ser utilizados para o tratamento de dados de provetes de madeira em escala 1:10, no qual se realiza a avaliação da deformação relativa em Fluência.

#### 2.4.6 Previsão da Fluência segundo Eurocódigo 5

A deformação em Fluência pode ser calculada através dos critérios no “EN 1995-1-1:2004 - *Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1.1: General – Common rules and rules for buildings*”, no que respeita os estados limites de serviço.

O *Eurocódigo 5*-Parte 1-1 estabelece os princípios gerais para o projeto de estruturas de madeira, assim como as regras específicas para edifícios.

Efetua-se uma comparação com os variados modelos de Fluência teóricos de previsão de Fluência através dos resultados experimentais fornecidos. Entendeu-se interessante apresentar de uma forma comparativa a recomendação pelo *Eurocódigo 5*, relacionado com a previsão deste fenómeno.

A deformação final de uma peça de madeira pode ser calculada da seguinte forma:

$$u_{fin} = u_{fin,G} + u_{fin,Q1} + u_{fin,Qi} \quad (21)$$

Onde:

$$u_{fin,Q1} = u_{inst,Q,1} \times (1 + \varphi_{1,2} \times k_{DEF}), \text{ para a principal acção variável} \quad (22)$$

$$u_{fin,Qi} = u_{inst,Q,i} \times (\varphi_{0,i} + \varphi_{2,i} \times k_{DEF}), \text{ para as restantes ações variáveis, Qi (i > 1)} \quad (23)$$

Em que :  $\varphi_{2,i}$ ,  $\varphi_{2,1}$ , são factores para o valor das ações quase permanentes;  $\varphi_{0,i}$ , são os factores para o valor da combinação de ações variáveis;  $u_{fin,G}$ , deverá ser calculado para ações quase permanentes, da seguinte forma :

$$u_{fin,G} = u_{inst,G} * (1 + k_{DEF}) \quad (24)$$

Sendo,  $u_{inst,G}$  é a deformação instantânea calculados para a combinação característica de ações.

Em que,  $k_{DEF}$  é um coeficiente que depende do tipo de madeira e da classe de serviço e está tabelado no *Eurocódigo 5-Tabela 2*.

Neste caso, a deformação calculada para análise dos provetes de madeira nos capítulos seguintes, será analisada apenas para as cargas quase permanentes:

$$u_{fin} = u_{inst,G} * (1 + k_{DEF}) \quad (25)$$

#### 2.4.5.1 Coeficiente $k_{DEF}$

Este fator têm em conta a influência da duração das cargas, conteúdo de humidade e o tipo de material utilizado.

A grande influência da duração das cargas sobre o comportamento estrutural da madeira reflete-se no dimensionamento dos estados limites de resistência através dos coeficientes  $k_{DEF}$ . É necessário ter em conta que as “classes de duração das cargas” estão caracterizadas pelo efeito de uma ação constante atuando por um certo período de tempo. Para uma ação variável da classe correspondente, depende da variação típica da carga durante a vida da estrutura.

A duração acumulada do valor característico da carga é frequentemente muito curto em comparação com o tempo de exposição total da mesma.

As ações podem ser classificadas em cinco categorias em função da sua duração e de acordo com o *Eurocódigo 5*.

**Tabela 2-** Classes de duração de carga

<i>Classe de duração da carga</i>	<i>Ordem de duração acumulada da carga característica</i>	<i>Exemplos de Cargas</i>
<i>Permanente</i>	<i>Mais de 10 anos</i>	<i>Peso próprio</i>
<i>Longa</i>	<i>6 meses - 10 anos</i>	<i>Sobrecargas úteis em depósitos</i>
<i>Media</i>	<i>1 semana - 6 meses</i>	<i>Sobrecargas de uso, neve*</i>
<i>Curta</i>	<i>Menos de 1 semana</i>	<i>Neve* e vento</i>
<i>Instantânea</i>	<i>30 segundos</i>	<i>Ações acidentais</i>

\*Dependendo das condições locais

Os dois fatores que condicionam o conteúdo de humidade na estrutura segundo o *Eurocódigo 5* são: a temperatura e a humidade relativa do ambiente. As “classes de serviço” contempladas no *Eurocódigo 5* são três.

A “classe 1” refere-se às estruturas que durante a sua vida útil se localizaram em ambientes com aproximadamente 20 °C de temperatura e onde é ultrapassado apenas nalgumas semanas por ano, uma humidade relativa de 65%. Estas condições garantem para a maioria dos *softwoods*, um teor de humidade não superior a 12 %.

A “classe 2” refere-se a estruturas que se localizam em ambientes de temperaturas de 20 °C, mas com uma humidade relativa superior em apenas algumas semanas por ano de 85 %. Assim, o teor de humidade na maior parte das madeiras macias não é superior a 20 %.

A “classe 3”, envolve situações mais desfavoráveis que as descritas, alcançando o teor de humidade mais elevados que na condição 2. A temperatura também têm influência neste sentido, no entanto apenas se considera quando se atinge valores superiores a 50°C.

Os valores de  $K_{DEF}$  podem ser observados na **Tabela 3**.

**Tabela 3-** Valores de  $K_{DEF}$  (adaptado de EC5)

Material	Classe de Serviço		
	1	2	3
<b>Madeira Maciça</b>	0,60	0,80	2,00
<b>Madeira lamelada Colada</b>	0,60	0,80	2,00
<b>LVL</b>	0,60	0,80	2,00
<b>Contraplacado</b>	0,80	-	-
	0,80	1,00	-
	0,80	1,00	2,50
<b>OSB</b>	2,25	-	-
	1,50	2,25	-
<b>Aglomerado</b>	2,25	-	-
	2,25	3,00	-
	1,50	-	-
	1,50	2,25	-
<b>Aglomerado de fibras HDF</b>	2,25	-	-
	2,25	3,00	-
<b>Aglomerado de fibras, medias</b>	3,00	-	-
	3,00	4,00	-
<b>Aglomerado de fibras MDF</b>	2,25	-	-
	2,25	3,00	-

De acordo com a **Tabela 3** e da equação 21, pode-se verificar que para um elemento estrutural de madeira maciça em exterior e condições de serviço 3, a deformação aumenta 300 %.

## 2.5 Fluência nos Metais: aço e alumínio

### 2.5.1 Comportamento geral da Fluência

A deformação lenta sob ação de uma carga constante aplicada, durante um período de tempo, a uma temperatura superior à temperatura ambiente identifica-se como Fluência nos metais. No qual podem sofrer uma elevada deformação e até fraturar.

O comportamento à Fluência dos metais e ligas metálicas dependem de vários fatores, entre os quais a composição, o tamanho de grão e o tratamento térmico.

A Fluência em altas temperaturas é significativa a partir de temperaturas superiores a 0.4 TF, onde TF é denominada de temperatura de fusão.

**Tabela 4-**Temperatura de fusão para alguns metais

<b>Metais</b>	<b>Temperatura de Fusão (°C)</b>
<i>Aço Carbono</i>	1425-1540
<i>Aço Inox</i>	1510
<i>Alumínio</i>	659
<i>Bronze</i>	927
<i>Cobre</i>	927
<i>Ferro</i>	1535
<i>Latão</i>	905-932

De acordo com a **Tabela 4**, os aços mais desejados são os de granulação grosseira. Quando se impõem uma carga, ocorre uma deformação instantânea, que é praticamente elástica. Num curto período de tempo, ocorrem ajustamentos plásticos adicionais nos pontos de tensão ao longo dos contornos de grãos e de defeitos. Em consequência o material sofre um aumento de resistência à Fluência (Castro 2013).

Segundo Kawakami (2011), uma temperatura elevada para um dado material pode não ser tão elevada para outros materiais. Apresenta-se o seguinte exemplo em que, a uma temperatura de 300°C, o fenômeno de Fluência será menor no aço do que comparado à madeira. Desta forma, para solucionar o problema, deve-se utilizar a razão entre a temperatura de ensaio e a temperatura de fusão do material. Tal como:

$$TH = \frac{T_e}{T_f} \quad (26)$$

Onde:

- $T_H$  é a temperatura homóloga
- $T_f$  é a temperatura de fusão do material
- $T_e$  é a temperatura do ensaio

A taxa de Fluência é denominada pela percentagem de deformação relativa, consoante o tempo de atuação da carga aplicada ao corpo. Esta Fluência descrita é chamada de Fluência primária:

$$0 < \frac{T_e}{T_f} < 0,3.$$

A deformação permanecerá lenta em relação ao tempo, sendo a taxa de Fluência praticamente constante. Este estado é denominado como Fluência estacionária e onde  $0,3 < \frac{T_e}{T_f} < 0,5$ . Após este estado, ocorre uma aceleração na taxa de Fluência até à rotura sendo denominado este estado por Fluência terciária e onde  $\frac{T_e}{T_f} > 0,5$ . Estes comportamentos de Fluência já foram abordados em capítulos anteriores mais pormenorizadamente.

A fase do estado estacionário é por vezes omissa, uma vez que o processo designado por Fluência primária muda diretamente para o terciário. Na maioria dos aços, a região correspondente à taxa constante é praticamente inexistente, não existindo o estado de Fluência secundária ou estacionário. As microestruturas dos aços e das suas ligas estão praticamente em alteração (Castro 2013).

## 2.5.2 Mecanismos de Fluência

Segundo Henring (1950) em Kawakami (2011), a viscoplasticidade em altas temperaturas está relacionada com os fenómenos de difusão. Estes fenómenos podem ser distinguidos em duas categorias. Na Fluência por deslocamento (lei de Baley-Norton-  $0.5 T_f < T_e < 0.8 T_f$ ), os mecanismos de Fluência são controlados pelos movimentos das discordâncias, ou seja, implica que a distância percorrida pela matéria é curta em relação aos grãos do metal. O fluxo de átomos ocorre das regiões com tensões locais de compressão, para regiões com tensões locais de tração (Cardoso 2009).

### 2.5.2.1 Fluência por difusão

A altas temperaturas o gradiente potencial provocado pela variação do potencial químico dos átomos, vai provocar um fluxo de matéria no interior e nos limites de grão, dando origem a uma deformação permanente.

De acordo com Herrin e Nabarro (1950), aplicando-se uma tensão a um cristal em temperaturas elevadas existirá uma deformação devido ao transporte de matéria por difusão. Os fenómenos de difusão causam uma deformação plástica, se a matéria é transportada a partir dos contornos do grão, causará um esforço de tensão. Acabando por criar esforços de compressão e tração, dependendo da sua direção.

Os autores Herring e Nabarro (1950) demonstraram que a taxa de deformação é dada pela seguinte relação:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{2 D_L \sigma b^3}{d^2 K T_K} \quad (27)$$

$\sigma$  é a tensão aplicada e

$T_K$  é a temperatura absoluta de Fluência,  $K$  é constante,  $d$  é o coeficiente auto difusão e  $b$  é o vector de Burgers.

### 2.5.2.2 Fluência de deslocamento

O fluxo de átomos ocorre das regiões com tensões de compressão para as regiões com tensões locais de tração.

Segundo Norton (1929) em Kawakami (2011), existem duas classes: a Fluência por restauração e a Fluência pelo movimento de concordâncias. A Fluência por restauração ocorre na segunda fase de Fluência, onde a taxa de deformação se torna constante. A Fluência pelo movimento das discordâncias ocorre devido à tensão externa, e à existência de alguns precipitados que promovem distorções no plano de deslizamento das discordâncias que são obstáculos.

O modelo associado a este fenómeno pode ser descrito pela Lei de Arrhenius (Kawakami 2011):

$$\varepsilon = A \sigma^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (28)$$

Sendo que:  $A$  é constante,  $Q$  é a energia de ativação térmica de Fluência ( $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ ),

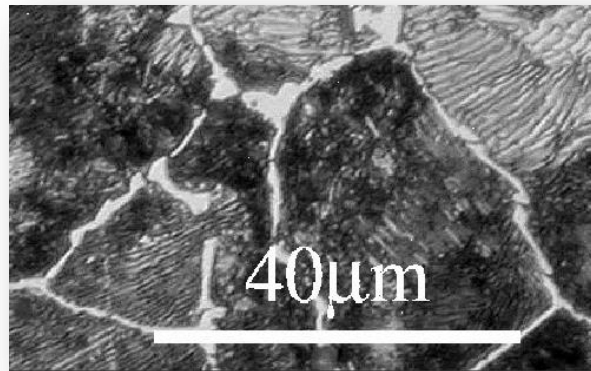
$R$  é a constante universal dos gases perfeitos :  $8.31 \text{ (J} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ K}^{-1})$  e  $T$  é a temperatura (K).

### 2.5.3 Comportamento em Fluência do Aço Cr-Mo

Os aços de carbono são utilizados em condições de serviço com temperaturas até  $370 \text{ }^\circ\text{C}$ . No caso dos aços tipo Cr-Mo, na sua maioria, são utilizados a temperaturas até  $650 \text{ }^\circ\text{C}$  (Moraes, 2014). Acima destes limites são utilizados os aços inoxidáveis austeníticos resistentes ao calor. Os aços deste tipo apresentam microestruturas do tipo ferrítico-banítica ou ferrítico-perlítica (ver **Figura 12** e **Figura 13**), dependendo do tratamento térmico efetuado. Estas microestruturas apresentam diferenciação nas propriedades mecânicas e na estabilidade térmica sob altas temperaturas.



**Figura 12-** Fotomicrografias de provetes de bainita (<http://www.cienciadosmateriais.org/>)

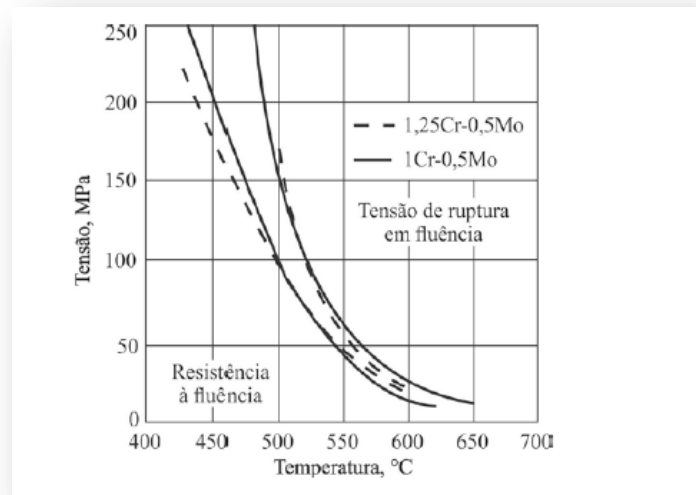


**Figura 13-** Fotomicrografias de provetes de perlita (<http://www.cienciadosmateriais.org/>)

Estes aços possuem boas propriedades tais como: boa soldabilidade, alta tenacidade, boa resistência à corrosão, alta condutividade térmica e inclusive resistência à Fluência.

Na generalidade, a boa resistência à Fluência nestes aços é explicada através da adição dos elementos cromo, molibdênio e manganês em solução sólida. O molibdênio é um elemento químico que é essencial para os aços que trabalham para temperaturas acima de 40 °C, pois este é o elemento mais eficaz para aumentar a resistência à Fluência. No entanto, quando sujeitos a elevadas temperaturas e cargas, estes materiais sofrem com a degradação da sua microestrutura que, por consequência, provoca a diminuição da sua resistência à Fluência. A temperatura elevada atua como uma força que facilita a precipitação dos elementos da solução sólida na forma de carbonetos, nitretos e carbonitretos e evoluem para estruturas mais fracas e menos resistentes.

A **Figura 14** demonstra dois tipos de aço de Cr-Mo que podem ser utilizados até 590°C. E possuem tensão de rotura em Fluência e resistência à Fluência similares aos aços 1Cr-0,5 Mo.



**Figura 14**-Resistência à Fluência (0,01 % em 1.000 h) e tensão de rotura (100.00 h) dos aços 1Cr-0,5 Mo e 1,25Cr-0,5Mo (adaptado de Moares 2014)

De acordo com ensaios efetuados com este tipo de aço, Moares (2014) afirma que o envelhecimento após longo período de operação, de 240.00 horas, sob temperatura de 500 °C e pressão interna de  $80 \frac{kg}{cm^3}$ , reduziu significativamente a resistência à Fluência do aço e refletiu numa maior sensibilidade para cargas mais elevadas.

#### 2.5.4 Comportamento em Fluência dos Aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são materiais de alta resistência que possuem temperaturas variáveis entre 800 °C e 1000 °C. A sua estrutura é essencialmente ferrítica a qualquer temperatura. Os aços inoxidáveis ferríticos são ligas compostas de ferro e cromo com teores de 11 a 27 % de cromo. O cromo irá conferir uma boa resistência à corrosão. São resistentes a altas temperaturas, tanto que podem ser sujeitos a uma exposição contínua, sem que ocorra perda das suas propriedades.

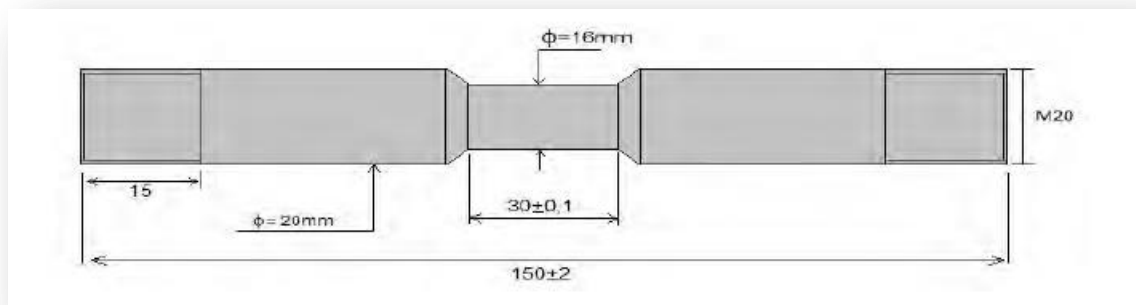
Kawakami (2011) efetuou estudos acerca do comportamento em Fluência para aços inoxidáveis, realizando ensaios à tração, auxiliando-se de uma simulação numérica para o tratamento de dados. Os tipos de aços inoxidáveis e ferríticos são apresentados na **Tabela 5**, assim como a respetiva composição química.

**Tabela 5-** Aços inoxidáveis e respetiva composição química

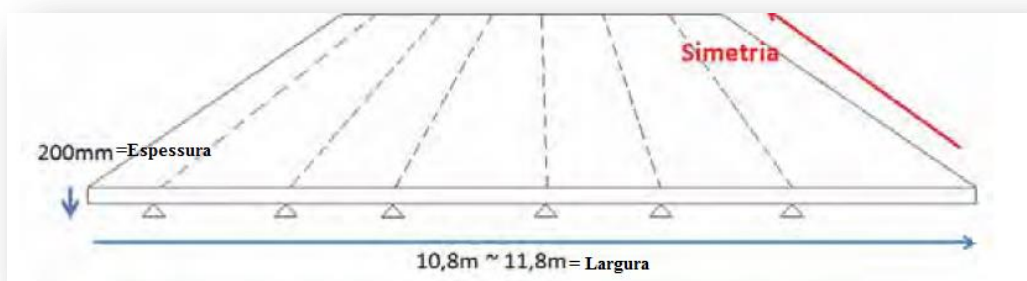
<b>Tipos de Aço</b>	<b>Ni</b>	<b>Mn</b>	<b>C</b>	<b>N</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>Si</b>	<b>Nb</b>	<b>Ti</b>
<i>AISI 409</i>	0,11	0,26	0,01	0,01	11,38	0,01	0,51	0,01	0,19
<i>AISI430 Ti</i>	0,25	0,32	0,02	0,01	16,12	0,03	0,5	0,01	0,36
<i>AISI 441</i>	0,17	0,29	0,01	0,02	17,61	0,01	0,59	0,5	0,15
<i>AISI 444</i>	0,24	0,27	0,01	0,02	17,74	1,81	0,5	0,32	0,15

A *AISI* representa o sistema americano para a classificação dos aços.

As condições de temperatura do ensaio foram de 1200 °C. As dimensões dos provetes padrão a ensaiar foram as seguintes:

**Figura 15-** Dimensões padrão do provete de ensaio (adaptado de Kawakami)

Kawakami (2011) constatou que para uma chapa de aço com largura de 1120 mm, com uma espessura de 200 mm, esta não apresentava deformação significativa. No entanto para valores de espessura superior a 200 mm, esta deformação já se enfatiza.

**Figura 16-** Vista em 3D de uma chapa de aço

Aumentando a largura verificada na **Figura 16** e a temperatura, os valores da deformação aumentam, quando ocorre o aumento da espessura. A tendência é a diminuição do valor de deformação devido ao aumento da rigidez. Por outro lado, é necessário uma atenção especial quando se aumenta a espessura deste material, uma vez que a partir de certo momento, a deformação surge devido ao aumento do seu peso. Este efeito a longo prazo poderá ser mais gravoso que a deformação em Fluência associada.

Outro aspecto verificado é que efetuou uma classificação entre vários tipos de aço em relação ao risco de Fluência.

A **Tabela 6** mostra os teores de em solução sólida para cada tipo de aço.

**Tabela 6-** Solução sólida de Ti e Nb

<b>Tipo de aço</b>	<b>Ti</b>	<b>Nb</b>
AISI 409	0,121	-
AISI 430 Ti	0,240	-
AISI 444	0,024	0.359
AISI 441	0,023	0.535

Os aços que possuíam Nb em solução sólida tiveram uma resistência maior à Fluência como exemplos têm-se os aços AISI 441 e AISI 444 (mencionados na **Tabela 5** e **Tabela 6**). Efetuando-se uma comparação entre estes dois aços, o tipo AISI 444 irá obter uma maior resistência ao fenômeno de Fluência uma vez que a quantidade de molibdênio é maior. Este elemento químico aumenta a resistência à Fluência sem a formação de precipitados.

### **2.5.5 Comportamento em Fluência de um Aço de alta resistência em temperatura ambiente.**

Liu et al (2011), contrariamente ao autor referido Kawakami (2011), estudou a Fluência em temperatura ambiente. O estudo permitiu observar o comportamento em Fluência sob carga constante em função do tempo e a influência da dureza do aço.

Dos resultados obtidos, acredita-se que o aumento de Fluência sob carga constante pode ser atribuído às maiores tensões aplicadas, à longa Fluência e a durezas mais baixas. Pode-se atribuir esse aumento também à existência de uma microestrutura não homogênea.

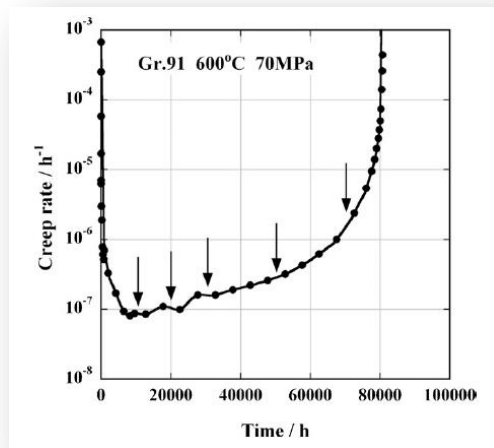
A deformação em Fluência sob temperatura ambiente é usualmente ignorada, podendo ser reduzida. Nestes casos as falhas na estrutura são improváveis, e especialmente nos aços de alta resistência sob cargas abaixo do limite de elasticidade. Pode ser constatado que, em temperatura ambiente, a Fluência num determinado período de tempo aumenta com o aumento de tensão e com a redução de dureza.

#### **2.5.6 Degradação microestrutural de um aço submetido a tensões baixas durante a Fluência**

Por vezes, durante os ensaios de deformação do aço, quando este é submetido a tensões baixas, ocorre degradação da sua microestrutura.

Um dos estudos realizados por Sawada et al (2008 e 2011) consistiu em condições de temperatura variável entre 500 °C e 700 °C, sendo aplicada uma tensão constante de 70 MPa. Estes parâmetros foram aplicados em função do tempo, sendo esta uma variável importante no ensaio, tendo por variação as 0 horas e as 80 000 horas (333 dias).

Os provetes de aço utilizados eram do tipo Gr.91 e possuíam um comprimento de 300 mm e diâmetro de calibre de 6 mm. Os testes foram interrompidos para aproximadamente 10 000 h, 20 000 h, 30 000 h, 50 000 h e 70 000 h. As setas na **Figura 17** indicam o tempo de interrupção. No entanto, estes ensaios foram interrompidos sob a seguinte condição: temperatura a 600 °C e tensão constante de 70 MPa. Os resultados obtidos graficamente acerca da deformação por Fluência aquando a interrupção estão sintetizados na **Figura 17**.



**Figura 17-** Taxa de Fluência no tempo, a uma temperatura de 600 °C e uma tensão constante de 70 MPa (adaptado de Sawada et al, 2008)

Da análise efetuada, pode ser observado que para uma dada temperatura de 500 °C e 550 °C, o comportamento em Fluência, aumenta lentamente consoante a diminuição de aplicação da carga. No entanto, para uma temperatura de 600°C pode ser verificado que ocorreram mudanças microestruturais no aço. Em relação a essas mudanças no aço durante os ensaios de Fluência, os autores observaram através da microscopia eletrônica de transmissão convencional (TEM), que houve uma alteração no deslocamento da estrutura dos provetes que sofreram rotura por Fluência. O deslocamento médio dos provetes que sofreram Fluência, terá decrescido drasticamente até as 30 000 horas ou seja 1250 dias. Mantendo-se constante até aos 3000 dias, após os 3000 dias este deslocamento decresceu até à rotura. O aumento médio do sub grão dos provetes, aumenta com o tempo e a partir dos 3000 dias aumenta abruptamente. Deste modo, a Fluência aumenta drasticamente após esse momento. Assim, pode-se afirmar que o crescimento do sub grão, a diminuição no deslocamento e a densidade, correspondem a um aumento de deformação por Fluência. Os sub grãos têm uma importância no processo de Fluência, este facto terá sido observado a partir de muitas outras pesquisas envolvendo mudanças de tensões durante o ensaio. Foi observado que o material contendo sub grãos pequenos, mostra-se mais resistente à Fluência do que o material contendo sub grãos maiores (Alegria 1984).

### **2.5.7 Relaxação de tensões nos metais**

Este comportamento é explicado através de uma deformação mantida constante no tempo aplicada ao material, no qual as tensões internas que se opõem à ação exterior, vão diminuindo gradualmente.

A relaxação é caracterizada através de mecanismos internos do material, tal como a Fluência. No caso do aço, a relaxação é manifestada pelo alongamento que este sofre no decorrer do tempo, quando submetido a uma tensão constante.

Um metal quando sujeito a uma ação externa sofre deformações, adquirindo conseqüentemente um estado de energia diferente do inicial. Se a ação deixar de atuar sobre o material, este retoma um novo estado de equilíbrio estável através do processo de relaxação de tensões.

As mudanças do estado referidas são devidas a variáveis tais como: a temperatura, tensão e deformação.

Na relaxação de tensões a deformação total permanece constante, ocorrendo a transformação de energia de deformação elástica armazenada na rede cristalina, em energia de deformação plástica. E conseqüentemente um decréscimo contínuo da tensão aplicada com o tempo.

Para o estudo da fenomenologia da relaxação das tensões, foram desenvolvidos por inúmeros autores várias equações empíricas, com a finalidade de descrever o comportamento dos materiais submetidos a estes ensaios.

A relação de esforços, assim como, a Fluência lenta são respostas do material que depende do tempo e da deformação resultante. E deste modo, esta deformação está influenciada pelos efeitos de viscosidade. No caso particular da relaxação, o material experimenta variações do esforço em função do tempo, uma vez submetido a certo nível de tensão.

### **2.5.8 Conceitos gerais sobre o alumínio**

O alumínio é um material não ferroso e é dos metais mais abundantes no planeta. Possui uma excelente resistência à corrosão, é leve permite um fácil manuseamento, podendo ser trabalhado de diversas formas.

Quando este material é ligado a outros compostos e sujeito a tratamentos complementares, estes possuem características mecânicas que os tornam aptos a diversas aplicações. É um material reciclável podendo ser reutilizável infinitamente.



**Figura 18-** Perfis de alumínio utilizados em Construção civil (<http://www.directindustry.es/>)

### 2.5.9 Ligas de alumínio

A finalidade das ligas de alumínio é aumentar a resistência mecânica, sem prejuízo das outras propriedades.

O alumínio tem a vantagem de se combinar com outros metais, denominados por elementos de liga. E desta forma conceber ligas, que terão uma combinação específica para cada aplicação destinada. Quando estas ligas são associadas a tratamentos, formam um material incrível para utilização construtiva. É importante referir, que apenas uma só liga não possui todas as propriedades excelentes para a aplicação. É pois, fundamental fazer uma seleção das vantagens e limitações de cada liga e escolher a que melhor se adequa, à função construtiva que se pretende.

A classificação do alumínio e das suas ligas é realizada por um sistema numérico de 4 dígitos deste tipo: 1xxx, dependendo se são para trabalho mecânico ou fundição.

O primeiro dígito varia consoante o elemento da liga principal. O segundo dígito está relacionado com a variação de composição que foi dada à liga, em que a original têm o número igual a zero e as que sofreram alterações são numeradas de 1 a 9. Os últimos dois dígitos são relacionados com o grau de pureza do alumínio dentro da liga, que é diferente para cada tipo de liga e servem apenas para

identificar diferentes ligas de alumínio na série. O "x" na liga representa uma liga que ainda está no estado experimental.

As ligas de alumínio estão agrupadas em 9 séries, conforme **Tabela 7**.

**Tabela 7-** Tabelas da composição das diferentes séries dos alumínio para a deformação plástica ([www.informet.com.br](http://www.informet.com.br))

Série	Elemento(s) de liga principal(is)	Outros elementos de liga
<b>1xxx</b>	Alumínio puro	-
<b>2xxx</b>	Cu	Mg, Li
<b>3xxx</b>	Mn	Mg
<b>4xxx</b>	Si	-
<b>5xxx</b>	Mg	-
<b>6xxx</b>	Mg, Si	-
<b>7xxx</b>	Zn	Cu, Mg, Cr, Zr
<b>8xxx</b>	Li, Sn, Fe, Cu e Mn	-
<b>9xxx</b>	Reservada para uso futuro	

#### 2.5.9.1 Tipos de Têmpera

A têmpera é denominada como estado em que o material permanece após sofrer deformação a frio ou a quente, tratamento térmico ou ambos os processos.

As deformações a frio (NHT) alteram as suas propriedades melhorando as propriedades mecânicas. Os tratamentos térmicos (HT), tanto podem melhorar ou diminuir as suas propriedades mecânicas.

O sistema de identificação das têmperas é usado para todo o tipo de produtos de alumínio e consiste nas utilizações das letras (F, T, H, O) e consequentes subdivisões numéricas constituídas por um ou mais dígitos. Estes números identificam a sequência dos tratamentos básicos, que afetam de modo significativo as características mecânicas do alumínio. Assim as têmperas do tipo F aplicam-se a produtos obtidos por processos de deformação, sem controle especial das condições térmicas nem de endurecimento a frio. Têmperas do tipo O aplicam-se a produtos trabalhados mecanicamente submetidos a recozimento com o objetivo de remover tensões devidas a tratamento mecânicos aumentando a ductilidade. Têmperas do tipo H, endurecido por deformação a frio, aplicam-se a produtos que tenham sido submetidos a recozimento de forma a obter valores intermédios de resistência. Têmperas do tipo T previamente tratado termicamente, aplica-se a produtos tratados para obter têmperas estáveis com ou sem endurecimento a frio e com o objetivo de aumentar a resistência (Campozinhos 2013).

As ligas que sofrem um tratamento térmico com vista a melhorar as suas propriedades são classificadas com a letra T, como se identifica na **Tabela 8**.

**Tabela 8-** Subdivisão da Têmpera

<b>Tipo</b>	<b>Especificação do 1º dígito</b>
<b>T1</b>	Solubilização parcial e envelhecimento natural
<b>T2</b>	Recozimento
<b>T3</b>	Solubilização Total e deformação a frio
<b>T4</b>	Solubilização Total e envelhecimento natural
<b>T5</b>	Apenas envelhecimento artificial
<b>T6</b>	Solubilização total e envelhecimento artificial
<b>T7</b>	Solubilização e estabilização
<b>T8</b>	Solubilização, deformação a frio e envelhecimento artificial
<b>T9</b>	Solubilização, envelhecimento artificial, deformação a frio

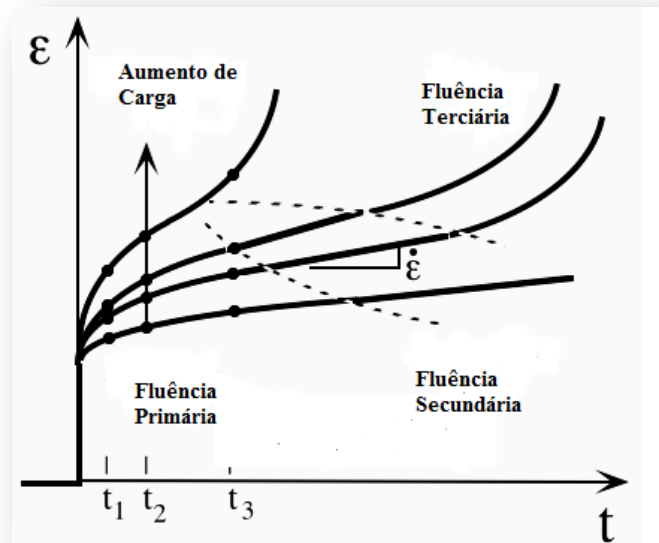
#### **2.5.9.2 Propriedades mecânicas**

O alumínio exibe propriedades mecânicas quando está sujeito a esforços de natureza mecânica. Estas propriedades caracterizam a maior ou menor capacidade que o material possui, para transmitir ou resistir aos esforços que lhe são aplicados. Na caracterização das propriedades mecânicas são efetuados ensaios de provetes selecionados, e que são produtos não acabados. A realização destes ensaios altera as suas condições de funcionalidade, destruindo o material. Sendo as propriedades mecânicas mais importantes: a resistência à tração, tensão de fadiga, dureza e Fluência.

#### **2.5.9.3 Comportamento em Fluência das ligas de alumínio**

A Fluência é a direta manifestação de acumulação de muitos eventos micro plásticos que ocorrem ao longo de um período de tempo (Robinson et al 2002).

Muitas equações empíricas têm sido desenvolvidas e usadas estando limitadas em termos de avaliação das relações entre a temperatura, carga e taxa e Fluência dos metais e ligas. As interpretações destas relações são complicadas pela variação que ocorre durante o primeiro, segundo e terceiro estados de Fluência (ver **Figura 19**).



**Figura 19-** Comportamento da Fluência no alumínio (fonte :www.scielo.br)

Alguns investigadores concordam que esta deformação possa ocorrer tanto nas fronteiras do grão do alumínio como também dentro dos grãos em deformação.

A aplicação de carga exposta a temperatura conduz a uma carga permanente na direção da carga aplicada. Sob condições severas, isto leva a uma acumulação significativa de danos e conseqüentemente rotura final.

A taxa de Fluência é função da aplicação da carga, da temperatura e da resistência a este tipo de deformação. Isto é importante, quando se tratam de materiais usados a elevadas temperaturas. Apesar de a Fluência ser um fenómeno de grande importância na construção, existem poucos estudos para elucidar este mecanismo.

Este fenómeno é mais complexo quando se tratam das ligas de alumínio do que propriamente do alumínio puro. Isto deve-se à instabilidade termodinâmica intrínseca do micro estruturas endurecidas por precipitação nas ligas de alumínio.

De acordo com Robinson et al (2002), o mecanismo de Fluência do alumínio puro e das suas ligas é um assunto com controverso.

Para as ligas que estiveram submetidas a tratamentos térmicos de endurecimento por precipitação, quando sujeitas a regimes de tensão e temperatura, a fluência consiste, num elevado deslize e difusão desenvolvendo uma deslocação na subestrutura que é importante.

Ao contrário do alumínio puro essa deslocação da microestrutura do material, não é uma preocupação tão significativa. A extensão do carregamento e a extensão no começo do terceiro estado, ambos decrescem com o aumento da tensão. Alterações cíclicas da temperatura aumentam a ductilidade (Robinson et al 2002).

#### **2.5.9.4 Fluência do alumínio em condições isotérmicas e submetido a cargas cíclicas**

O comportamento de fluência em condições isotérmicas pode ser alterado, isto é, a carga aplicada sofre variações cíclicas e a temperatura mantém-se constante no tempo.

Muitas investigações foram realizadas acerca deste comportamento em condições de tensão cíclica. Na maioria destas investigações, estas centram-se na questão seguinte: se a fluência provocada a partir deste comportamento, é acelerada ou retardada pela carga aplicada ciclicamente. Sendo que esta carga é simetricamente triangular ou quadrada (Flaig 2000).

A tendência geral é que a fluência acelere quando se registam taxas baixas de temperatura e altas tensões, enquanto a fluência é retardada, quando submetidas altas temperaturas e tensões reduzidas.

## **2.6 Madeira de Eucalipto**

O eucalipto é uma planta proveniente da Austrália, sendo das espécies de madeira mais importantes e com maior taxa de produção. Este género possui um grande potencial como alternativa de produção de madeira, pois o seu crescimento rápido permite uma enorme capacidade produtiva. Contempla uma grande diversidade de espécies.

A madeira de eucalipto é considerada não durável segundo a norma NP EN 350-2, pelo que esta espécie, não deve ser utilizada no exterior, sem tratamento. Mesmo tratada, a madeira de eucalipto é atacada por fungos de podridão mole, devido à sua morfologia complexa que impede a circulação de fluidos no interior das paredes das células (Reimão e Nunes 1989).

O Eucalipto é uma espécie de madeira folhosa, as suas folhas são planas e largas. Este tipo de madeira possui boa aptidão à colagem, mas um deficiente comportamento na pregagem e

aparafusamento, apresentando fendas e rachas, na perfuração. A secagem dos toros é conseguida com algumas dificuldades, sendo morosa. Contém um alto risco, pois pode dar origem a empenos, colapso ou fendimentos.

Segundo a revista Eucalipto (2003) as principais propriedades físicas e mecânicas da madeira que provocam impacto em estruturas são identificadas como: a resistência mecânica, densidade, a estabilidade dimensional e os principais impactos tecnológicos nas características das madeiras.

### **2.6.1 Aspeto Estrutural**

Este material exibe uma cor amarelada, apresentando um abundante cerne com uma cor avermelhada ou por vezes amarelada, no qual o seu contorno é regular.

De acordo com Esteves (2006) a quantidade de cerne existente neste tipo de madeiras é geralmente superior à percentagem do borne. Os poros são muito numerosos e uniformes e de menor calibre junto da medula. Na maioria dos casos as camadas de crescimento são indistintas, sendo a determinação da idade por contagem dos anéis de crescimento difícil devido aos limites imprecisos. O fio é caracterizado por ser em espiral e entrecruzado, no qual as árvores adultas têm geralmente o fio espiral mais acentuado que as árvores mais juvenis. A textura é homogênea e o grão é de grossura média.

### **2.6.2 Constituição anatómica da madeira**

Para uma boa caracterização da madeira com o objetivo de ser utilizada na construção, é necessário um entendimento da forma, organização e dimensões das células que constituem os vários tecidos deste material. Esta necessidade de conhecimento é devido aos seus constituintes estarem associados às demais propriedades da madeira.

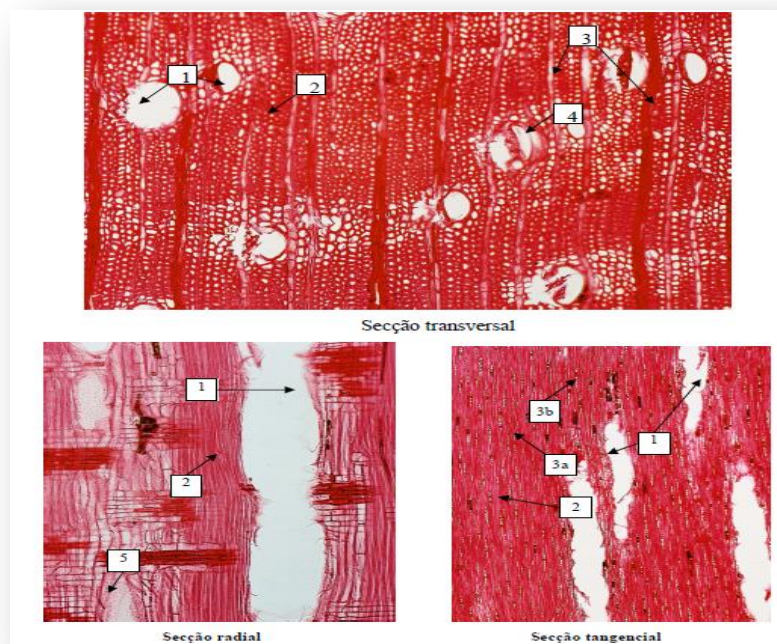
As espécies de eucalipto caracterizam-se por apresentar uma estrutura anatómica muito semelhante, tornado difícil a distinção de espécies através da sua constituição anatómica.

É importante avaliar a variação quantitativa destes elementos no sentido radial, pois estes podem estar associados à formação de madeira com propriedades estáveis, o que é o desejável para a maioria das formas de utilização do material.

A porosidade da madeira de eucalipto é difusa com tendência para semi - difusa, com vasos isolados, ocasionalmente agrupados, de disposição oblíqua e de paredes delgadas (Esteves 2006).

As fibras libriformes são de forma poligonal ligeiramente ondulada e entrelaçada, existindo uma variação de comprimento.

Como se pode observar na **Figura 20**, este material possui um parênquima axial que se denomina de paratraqueal vasicêntrico, aliforme e por vezes confluyente segundo a distribuição oblíqua dos vasos (Carvalho 1997 em Esteves 2006).



**Figura 20**-Secções transversal, radial e tangencial de um provete de madeira de *Eucalyptus globulus*. Vaso(1), fibra(2), raio unisseriado(3a), raio multisseriado(3b), parênquima axial (4), traqueído marginal (5) (adaptado de Esteves 2006)

### 2.6.3 Propriedades físicas e mecânicas

A madeira de eucalipto entre outros géneros pode ser considerada um excelente material estrutural, sendo reconhecida pela sua resistência mecânica elevada e baixa densidade, quando comparado com outros materiais já relatados anteriormente (aço e alumínio).

A utilização deste material de uma forma racional, económica e segura na construção, é possível, desde que se conheça a variabilidade e dispersão que definem as propriedades que o material possui. São descritas propriedades físicas e mecânicas consideradas mais importantes nos itens seguintes.

### 2.6.3.1 Resistência mecânica

A madeira de eucalipto apresenta uma variação nas suas propriedades mecânicas. Estas variam com a idade da árvore.

Para o conhecimento perfeito destas características, as mesmas são adquiridas através de ensaios de compressão, flexão, tração e entre outros. Contudo a flexão estática é o ensaio mais corrente, por refletir bem, o comportamento da madeira em obra.

A resistência é determinada convencionalmente, pela máxima tensão que pode ser aplicada a provetes de eucalipto para ensaios. A tensão máxima é definida aquando do aparecimento de fenómenos particulares do comportamento do material (Rodrigues, 2002). A rigidez é também um aspeto importante do material e é expressa através do módulo de elasticidade, determinado na fase de comportamento elástico-linear.

Os resultados dos ensaios efetuados nos Laboratórios de Madeiras e Estruturas de Madeiras (LaMEN) da Escola de Engenharia de São Carlos –USP, podem ser observados na **Tabela 9** para 15 espécies de madeira de eucalipto, apresentado os valores médios das suas propriedades mecânicas.

**Tabela 9**-Valores médios de propriedades da madeira de 15 espécies de Eucalipto (adaptado de Rodrigues 2002).

Nome Científico	DAP <sub>(12%)</sub>	$F_{c0}$	$F_v$	$E_{c0}$	n
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	899	48	9	13286	18
<i>Eucalyptus alba</i>	705	47,3	9,5	13409	24
<i>Eucalyptus citriodora</i>	999	62	10,7	18421	68
<i>Eucalyptus cloeziana</i>	822	51,8	10,5	13963	21
<i>Eucalyptus dunni</i>	690	48,9	9,8	18029	15
<i>Eucalyptus grandis</i>	640	40,3	7	12813	103
<i>Eucalyptus maculata</i>	931	63,5	10,6	18099	53
<i>Eucalyptus maidene</i>	924	48,3	10,3	14431	10
<i>Eucalyptus microcorys</i>	929	54,9	10,3	16782	31
<i>Eucalyptus paniculata</i>	1087	72,7	12,4	19881	29
<i>Eucalyptus propinqua</i>	952	51,6	9,7	15561	63
<i>Eucalyptus punctata</i>	948	78,5	12,9	19360	70
<i>Eucalyptus saligna</i>	731	46,8	8,2	14933	67
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	899	57,7	9,7	17198	29
<i>Eucalyptus globulus</i>	425	16,5	18,4	14800	22
<i>Eucalyptus urophylla</i>	739	46	8,3	13166	86

**Legenda:**

DOP (12 %)- massa específica aparente a 12 % de humidade ( $\text{kg/m}^3$ );

$F_c$ -resistência à compressão paralela às fibras (MPa);

$F_v$ - resistência ao cisalhamento (MPa);

$E_{c0}$ - módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralela às fibras (MPa);

n- número de corpos de prova ensaiados.

**2.6.3.1.1 Módulo de elasticidade**

O módulo de elasticidade é essencial para a caracterização de um material.

Entende-se como módulo de elasticidade, a razão entre a tensão e a deformação na direção da carga aplicada, sendo esta, a máxima tensão que o material suporta sem sofrer deformação. Ou seja, recupera a sua forma e dimensões iniciais, quando a tensão deixa de estar sujeita a uma ação exterior. Pode-se afirmar que, o módulo de elasticidade de um material é a sua medida de rigidez.

A temperatura influencia este parâmetro na medida em que, quanto maior for a temperatura, menor será o módulo de elasticidade.

Em geral, todos os materiais apresentam elasticidade e em particular a madeira. Sendo, um elemento importante, existe a necessidade de quantificá-lo matematicamente, através de um módulo. O MOE permite calcular a deformação esperada no regime elástico para certas solicitações exteriores.

De acordo com Santos (2009), teoricamente o módulo de elasticidade define-se como a relação entre a tensão e a deformação unitária ( $\Delta l/l_0$ ) que lhe corresponde dentro da chamada zona de proporcionalidade.

O módulo de elasticidade pode ser quantificado em vários tipos de esforços tais como: flexão, compressão e tração em distintas direções. Contudo o mais utilizado é o módulo de elasticidade em flexão, uma vez que este é o que tem efeitos mais visíveis e importantes no comportamento do material. O módulo de elasticidade à flexão é determinado pelo ensaio de flexão estática (assim chamado por ser realizado com pequenos acréscimos de carga). Registam-se ao longo do ensaio, em

intervalos pequenos, os pares de valores correspondentes à carga aplicada e correspondente flecha (Santos 2009).

Segundo a norma NBR 7190, para as espécies eucalipto o seu módulo de elasticidade estático médio é de 13.30 MPa.

### **2.6.3.2 Massa volúmica/densidade**

A massa volúmica indica a massa contida na unidade de volume. (Santos 2009). É um bom índice para qualificar a madeira pois correlaciona-se com outras características. Em média a massa volúmica do eucalipto para humidades de equilíbrio de 12 % é de 850 kg.m<sup>3</sup> (Carvalho 1997). E segundo a norma *NP EN 350-2* a densidade varia entre 700- 800 kg.m<sup>3</sup>.

A madeira proveniente de árvores adultas é mais densa e mais dura que as de árvores mais novas. De acordo com Santos (2009) a densidade varia de espécie para espécie. A madeira dos ramos é normalmente mais densa que a do tronco, e a do cerne mais densa que a do borne.

Segundo Shioyoma (1990), a densidade é uma quantificação direta do material lenhoso por unidade de volume, estando relacionado com muitas propriedades e características tecnológicas.

Tomazello Filho (1985) verificou em provetes de madeira de *Eucalyptus grandis*, que na região central do tronco apresentava densidades mais baixas próximo da medula e menores variações ao longo de um raio. Com tendência à formação de anéis de crescimento mais longos próximo da periferia. Consequentemente ocorreriam grandes alterações na densidade sobretudo na direção radial da árvore.

Perante todas as observações, pode-se afirmar que a densidade é função da idade, mas não só, e aumenta rapidamente durante o período juvenil e mais lentamente até atingir a maturidade. E, nesta fase mantém-se constante.

### 3 Material e Método

#### 3.1 Introdução

O estudo consistiu na investigação do comportamento em Fluência para dois materiais diferentes. Os materiais utilizados foram: Madeira de Eucalipto da espécie *Eucalyptus globulus* Labill e alumínio em secção tubular.

#### 3.2 Madeira de eucalipto

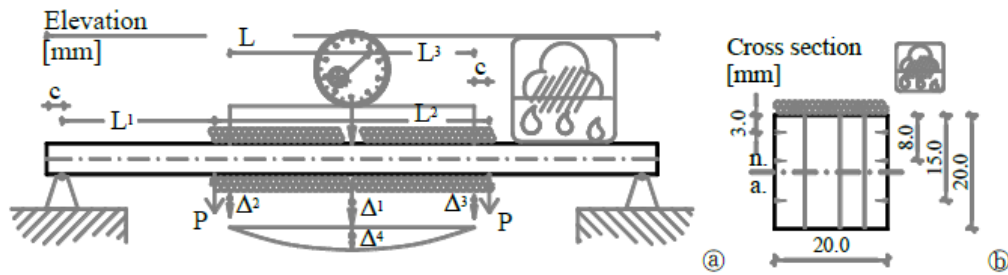
Foi realizado um ensaio à flexão em seis provetes paralelepípedicos, à escala 1:10, de dimensões 20 x 20 x 400 mm<sup>3</sup>. A temperatura do ensaio foi mantida constante, em cerca de 21°C (± 2°C), e a humidade relativa foi de 35 % (± 5°C). A distância entre os apoios foi suficiente para garantir um nível de tensão de 12 Nmm<sup>-2</sup> (appx).

A deformação em flexão foi medida a partir do topo da superfície do provete a meio vão entre a separação dos apoios, cujo comprimento é de 160 mm de vão. O LVDT foi utilizado para medir a deformação e este foi colocado igualmente a meio vão. Este procedimento efetuou-se da mesma forma para os seis provetes.

A **Figura 21 a)** apresenta a disposição da experiência efetuada para os provetes com dimensões de 20 x 20 x 400 mm<sup>3</sup> (radial, tangencial e longitudinal, respetivamente), de acordo com a norma EN 408. Na mesma Figura o deslocamento pode se obtido pela expressão (29). As linhas cinzentas interiores verticais (ver **Figura 21 b)**), são os anéis de crescimento anual, que na seção foram selecionados paralelos às faces e dispostos na vertical.

$$\Delta_4 = \frac{3PL_3^2L_1}{2bh^3E} \quad (29)$$

Os provetes de eucalipto foram carregados na superfície radial e na posição horizontal, em anéis de aço com 4 mm de espessura. Foram tomadas medidas para minimizar o impacto devido à aplicação lenta dos “pesos mortos”. A carga foi aplicada gentilmente durante, aproximadamente, 10 segundos.



**Figura 21-** (a) Esquema do carregamento do ensaio realizado e arranjo da molhagem. (b)- Profundidades, a partir da superfície molhada radial (3,8 e 15 mm) superior, dos pontos de medida do teor de umidade na secção transversal do provete (não foram avaliados neste trabalho).

A flecha de deformação foi avaliada em intervalos pré-estabelecidos. A duração do ensaio foi de 63 dias.

Utilizou-se um equipamento chamado de Data Taker DT 515 série 3 ([www.datataker.com](http://www.datataker.com), com 9 canais digitais com 0.3 hz de datas de aquisição), agregado com 8 transformadores diferenciais Variáveis lineares) e com 0.001 mm de precisão e termo higrometria (CPC  $\frac{1}{4}$ - TH nr. 67226) alimentado com ( $\pm$ ) 24 volts de tensão tendo sido utilizados por um período de 1500 horas. Os LVDTs medem a curvatura entre os suportes da carga ( $\Delta_4$  - ver equação (29)).

Os parâmetros, de temperatura, umidade relativa e deslocamentos medidos com os LVDTs, foram registados num *software* através de um *PC*. Este registo foi efetuado em intervalos de 5 segundos (para as primeiras 4 horas do início do ensaio) e em intervalos de 30 minutos até ao final do ensaio.

O processo de molhagem do provete foi iniciado após sete dias (ao fim da primeira semana de carregamento) e foi repetido a cada semana, até completar 8 ciclos de molhagem, num total de 63 dias.

### 3.3 Alumínio

Para a realização dos ensaios efetuados foram utilizados provetes de alumínio em perfil tubular quadrado, de escala reduzida com as seguintes dimensões: 20 x 20 x 400 mm<sup>3</sup> e espessura de 1,6 mm.

As experiências realizadas para avaliação do comportamento de Fluência em flexão, consistiram em ensaios de flexão em quatro pontos. Como os ensaios eram exploratórios, a sua duração foi de curto prazo, aproximadamente um mês (29 dias).

A escolha da realização de ensaios em flexão prende-se com o facto de ser um caso que abrange a maioria de situações de carregamento possíveis numa estrutura. Que, no caso de outros tipos de ensaios como: tração e compressão, são menos frequentes e também de maior dificuldade na sua realização.

### 3.3.1 Metodologia do ensaio de Fluência

O ensaio consiste na aplicação de uma carga de 16 kg (160 N) em determinados pontos da barra, medindo-se o valor da carga, bem como a deformação máxima. Existem dois tipos principais: ensaio de flexão em três pontos e ensaio de flexão em quatro pontos. Este último foi o tipo de ensaio escolhido para o trabalho aqui apresentado (EN408).

Previamente à realização do ensaio de flexão, foi necessário conhecer as propriedades da madeira de eucalipto, para prever o seu comportamento quando este material é submetido ao carregamento durante a sua fase elástica. Foram utilizadas duas mesas com função de apoio e onde os perfis de alumínio (e os provetes de madeira) assentam. A aplicação das cargas foi efetuada com “pesos mortos” no valor de 2x160 N (2x16kg) nos primeiros 8 dias.

A flecha de deformação ao longo do tempo foi avaliada através de um defletómetro analógico e por um período de 30 dias. Durante o ensaio houve oscilações na temperatura. Nos primeiros 8 dias foi aplicada uma carga de 160 N, de acordo com a **Figura 21**, sendo a temperatura ambiente de 21°C ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ). Após 8 dias foi aplicada uma carga de 320 N (4x16kg) e a temperatura continuou constante para um valor de 21 °C ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ) durante 12 dias.

Por último, a partir do 20º dia e até ao final do teste (30º dia), a carga continuou constante 320 N (4x16kg) e a temperatura subiu para 45 °C ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ). A humidade relativa ambiente manteve-se entre 50% a 55 %.

### 3.4 Ferramentas estatísticas

Os dados dos ensaios de Fluência efetuados com provetes de madeira de Eucalipto foram tratados estatisticamente com o *software* Origin<sup>®</sup>. Foram modeladas e ajustadas as curvas de deformação em Fluência através de equações empíricas (ver **Tabela 1**), para ser possível extrapolar o seu comportamento. Realizou-se o ajuste de cada um destes modelos, em função da curva de deformação obtida no ensaio. Este ajuste é efetuado pelo próprio *software*, que define a melhor

curva, com menor erro associada, criando uma relação entre as variáveis dependentes e as independentes.

As equações empíricas permitem extrapolar o valor da Fluência, prevendo a deformação para longos períodos tais: 1, 10 ou 50 anos, para estruturas provisórias, temporárias e definitivas, respetivamente.

É importante referir que todo o tipo de extrapolação tem incerteza associada, pois é realizada fora do âmbito dos dados (condições de realização do ensaio) e a mesma relação pode não se verificar quando esta extrapolação é para tempos diferentes.

Após o ajuste das curvas, o *software Origin*<sup>®</sup> permite obter os parâmetros (constituintes dos modelos, ver **Tabela 1**) sendo possível seguidamente prever ou extrapolar resultados. O ajuste das curvas pode ser medido ou avaliado por intermédio de variáveis estatísticas como o  $\chi^2$  reduzido e o  $R^2$  ajustado. Ou seja, por outras palavras, através destes dados estatísticos é possível verificar se o ajuste foi ou não adequado.

Ao realizar a curva não linear ajustada um processo iterativo é empregue, minimizando o valor reduzido de  $\chi^2$  e por sua vez aumentando o valor de  $R^2$ , para se obter os valores dos parâmetros ótimos. Contudo, uma melhor medida para avaliar a qualidade do ajuste é  $R^2$  ajustado, ainda que o  $\chi^2$  seja uma quantidade minimizada no processo de iteração. Desta forma utiliza-se o  $R^2$  ajustado para a escolha da melhor equação empírica modelada.

#### 3.4.1 Parâmetro estatístico $R^2$

O  $R^2$  ou o chamado coeficiente de determinação na regressão linear é uma medida estatística que fornece informações sobre a qualidade do ajuste de um modelo. Quanto mais próximo for  $R^2$  da unidade, melhor será o ajuste. No entanto, por vezes, este valor próximo da unidade (1) não significa que é o melhor ajuste, pois este pode não tem em conta os graus de liberdade que afetam esse valor negativamente. O resultado dos graus de liberdade denominados por *dof*, são o número de valores no cálculo final de uma estatística livre de variar e são apresentados no *Origin*<sup>®</sup> na tabela Anova apresentada pelo *software* como resultante da análise efetuada.

O valor de  $R^2$  ajustado será uma melhor medida da qualidade do ajuste, uma vez que já está penalizada pelos graus de liberdade.

$$R^2 = \frac{TSS - RSS}{TSS} = 1 - \frac{RSS}{TSS} \quad (30)$$

Onde TSS é a soma total do quadrado (R) e RSS é a soma residual do quadrado (R).

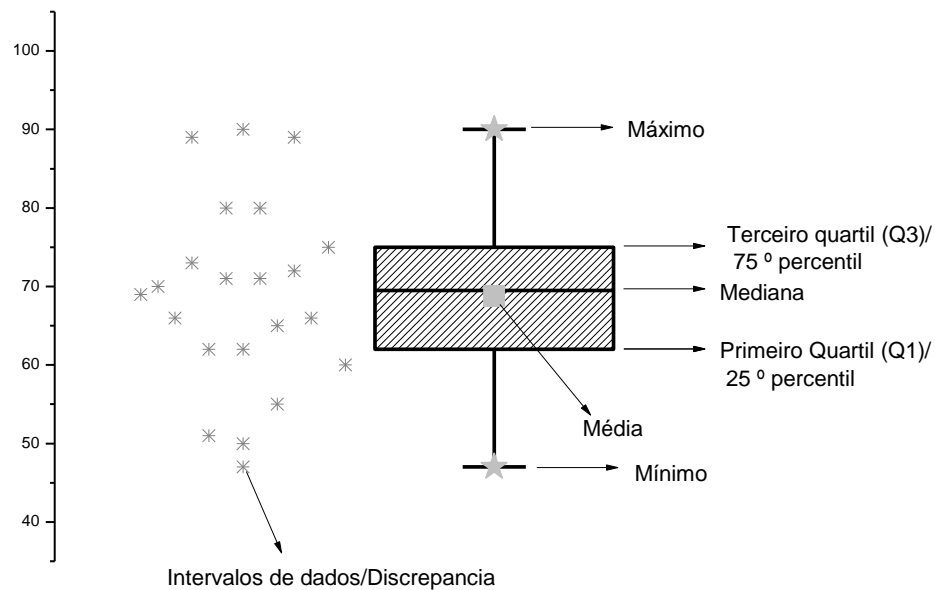
$$R^2_{ajustado} = 1 - \frac{\frac{RSS}{df_{Error}}}{\frac{TSS}{df_{total}}} \quad (31)$$

Estatisticamente é uma mais valia comparar dois ajustes através destes parâmetros do que um ajuste em particular.

### 3.4.2 *Box plot*

O *box plot* é um tipo de gráfico que possibilita representar a distribuição de um conjunto de dados, ver **Figura 22**. O gráfico pode apresentar diferentes medidas estatísticas, como o valor mínimo, primeiro quartil, mediana, terceiro quartil e valor máximo. O *box plot* é formado por uma caixa que contém o primeiro quartil até ao terceiro quartil e sobre esta, apresenta uma linha na posição da mediana. Adicionalmente pode-se acrescentar uma linha paralela à linha da mediana, para designar a média.

As posições relacionadas com a mediana e os quartis permitem ter a noção de simetria e do tamanho das caudas de distribuição dos dados a tratar. Quando a distribuição de dados é simétrica a linha que representa a mediana está localizada no centro do retângulo (caixa ou *box* na literatura inglesa) e as duas linhas que surgem da extremidade serão aproximadamente do mesmo comprimento. Quando a distribuição dos dados é simétrica à direita, a linha que representa a mediana está mais próxima do quartil Q1 do que do quartil Q3, caso contrário, se a distribuição de dados é assimétrica esquerda, linha que representa a mediana está mais próxima do quartil Q3.



**Figura 22** - Exemplo de um gráfico *box plot*.

O box plot é pois um bom indicador a ser utilizado para a comparação visual dos dados entre os vários modelos. Assim coloca-se os vários *box plot* lado a lado e avalia-se a variabilidade entre eles, a mediana e a diferença entre os quartis (Q3-Q1).

### 3.4.3 Medidas de posição

As medidas de posição utilizadas são a média e a mediana. A mediana é o ponto central das observações quando estas estão colocadas por ordem crescente. É uma medida de localização do centro da distribuição dos dados, isto é, refere-se ao intervalo que contém os 50 % centrais dos dados (entre Q1 e Q3). A média é a soma das observações dividida pelo seu número.

Como medida de posição, a mediana é mais robusta em relação à média pois não é tão sensível aos dados.

### 3.4.4 Medidas de dispersão

O desvio padrão, juntamente com a variância, são as medidas de dispersão utilizadas. Somente com a observação das medidas de posição, não é possível obter a informação na totalidade. A indicação sobre a dispersão das observações é de importância elevada. O desvio padrão revela qual é a dispersão que a provete apresenta em relação à média.

Um baixo valor do desvio padrão indica que os dados tendem a estar próximos da média. Por outro lado, um elevado valor desta medida indica que os dados estão dispersos por uma alargada gama de valores.

#### **3.4.5 Outras medidas**

Os quartis são valores dados a partir do conjunto de observações ordenado em ordem crescente que dividem a distribuição em quatro partes iguais. O primeiro quartil Q1 é o número que deixa 25 % das observações abaixo e 75 % acima, enquanto o terceiro quartil Q3 deixa 75 % das observações abaixo e 25 % acima.

## 4 Resultados e Discussão

### 4.1 Madeira de eucalipto

#### 4.1.1 Modelos matemáticos

O ajuste de curvas é um método que permite desenvolver uma curva que se ajusta a um conjunto de pontos, salvaguardando o cumprimento dos parâmetros viscoelásticos associados a cada modelo.

A necessidade de se efetuar o estudo estatístico dos dados experimentais, prende-se com o facto de se encontrar o modelo que melhor se adapta ao conjunto de pontos representados pela curva da deformação relativa (ver definição, item 2.1).

As funções de ajuste de curvas são bastante úteis para que, a partir de dados conhecidos (curva de deformação relativa), se extrapolem valores de deformações. Assim, podemos prever ou extrapolar o comportamento em Fluência para outros intervalos de tempo.

Existem inúmeros modelos empíricos para o ajuste de curvas e conseqüentemente previsão da deformação relativa (ver **Tabela 1**), porém os modelos empíricos apresentados por Bodig, Jayne (1982) em Lopes (2013) são os mais utilizados.

Bodig, Jayne (1982) afirmam que os modelos empíricos demonstrados na **Tabela 1** podem ser utilizados para a representação da deformação por Fluência, bastando encontrar os parâmetros viscoelásticos experimentalmente.

#### 4.1.2 Modelo parabólico

O modelo parabólico é dado pela equação (32).

$$\varepsilon(t) = \beta_0 + \beta_1 \times t + \beta_2 t^2 \quad (32)$$

Em que,  $\varepsilon(t)$  é a deformação primária total;  $\beta_0$  é o coeficiente de deformação unitária inicial;  $\beta_1$  e  $\beta_2$  são os coeficientes da deformação por Fluência primária e  $t$  é a variável tempo (podendo ser em dias, anos, horas ou minutos).

Neste modelo de ajuste, devem ser encontrados os coeficientes da deformação e o tempo definido. Em cada ponto, intervalo de tempo definido, é encontrada a deformação relativa (ver item 2.1) proveniente da reta de ajuste e a curva de deformação inicial do ensaio.

#### 4.1.3 Modelo Lei de 1/3 (Andrade )

O modelo Lei de 1 /3 é dado pela equação (33).

$$\varepsilon(t) = \beta_0 \times \left[ 1 + \beta_1 \times t^{\frac{1}{3}} \right] \times e^{t\beta_2} \quad (33)$$

Em que,  $\varepsilon(t)$  é a deformação primária total;  $\beta_0$  é o coeficiente de deformação unitária inicial;  $\beta_1$  e  $\beta_2$  são os coeficientes da deformação por Fluência primária e  $t$  é a variável tempo (podendo ser em dias, anos, horas ou minutos).

#### 4.1.4 Modelo Logaritmico

O modelo Logaritmico é dado pela equação (34).

$$\varepsilon(t) = \beta_0 + \beta_1 \times \log(t) \quad (34)$$

Em que,  $\varepsilon(t)$  é a deformação primária total,  $\beta_0$  é o coeficiente de deformação unitária inicial,  $\beta_1$  é o coeficiente da deformação por Fluência primária e secundária e  $t$  é a variável tempo (podendo ser em dias, anos, horas ou minutos).

#### 4.1.5 Modelo Polinomial

O modelo Polinomial é dado pela equação (35).

$$\varepsilon(t) = \beta_0 + \beta_2 \times t^{\beta_2} + \beta_3 \times t^{\beta_4} \quad (35)$$

Em que,  $\varepsilon(t)$  é a deformação primária total;  $\beta_0$  é o coeficiente de deformação unitária inicial;  $\beta_1$  e  $\beta_2$ ,  $\beta_3$  e  $\beta_4$  são os coeficientes da deformação por Fluência primária e secundária; e  $t$  é a variável tempo (podendo ser em dias, anos, horas ou minutos).

#### 4.1.6 Modelo Seno Hiperbólico

O modelo Seno hiperbolico é dado pela equação (36).

$$\varepsilon(t) = \beta_0 + \beta_1 \times \sinh \beta_2 \times t^{\beta_3} \quad (36)$$

Em que,  $\varepsilon(t)$  é a deformação primária total;  $\beta_0$  é o coeficiente de deformação unitária inicial;  $\beta_1$  e  $\beta_2$  são os coeficientes da deformação por Fluência primária e secundária;  $t$  é a variável tempo (podendo ser em dias, anos, horas ou minutos).

#### 4.1.7 Modelo De Lacombe

O modelo de Lacombe é dado pela equação (37).

$$\varepsilon(t) = \beta_0 + \beta_1 \times t^{\frac{1}{\beta_2}} + \beta_3 \times t^{\frac{2}{\beta_2}} + \beta_4 \times t^{\frac{3}{\beta_2}} \quad (37)$$

Em que,  $\varepsilon(t)$  é a deformação primária total,  $\beta_0$  é o coeficiente de deformação unitária inicial,  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  e  $\beta_4$  são os coeficientes da deformação por Fluência primária, secundária e parte terciária e ainda,  $t$  é a variável tempo (podendo ser em dias, anos, horas ou minutos).

### 4.2 Considerações sobre o ajuste dos modelos às curvas experimentais

Na realização do ajuste das curvas, um processo iterativo foi empregue, em busca de um ótimo ajuste.

O  $R^2$  mais próximo da unidade é o melhor ajuste. Isso significa que a diferença existente entre os dados observados e os dados ajustados é consistente com a variância do erro. É necessário algum cuidado na escolha dos parâmetros a introduzir, pois parâmetros que sejam pouco explicativos e sem coerência podem influenciar negativamente esta medida. Para combater esta tendência pode ser utilizado o  $R^2$  ajustado.

Existe outra medida estatística que quantifica o ajuste do modelo. Este é chamado de chi-quadrado,  $\chi^2$ . Serve para avaliar quantitativamente a relação entre o resultado de uma experiência e a

distribuição esperada. Por outras palavras, fornece a certeza de que os resultados observados podem ser aceites ou não. Um valor de  $\chi^2$  muito pequeno significa que os resultados observados são muito próximos dos esperados. Se o valor desta estatística for alta, a diferença entre os resultados esperados e observados é igualmente alta.

Procuram-se modelos que possuam o mínimo possível de parâmetros a serem estimados e que esclareça o comportamento da variável resposta (deformação). Resultados do ajuste efetuado a partir dos resultados de Fluência aos seis provetes de Madeira.

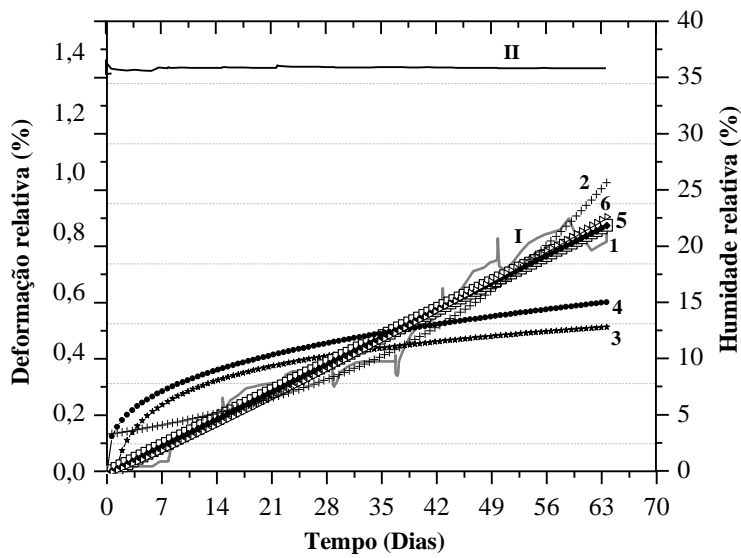
#### **4.3 Resultados do ajuste efetuado a partir dos resultados de Fluência aos seis provetes de Madeira**

Como já referido anteriormente no item 3 deste trabalho, foram estudados seis provetes de madeira de Eucaplito espécie *Eucalyptus globulus* Labill e a deformação relativa encontrada por estes provetes foi ajustada através de seis modelos de Fluência, ver **Tabela 1**.

Nos ajustes realizados foi utilizado o conceito de deformação relativa, pois para o âmbito deste trabalho apenas interessa a comparação do incremento da deformação por Fluência. Desta forma, dividiu-se a deformação em qualquer instante pela deformação instantânea ( ver item 2.1).

Assim e de acordo com a **Tabela 1**, o parâmetro  $\beta_0$  é considerado igual a um (1), uma vez que este traduz a deformação inicial. No entanto, já não se considerou da mesma forma para a segunda expressão da **Tabela 1** (Lei de 1/3-(2)). Pois este parâmetro afeta significativamente a expressão na totalidade. Se assim não fosse não se conseguiria prever o comportamento de deformação relativa com esta equação(Lei-1/3-(2)).

A partir da comparação dos ajustes aos diferentes modelos de Fluência, para as vários provetes, um dos objetivos deste trabalho foi a partir dessa comparação entre modelos, verificar e escolher quais destes se ajustavam melhor aos respetivos provetes de madeira de eucalipto. A nível individual e em termos médios. Na **Figura 23** e **Figura 24** apresentam-se os respetivos resultados destes ajustes.



**Figura 23-**Ajuste dos seis modelos de Fluência (ver **Tabela 1**) à curva de deformação relativa em Fluência dos provetes de Eucalipto em temperatura  $\pm 20$  °C; ① provete 1, ② provete 2 e ③ provete 3.

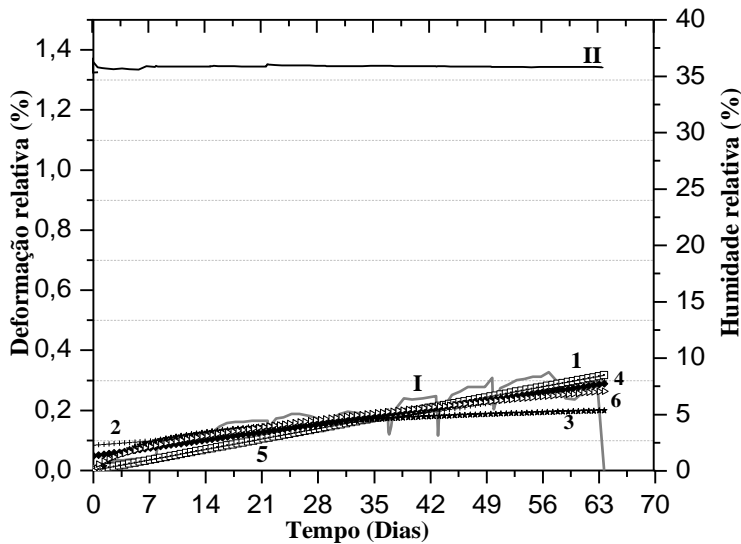
**Legenda:**

Modelo:

- (1)- Parabólico;
- (2)- Lei 1/3(lei de Andrade);
- (3)- Logaritmo;
- (4)- Polinomial;
- (5)- Seno Hiperbólico;
- (6)- De Lacombe;

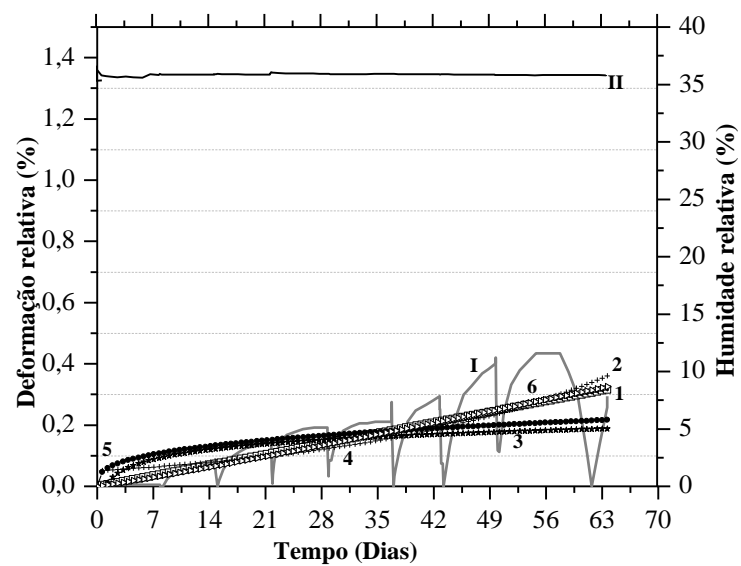
(I)- Deformação relativa da provete;

(II)- Humidade Relativa



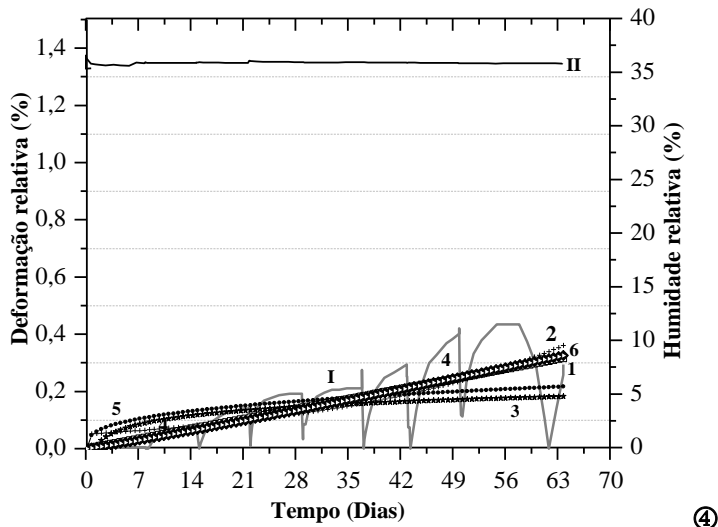
①

②

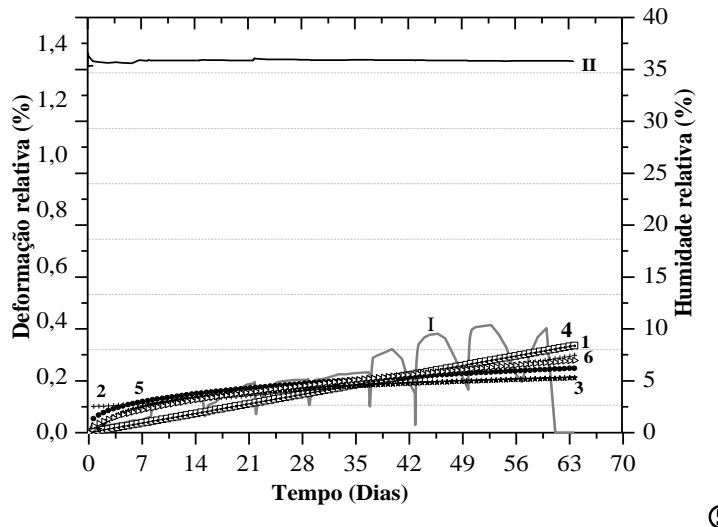


③

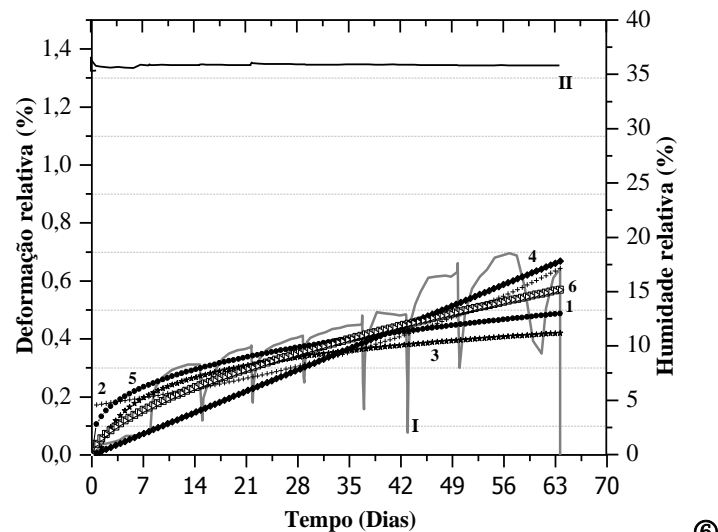
- Deformação relativa (I)
- Modelo Parabólico (1)
- +— Modelo Lei 1/3 (2)
- ★— Modelo Logaritmo (3)
- ◆— Modelo Polinomial (4)
- Modelo Seno Hiperbólico (5)
- △— Modelo De Lacombe (6)



④



⑤



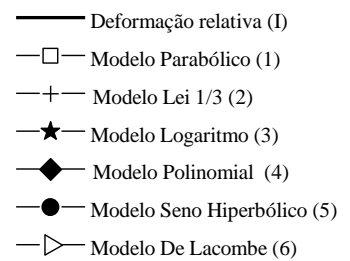
⑥

**Figura 24-** Ajuste dos seis modelos de Fluência (ver **Tabela 1**) à curva de deformação relativa em Fluência dos provetes de Eucalipto em temperatura  $\pm 20$  °C, ④ provete 4, ⑤ provete 5 e ⑥ provete 6.

**Legenda:**

Modelo:

- (1)- Parabólico;
- (2)- Lei 1/3 (Lei de Andrade);
- (3)- Logaritmo;
- (4)- Polinomial;
- (5)- Seno Hiperbólico;
- (6)- De Lacombe;
- (I)- Deformação relativa da provete;
- (II)- Humidade Relativa



Na **Tabela 10** apresentam-se os diferentes modelos, para cada um dos provetes de eucalipto submetidos ao ensaio de Fluência mecânica sortivo (sob o efeito de molhagem e secagem). Da análise da **Figura 23** ① e a **Tabela 10**, os modelos que definem o melhor ajuste em relação à deformação por Fluência são: o modelo Parabólico – (1); Polinomial – (4); e De Lacombe – (6). Estes apresentam resultados de  $R^2$  ajustado mais próximos da unidade. Contrariamente aos anteriores, o modelo Logarítmico não corresponde da melhor forma ao ajuste, o seu  $R^2$  é igual 0,29, muito inferior à unidade.

Em relação à medida estatística  $\chi^2$ , esta indicou que para todos os modelos havia evidência da associação entre as variáveis tempo e deformação. Uma vez que todos os valores de  $\chi^2$  são inferiores a 0,05.

**Tabela 10-** Parâmetros dos diferentes modelos (ver **Tabela 1**) e resultados estatísticos -proвете 1

Modelo	Coeficientes constituintes dos modelos de Fluência e variáveis estatísticas						
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\chi^2$ Ajust.	$R^2$ Ajust.
1-Parabólico	1,00	0,01	1,00	-	-	3E-3	0,95
2-Lei 1/3	0,06	1,00	0,03	-	-	6E-3	0,90
3-Logaritmo	1,00	0,27	-	-	-	0,04	0,29
4-Polinomial	1,00	-	1,00	0,01	1,00	3E-3	0,95
5-Seno Hiperbólico	1,00	1,00	0,14	0,33	0,00	0,02	0,64
6-De Lacombe	1,00	-	2,73	0,00	9E-3	2E-3	0,95

Segundo a **Figura 23** ② e a **Tabela 11**, os modelos que descrevem o melhor ajuste à deformação serão: Polinomial- (4) e De Lacombe- (6). Apesar de que, neste provete os modelos descreveram em geral um pior ajuste que o anterior. Sendo que o valor máximo de  $R^2$  ajustado foi de 0,69. O pior ajuste demonstrado, mantém-se o modelo Logaritmo- (3).

Em relação à medida estatística  $\chi^2$  esta indicou que para todos os modelos havia evidência da associação entre as variáveis tempo e deformação, uma vez que todos os valores de  $\chi^2$  são inferiores a 0,05.

**Tabela 11-** Parâmetros dos diferentes modelos (ver **Tabela 1**) e resultados estatísticos – provete 2

Modelo	Coeficientes constituintes dos modelos de Fluência e variáveis estatísticas						
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\chi^2$ Ajust.	$R^2$ Ajust.
1-Parabólico	1,00	0,04	1,00	-	-	3E-3	0,55
2-Lei 1/3	0,04	1,00	0,02	-	-	3E-3	0,54
3-Logaritmo	1,00	0,11	-	-	-	6E-3	0,17
4-Polinomial	1,00	3E-3	1,00	0,05	-	3E-3	0,63
5-Seno Hiperbólico	1,00	1,00	5E-3	1,00	-	3E-3	0,55
6-De Lacombe	1,00	-	5,50	-	0,02	2E-3	0,69

Da **Figura 23** ③ e da **Tabela 12**, os modelos que expressam um melhor ajuste são: o Parabólico- (1), Polinomial- (4) e De Lacombe- (6). Não se pode considerar que o modelo- (6) seja um bom ajuste, visto que o valor máximo de  $R^2$  ajustado foi de 0.56, ainda afastado da unidade como se espera. O pior ajuste encontrado foi novamente o modelo Logaritmo-3. E o valor de  $R^2$  ajustado foi de 0,21.

Em relação à medida estatística  $\chi^2$  esta indicou que para todos os modelos havia evidência da associação entre as variáveis tempo e deformação. Uma vez que todos os valores de  $\chi^2$  são inferiores a 0,05.

**Tabela 12-** Parâmetros dos diferentes modelos (ver **Tabela 1**) e resultados estatísticos - provete 3

Modelo	Coeficientes constituintes dos modelos de Fluência e variáveis estatísticas						
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\chi^2$ Ajust.	$R^2$ Ajust.
1-Parabólico	1,00	5E-3	1,00	-	-	7E-3	0,57
2-Lei 1/3	0,02	1,00	0,03	-	-	8E-3	0,50
3-Logaritmo	1,00	0,10	-	-	-	0,01	0,21
4-Polinomial	1,00	5E-3	1,00	-	-	7E-3	0,56
5-Seno Hiperbólico	1,00	0,04	1,00	0,33	-	0,01	0,38
6-De Lacombe	1,00	-	2,76	-	-	7E-3	0,56

Da análise da **Figura 24** ④ e da **Tabela 13**, os modelos que expressam um melhor ajuste são: o Parabólico- (1), Polinomial- (4) e De Lacombe- (6). Não se pode considerar que seja um bom ajuste visto que o valor máximo de  $R^2$  ajustado foi de 0,57 (modelo De Lacombe- (6)) este valor está afastado da unidade como se espera. O pior ajuste encontrado foi novamente o modelo Logaritmo- (3). E o valor de  $R^2$  ajustado foi de 0,16.

Em relação à medida estatística  $\chi^2$  esta indicou que para todos os modelos havia evidência da associação entre as variáveis tempo e deformação. Uma vez que todos os valores de  $\chi^2$  são inferiores a 0,05.

**Tabela 13-** Parâmetros dos diferentes modelos (ver **Tabela 1**) e resultados estatísticos - provete 4

	Coeficientes constituintes dos modelos de Fluência e variáveis estatísticas						
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\chi^2$ Ajust.	$R^2$ Ajust.
1-Parabólico	1,00	5E-3	1,00	-	-	7E-3	0,57
2-Lei 1/3	0,02	1,00	0,03	-	-	8E-3	0,50
3-Logaritmo	1,00	0,10	-	-	-	0,01	0,16
4-Polinomial	1,00	-	1,00	3E-3	1,08	7E-3	0,57
5-Seno Hiperbólico	1,00	0,04	1,00	0,33	-	0,01	0,38
6-De Lacombe	1,00	-	2,76	-	3E-3	7E-3	0,57

Consoante a **Figura 24** ⑤ e **Tabela 14** verifica-se que, os modelos que expressam um melhor ajuste são: De Lacombe- (6) e Seno Hiperbólico- (7). Não se pode considerar que seja um bom ajuste visto que o valor máximo de  $R^2$  ajustado terá sido de 0,42 (modelo De Lacombe- (6)) ainda afastado da unidade como se espera.

Em relação ao pior ajuste encontrado terá sido novamente o modelo Logaritmo- (3). O valor de  $R^2$  ajustado foi de 0,09.

Há medida que se analisa este estudo, pode-se constatar que a qualidade do ajuste têm vindo a diminuir.

Em relação à medida estatística  $\chi^2$  esta indicou que para todos os modelos havia evidência da associação entre as variáveis tempo e deformação. Uma vez que todos os valores de  $\chi^2$  são inferiores a 0,05.

**Tabela 14-** Parâmetros dos diferentes modelos (ver **Tabela 1**) e resultados estatísticos - provete 5

Modelo	Coeficientes constituintes dos modelos de Fluência e variáveis estatísticas						
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\chi^2$ Ajust.	$R^2$ Ajust.
1-Parabólico	1,00	5E-3	1,00	-	-	8E-3	0,03
2-Lei 1/3	0,04	1,00	0,01	-	-	8E-3	0,29
3-Logaritmo	1,00	0,11	-	-	-	0,01	0,09
4-Polinomial	1,00	5E-3	1,00	-	1	8E-3	0,31
5-Seno Hiperbólico	1,00	1,00	0,05	0,33	-	7E-3	0,40
6-De Lacombe	1,00	-	5,72	-	0,29	7E-3	0,42

Por fim analisando a **Figura 24** ⑥ e **Tabela 15**, verificou-se que os modelos que expressam um melhor ajuste são: De Lacombe- (6) e Seno Hiperbólico- (5) e Parabólico- (1). Não se pode considerar que seja um bom ajuste, visto que o valor máximo de  $R^2$  ajustado foi de 0,67 (modelo Parabólico- (1)) ainda afastado da unidade como se espera. O pior ajuste encontrado foi novamente, o modelo Logaritmo- (3). E o valor de  $R^2$  ajustado foi de 0,20. Para este provete terá havido um ligeiro aumento dos valores de  $R^2$  ajustado.

Em relação à medida estatística  $\chi^2$  esta indicou que, para todos os modelos havia evidência da associação entre as variáveis tempo e deformação, uma vez que todos os valores de  $\chi^2$  são inferiores a 0,05.

**Tabela 15-** Parâmetros dos diferentes modelos (ver **Tabela 1**) e resultados estatísticos - provete 6

Modelo	Coeficientes constituintes dos modelos de Fluência e variáveis estatísticas						
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\chi^2$ Ajust.	$R^2$ Ajust.
1-Parabólico	1,00	0,04	0,59	-	-	0,01	0,67
2-Lei 1/3	0,08	1,00	0,02	-	-	0,01	0,55
3-Logaritmo	1,00	0,23	-	-	-	0,02	0,20
4-Polinomial	1,00	0,01	1,00	-	1,00	0,01	0,57
5-Seno Hiperbólico	1,00	1,00	0,12	0,33	-	0,01	0,60
6-De Lacombe	1,00	-	3,37	0,04	-	0,01	0,67

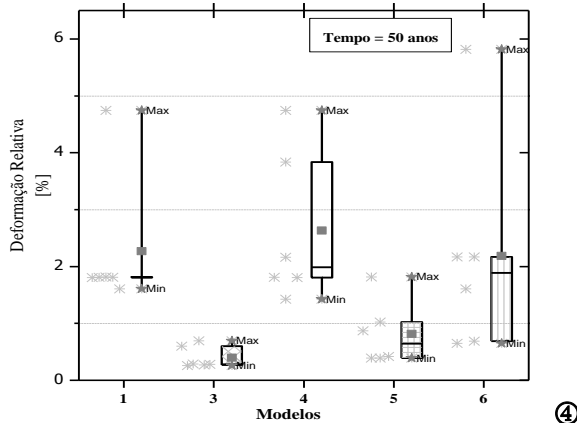
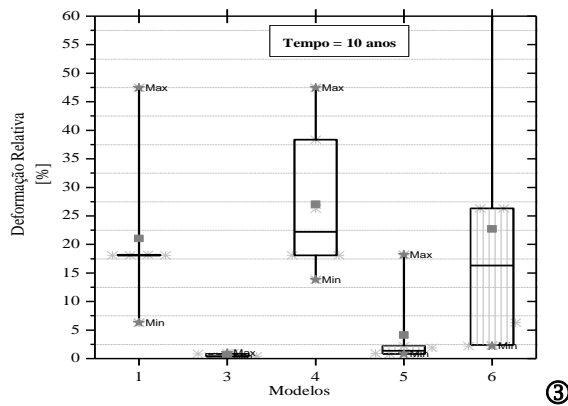
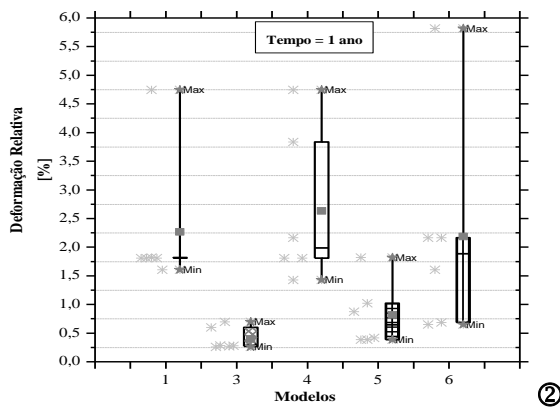
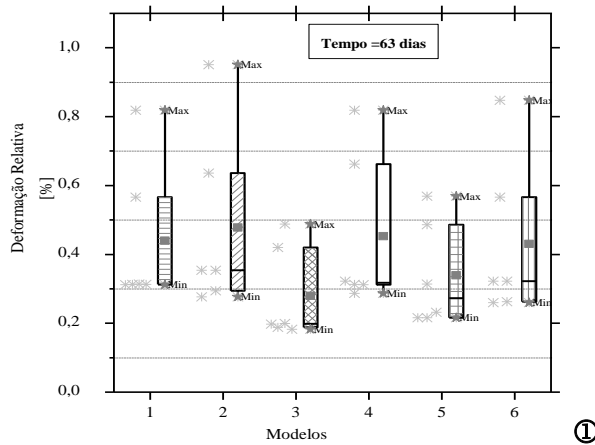
#### 4.4 Análise estatística de cada modelo utilizando a ferramenta *box plot*

Os gráficos *box plot* são um bom instrumento comparação quantitativa e qualitativa. Para os provetes estudados foram ajustados os seis modelos (**Tabela 1**).

Foi efetuada uma média dos seis provetes (provetes de eucalipto) para cada modelo e avaliada a variabilidade estatística em determinados períodos de tempo decorrido do ensaio, ou extrapolação temporal que se pretenda realizar.

Os períodos temporais usados neste trabalho foram de 63 dias (duração do ensaio), 1 ano, 10 anos e 50 anos, para todos os modelos já referidos na **Tabela 1**.

A **Figura 25**①, ②, ③ e ④ representa o resultado obtido para o tempo indicado anteriormente (63 dias, 1 ano, 10 anos e 50 anos).



**Figura 25**  
Deformação relativa média dos modelos de Fluência (ver **Tabela 1**) dos provetes de Eucalipto em temperatura  $\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  
① t = 63 dias, ② t = 1 ano, ③ t = 10 anos e ④ t = 50 ano.

**Legenda :**  
Modelo  
(1)- Parabólico ;  
(2)- lei 1/3 (lei de Andrade);  
(3)- Logaritmo;  
(4)- Polinomial;  
(5)- Seno Hiperbólico;  
(6)- De Lacombe;  
(I)- Deformação relativa da provete;  
(II)- Humidade Relativa

#### 4.4.1 Análise para tempo igual a 63 dias

Analisando a **Figura 25** e a **Tabela 16** tem-se que, nos modelos Parabólico- (1), Polinomial- (4) e De Lacombe- (6), os dados estão muito concentrados em torno da mediana, pois a dimensão do *box plot* é relativamente pequeno. São, de fato, resultados relativos aos heterogêneos.

Para efetuar uma comparação de um modelo em relação aos restantes, em termos da deformação relativa, selecionou-se o modelo Parabólico- (1) como principal termo de comparação. Sendo assim, verificou-se que este modelo Parabólico- (1) é semelhante ao modelo Lei 1/3- (2), Logaritmo- (3), Polinomial- (4) e De Lacombe- (6), e apenas significativamente diferente ao modelo Seno Hiperbólico- (5). As retas, obtidas a partir das curvas, mostram o alcance ou amplitude dos dados **Figura 25**. Este alcance é dado pelos valores máximos e mínimos das retas do gráfico e estão discriminados com o símbolo (estrela). O modelo que apresentou um maior alcance de deformação é o modelo (4). Sendo este dado por um alcance de 0,35 mm x mm. O modelo Logaritmo- (3) é o que atinge um menor alcance sendo este dado por 0,23 mm x mm.

Em geral, aos 63 dias, nenhum modelo apresenta uma simetria em relação à mediana, não havendo nenhum mais equilibrado.

Todos os modelos possuíram uma assimetria positiva, pois a média (símbolo designado a quadrado sombreado) foi superior à mediana.

#### 4.4.2 Análise para tempo igual a 1 ano

Foi desconsiderada a análise do modelo Lei 1/3 –(2) a partir do 1º ano. Uma vez que para este modelo existiam dados discrepantes, impossibilitando uma comparação viável.

Analisando a **Figura 25** e a **Tabela 16** verificou-se que, no geral, todos os modelos apresentam uma assimetria positiva em relação à mediana.

O modelo Parabólico- (1) não tinha variação interquartil, pois os valores dos quartis 1 e 3 são praticamente os mesmos. Desta forma, pode-se afirmar que para estes modelos os dados são muito homogêneos, 50 % dos dados não tiveram praticamente variação.

Tal como este modelo, os modelos Logaritmo- (3) e Seno Hiperbólico- (5) mostram pequena heterogeneidade, sendo os dados aproximados uns dos outros.

O modelo que apresenta uma maior variabilidade de dados nesta altura será o modelo Polinomial- (4).

Em todos os modelos são apresentados dados discrepantes denominados por *outliers*. Estes dados devem ser desconsiderados do estudo, uma vez que só o prejudicam e poderiam levar a situações de erro uma vez considerados.

#### 4.4.3 Análise para tempo igual a 10 anos

Segundo a **Figura 25** ③ e a **Tabela 16**, nota-se que aos 10 anos a deformação cresce exponencialmente em geral para todos os modelos. Será mais acentuada nos modelos Parabólico- (1), Polinomial- (4) e (6).

O modelo Parabólico- (1) continua, com pouca variabilidade dos seus dados em relação à distância interquartilica, 50 % dos dados não obtiveram variação. E, tal como no 1º ano os modelos 4 e 6 apresentam heterogeneidade dos seus dados. Continua a verificar-se a existência de dados discrepantes em todos os modelos.

No geral, todos os modelos apresentam uma assimetria positiva em relação à mediana.

#### 4.4.4 Análise para tempo igual a 50 anos

Por fim observando a **Figura 25** ④ e a **Tabela 16** concluiu-se que a deformação continua a crescer para todos os modelos atingindo um máximo para o modelo De Lacombe- (6), o valor de 424.52 %. Sendo este o modelo que tem uma maior variabilidade de dados e uma maior distância interquartilica. Ao contrário do modelo De Lacombe- (6), o modelo Logaritmo- (3) mostrou-se sempre o modelo onde a variabilidade se mantém praticamente nula.

No geral, todos os modelos apresentam uma assimetria positiva em relação à mediana.

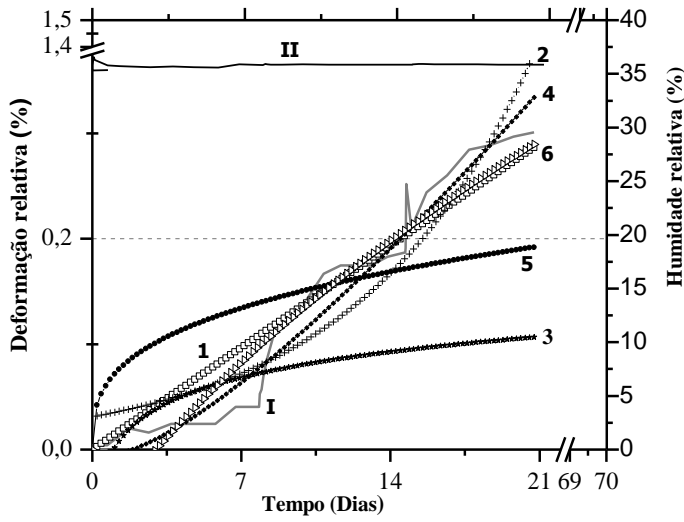
**Tabela 16-** Dados estatísticos obtidos através do gráfico *box-Plot* (t = 63 dias, 1 ano, 10 anos e 50 anos), Origin®

Tempo	Modelos Fluência	Parabólico	1/3 da Lei	Logaritmo	Polinomial	Seno hiperb.	De Laco.
		- 1 -	- 2 -	- 3 -	- 4 -	- 5 -	- 6 -
63 dias	Mediana	0,31	0,35	0,19	0,31	0,31	0,32
	Média	0,43	0,47	0,27	0,45	0,33	0,43
1 ano	Mediana	1,81	0,282	1,98	0,64	1,88	1,88
	Média	2,26	0,39	2,63	0,81	2,18	2,18
10 anos	Mediana	18,10	0,39	22,18	1,35	16,31	16,31
	Média	21,02	0,55	27,01	4,13	22,70	22,70
50 anos	Mediana	90,54	0,47	120,46	2,36	83,60	83,60
	Média	102,62	0,66	138,14	17,03	125,59	125,59

#### 4.5 Considerações sobre a eleição do melhor ajuste

Após apresentados os resultados neste capítulo (capítulo 4), efetuaram-se novamente os ajustes. Todavia em vez de se utilizarem os dados para a duração final de 63 dias (item 4.1), empregou-se os dados com uma duração de ensaios de 21 dias. Assim possuindo os dados extrapolados para 63 dias pode-se comparar com os dados existentes para 63 dias no primeiro ajuste (considerados como certos). Com esta diferença reforçou-se a resposta, quais modelos se ajustam melhor para um tempo mais reduzido.

Os ensaios foram novamente efetuados para os 6 modelos (Tabela 1) e para os 6 provetes. Os resultados obtidos estão explicitados nas Figura 26 e Figura 27.



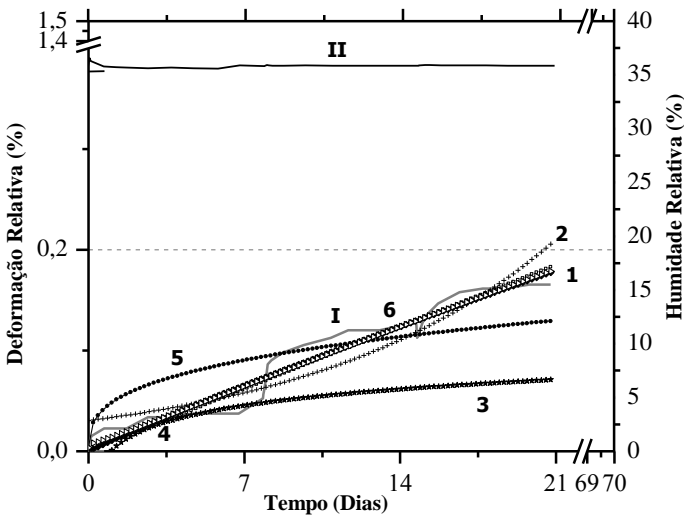
①

**Figura 26-** Ajuste dos seis modelos de Fluência para tempo igual a 21 dias (ver Tabela 1) à curva de deformação relativa em Fluência dos provetes de Eucalipto em temperatura  $\pm 20^{\circ}\text{C}$ ; ① provete 1, ② provete 2 e ③ provete 3.

**Legenda:**

Modelo:

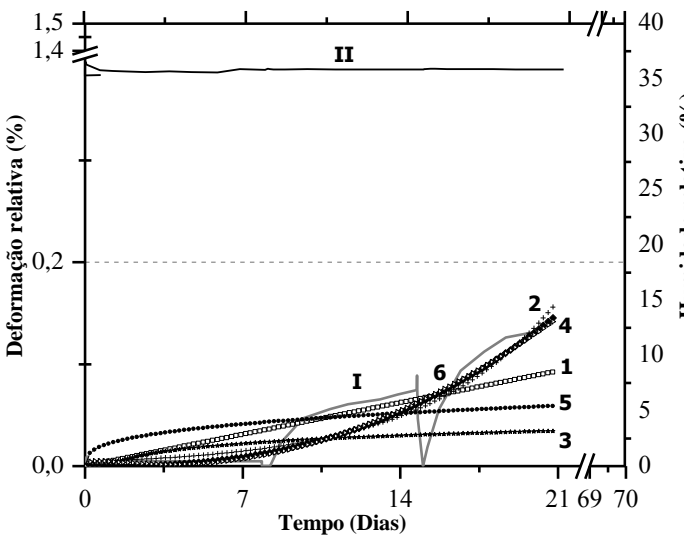
- (1)- Parabólico;
- (2)- Lei 1/3;
- (lei de Andrade);
- (3)- Logaritmo;
- (4)- Polinomial;
- (5)- Seno Hiperbólico;
- (6)- De Lacombe;



②

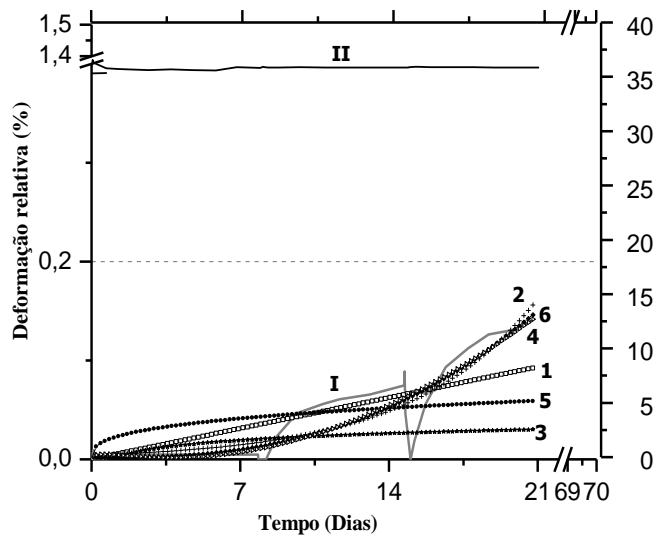
(I)- Deformação relativa da provete;

(II)- Humidade Relativa



③

- Deformação relativa (I)
- Modelo Parabólico (1)
- +— Modelo Lei 1/3 (2)
- ★— Modelo Logaritmo (3)
- ◆— Modelo Polinomial (4)
- Modelo Seno Hiperbólico (5)
- △— Modelo De Lacombe (6)



④

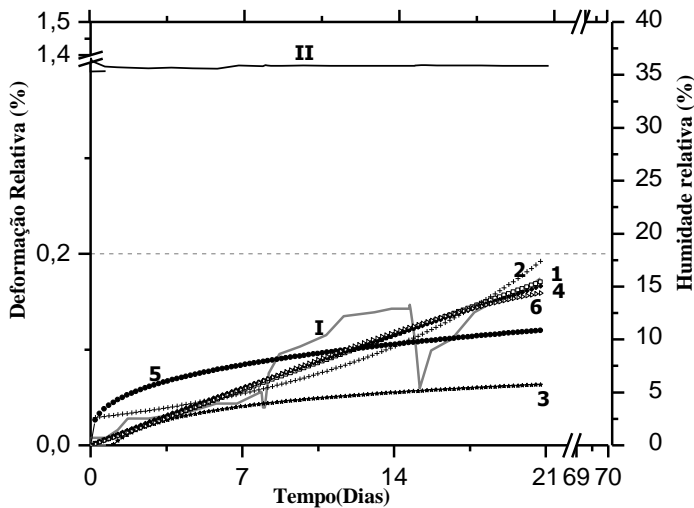
**Figura 27-** Ajuste dos seis modelos de Fluência para tempo igual a 21 dias (ver **Tabela 1**) à curva de deformação relativa em Fluência dos provetes de Eucalipto em temperatura  $\pm 20$  °C, ④ provete 4, ⑤ provete 5 e ⑥ provete 6.

**Legenda:**

Modelo :

- (1)- Parabólico ;
- (2)- Lei 1/3 (lei de Andrade);
- (3)- Logaritmo;
- (4)- Polinomial;
- (5)- Seno Hiperbólico;
- (6)- De Lacombe;
- (I)- Deformação relativa da provete;

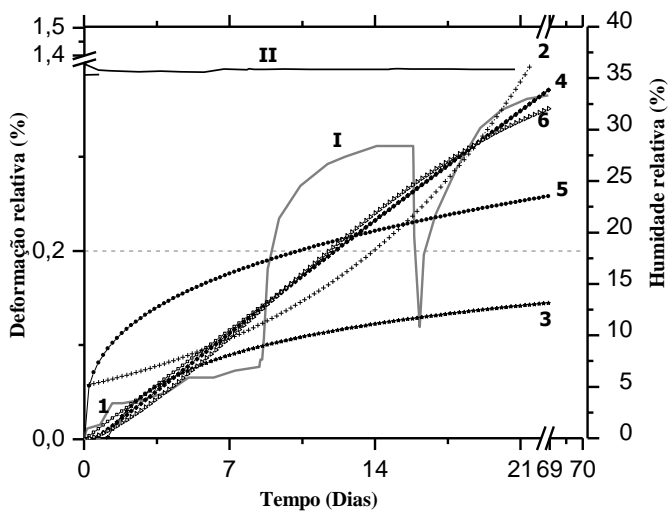
⑤



(II)- Humidade Relativa

- Deformação relativa (I)
- Modelo Parabólico (1)
- +— Modelo Lei 1/3 (2)
- ★— Modelo Logaritmo (3)
- ◆— Modelo Polinomial (4)
- Modelo Seno Hiperbólico (5)
- △— Modelo De Lacombe (6)

⑥



Após a visualização das **Figura 26** e **Figura 27** apresentou-se as deformações encontradas do ajuste efetuado na **Tabela 17** e seguintes.

A diferença que está apresentada na primeira coluna da **Tabela 17** e seguintes indica a desigualdade, entre os 63 dias extrapolados aquando o ajuste para um ensaio com 21 dias. E o ajuste para os 63 dias de ensaio (cujos os valores de deformação relativa se consideraram os certos). Os valores da diferença encontrada estão em percentagem (%).

Considerou-se que modelos com uma diferença superior a 50%, não são modelos ideais de ajuste.

**Tabela 17**-Extrapolação de deformações encontradas para 21 dias, 63 dias (extrapolado) e 63 dias (ensaios, ver **Figura 23**) para o provete 1 nos 6 modelos

<b>Tempo (Dias)</b>	<b>Parabólico</b>	<b>Lei 1/3</b>	<b>Logaritmo</b>	<b>Polinomial</b>	<b>Seno Hiperb.</b>	<b>De Lacom.</b>
21	0,29	0,38	0,10	0,34	0,19	0,29
63 Extrapolado	0,87	59,54	0,14	1,44	0,27	0,69
63 ( <b>Figura 23</b> )	0,82	0,95	0,49	0,82	0,57	0,85
Diferença (%)	6	6163	70	76	51	18

Visualizando os resultados pode ser observado que, para os 63 dias, os modelos cuja deformação se aproximou da realizada para o primeiro ajuste (**Figura 23**) são os modelos Parabólico- (1) e De Lacombe- (6). Sendo que, o Parabólico- (1) obteve uma deformação relativa anterior de 0,82 muito próxima da encontrada (de 0,87) pelo que a diferença é reduzida (6%). O modelo De Lacombe – (6) obteve uma deformação relativa anterior de (0,85) também próxima da encontrada (0,69), sendo que a sua diferença foi apenas de 18 %.

**Tabela 18**- Extrapolação de deformações encontradas para 21 dias, 63 dias (extrapolado) e 63 dias (ensaios, ver **Figura 23**) para o provete 2 nos 6 modelos

<b>Tempo (Dias)</b>	<b>Parabólico</b>	<b>Lei 1/3</b>	<b>Logaritmo</b>	<b>Polinomial</b>	<b>Seno Hiperb.</b>	<b>De Lacom.</b>
21	0,18	0,21	0,07	0,17	0,12	0,18
63 Extrapolado	0,55	9,89	0,09	0,48	0,18	0,49
63 ( <b>Figura 23</b> )	0,31	0,29	0,19	0,28	0,31	0,26
Diferença (%)	77	3266	51	71	40	90

Para o provete 2, o modelo que se aproximou dos resultados de deformação relativa do ajuste de 63 dias de ensaio (**Figura 23**) foi unicamente o modelo: Seno hiperbólico- (5). Sendo que a diferença entre as deformações extrapoladas para 63 dias (**Tabela 18**) e os resultados obtidos para os 63 dias (**Figura 23**) foi de cerca 40%. O que se considerou ainda viável como um bom ajuste de modelação da deformação por Fluência.

**Tabela 19-** Extrapolação de deformações encontradas para 21 dias, 63 dias (extrapolado) e 63 dias (ensaio, ver **Figura 23**) para o provete 3 nos 6 modelos

<b>Tempo (Dias)</b>	<b>Parabólico</b>	<b>Lei 1/3</b>	<b>Logaritmo</b>	<b>Polinomial</b>	<b>Seno Hiperb.</b>	<b>De Lacom.</b>
21	0,19	0,21	0,07	0,18	0,13	0,18
63 Extrapolado	0,56	9,90	0,10	0,49	0,19	0,50
63 ( <b>Figura 23</b> )	0,31	0,35	0,19	0,31	0,22	0,32
Diferença (%)	10	59944	75	679	61	329

Em relação ao provete 3 o modelo que se aproxima dos resultados de deformação relativa do ajuste (**Figura 23**) foi o modelo Parabólico- (1). Sendo que a diferença mencionada entre os ajustes extrapolados para 63 dias e os obtidos para os 63 dias de ensaio (**Figura 23**) foi de 10 %. Pelo que, este foi o único ajuste para provete 3 que satisfaz a condição de um ajuste adequado e aconselhável à deformação por Fluência.

**Tabela 20 -** Extrapolação de deformações encontradas para 21 dias, 63 dias (extrapolado) e 63 dias (ensaio, ver **Figura 24**) para o provete 4 nos 6 modelos

<b>Tempo (Dias)</b>	<b>Parabólico</b>	<b>Lei 1/3</b>	<b>Logaritmo</b>	<b>Polinomial</b>	<b>Seno Hiperb.</b>	<b>De Lacom.</b>
21	0,09	0,16	0,03	0,15	0,06	0,15
63 Extrapolado	0,28	212,6	0,04	2,66	0,09	1,38
63 ( <b>Figura 24</b> )	0,31	0,35	0,18	0,32	,021	0,32
Diferença (%)	10	59968	77	725	61	328

Tal como no provete 3, para o provete 4 a mesma situação é verificada. O modelo que melhor se ajusta aos resultados obtidos para o ensaio de 63 dias (**Figura 24**) é novamente o Parabólico- (1). A diferença obtida é igualmente de 10 %. Pelo que, este foi o único ajuste para este provete que satisfaz a condição de um ajuste adequado e aconselhável à deformação por Fluência.

**Tabela 21-** Extrapolação de deformações encontradas para 21 dias, 63 dias (extrapolado) e 63 dias (ensaio, ver **Figura 24**) para o provete 5 nos 6 modelos

<b>Tempo (Dias)</b>	<b>Parabólico</b>	<b>Lei 1/3</b>	<b>Logaritmo</b>	<b>Polinomial</b>	<b>Seno Hiperb.</b>	<b>De Lacom.</b>
21	0,17	0,20	0,06	0,17	0,12	0,16
63 Extrapolado	0,52	9,34	0,09	0,47	0,17	0,08
63 ( <b>Figura 24</b> )	0,31	0,27	0,19	0,31	0,23	0,26
Diferença (%)	66	3271	56	50	25	69

No caso do provete 5, o modelo que melhor se ajustou foi o Seno hiperbólico- (5), como já anteriormente (provetes 2) tinha sido.

A diferença entre os resultados obtidos aos 63 dias (**Figura 24**) e os extrapolados foi de 25 %. Sendo uma diferença reduzida.

**Tabela 22-** Extrapolação de deformações encontradas para 21 dias, 63 dias (extrapolado) e 63 dias (ensaios, ver **Figura 24**) para o provete 6 nos 6 modelos

<b>Tempo (Dias)</b>	<b>Parabólico</b>	<b>Lei 1/3</b>	<b>Logaritmo</b>	<b>Polinomial</b>	<b>Seno Hiperb.</b>	<b>De Lacom.</b>
21	0,38	0,44	0,15	0,38	0,26	0,35
63 Extrapolado	1,13	26,37	0,20	1,07	0,37	0,04
63 ( <b>Figura 24</b> )	0,56	0,63	0,42	0,66	0,48	0,56
Diferença (%)	99	4057	53	61	23	94

Por fim, para o provete 6 o modelo cuja deformação se aproximou da realizada para o ajuste aos 63 dias (**Figura 23, Figura 24**) é o modelo Seno Hiperbólico-5. Cuja diferença foi de 23 %. Todos os outros não se podem considerar bons ajustes segundo a condição de possuírem diferenças superiores a 50 %.

Conclui-se, após esta análise e comparando os valores da deformação para 63 dias, extrapolada a partir da duração do ensaio de 21 dias (**Figura 26 e Figura 27**) e encontrada ao 63º dia (**Figura 23 e Figura 24**), nos diferentes modelos matemáticos, que os modelos recomendados são o Parabólico – (1) e Hiperbólico Seno- (5). Estes dois modelos apresentaram menores diferenças entre os resultados (<50%). Por outro lado, são modelos que obtiveram parâmetros aceitáveis e que cujo seu R2 esteve sempre próximo da unidade, ou seja, estatisticamente considerou-se um bom ajuste. Contrariamente o seu  $\chi^2$  considerou-se sempre quase nulo o que qualitativamente se concluiu ser um bom ajuste.

#### **4.6 Comparação dos resultados com Eurocódigo 5**

A ação devida à atuação de várias cargas, obtém-se somando as deformações individuais com a sua correspondente parte de Fluência. Recomenda-se para a deformação final que esta não ultrapasse L/250 a L/350 (EC 5).

O valor de  $K_{DEF}$  adotado através do *Eurocódigo 5* foi de classe 3 e madeira maciça. De acordo com a expressão (24), considerou-se o dimensionamento da deformação por Fluência para uma duração permanente de ações. Assim, efetuou-se esta previsão para 50 anos, o tempo de durabilidade de um edifício sem uma intervenção de reabilitação significativa.

Substituindo a expressão (25) para o provete que obteve uma maior deformação inicial, tem-se o valor máximo previsto pelo *Eurocódigo 5*. A deformação instantânea que se obteve  $u_{inst,G}$  foi de 0,27 mm e o  $K_{DEF} = 2$ .

Utilizando a expressão (25) obteve-se:

$$u_{fin}=0.27*(1+2) \quad (38)$$

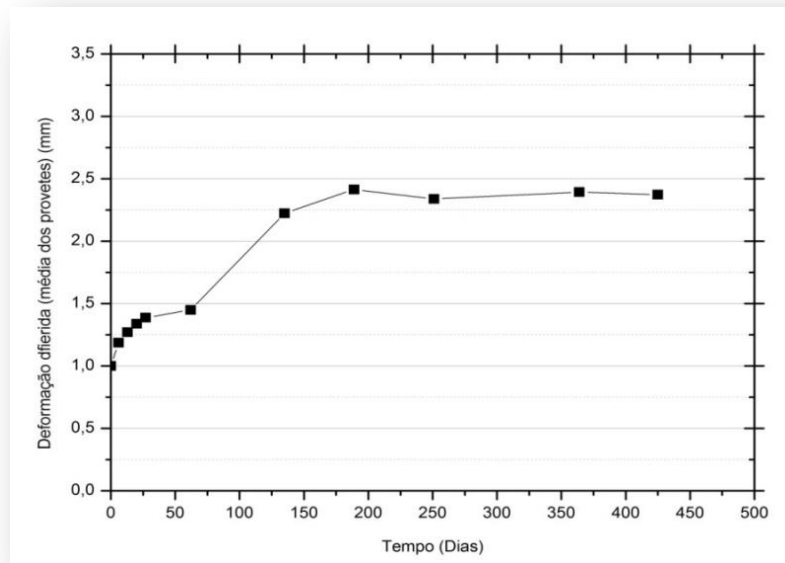
$$u_{fin}=0,81 \quad (39)$$

Assim, determina-se que o valor máximo de  $u_{fin}$ , é de 0,81 para 50 anos. Verificado, pelos resultados anteriores (Ver **Figura 23** e **Figura 24**), os valores extrapolados das deformações para o tempo de durabilidade de um edifício ( $T= 50$  anos) são bastante superiores ao previsto pelo *Eurocódigo 5*. Independentemente do modelo em análise.

#### 4.7 Reflexões sobre os modelos de Fluência

Calvo et al (2000), estudou o comportamento em Fluência dos provetes de madeira *Eucalyptus grandis* submetidos a esforços de flexão a longo prazo. As dimensões dos provetes eram reduzidos e livres de defeitos. Foram estudados num total de dez provetes iguais, tendo como dimensões: 20 mm x 30 mm e vão de 570 mm. O ensaio teve a duração de cerca de 58 semanas, no qual a carga aplicada foi 0,2 KN e manteve-se invariável. A temperatura variou entre 15 °C e 30 °C.

A **Figura 28**, apresenta os resultados obtidos do estudo da deformação relativa média.



**Figura 28-** Relação da média das deformações diferidas e média das deformações instantânea (Calvo et al 2001).

Como se pode verificar a deformação por Fluência atingiu-se aos 200 dias (6 meses após o início da experiência), com um valor de 2,5 mm. Após esse período a deformação manteve-se constante, recuperando um pouco essa deformação até ao final do ensaio.

Comparando com os resultados da presente dissertação podemos constatar que, os provetes ensaiados tal como em Calvo et al (2000) eram de tamanho reduzido (escala 1:10). Sendo válido para as duas experiências que o facto de serem provetes de tamanho reduzido, não se pode extrair conclusões definitivas apoiadas numa estatística confiável. Proporcionam apenas, dados interessantes sobre o comportamento da deformação quando submetidos a uma carga constante a longo prazo.

A deformação relativa entre ambas as experiências terá sido relativamente diferente, sendo as de Calvo et al (2000) um pouco superior, podendo se atribuir este facto às condições de ensaio das duas experiências. Estas são diferentes pois os ensaios efetuados, para efeito desta dissertação, têm o efeito molhagem e secagem mecânico sortivo e utilizou-se a modelação matemática para a determinação da Fluência relativa.

Em relação às experiências realizadas por Piter et al (2007), este estudou provetes de *Eucalyptus grandis* de tamanho estrutural (escala 1:1) num total de 15 provetes durante 470 dias.

Piter et al (2007) contrariamente a Calvo et al (2001) considerou o comportamento viscoelástico e o efeito mecânico sortivo. Dos 15 provetes estudados, achou interessante conhecer o comportamento à deformação relativa para 7 provetes livres de medula e 8 com medula.

A deformação relativa por Fluência foi próxima da encontrada por Calvo et al (2000), apesar de esta ser atingida em períodos diferentes. Pelo que, em Piter et al (2007) foi aos 470 dias.

Concluiu também que a presença de medula no provete é uma característica importante na resistência e rigidez desta espécie de madeira.

Pela experiência efetuada, pode-se aferir que os provetes sem medula comparados, com os que contém medula, têm uma taxa de Fluência similar. Mas após os 180 dias e retirada a medula dos provete que a continham, possuíram uma taxa mais rápida de Fluência nesta fase.

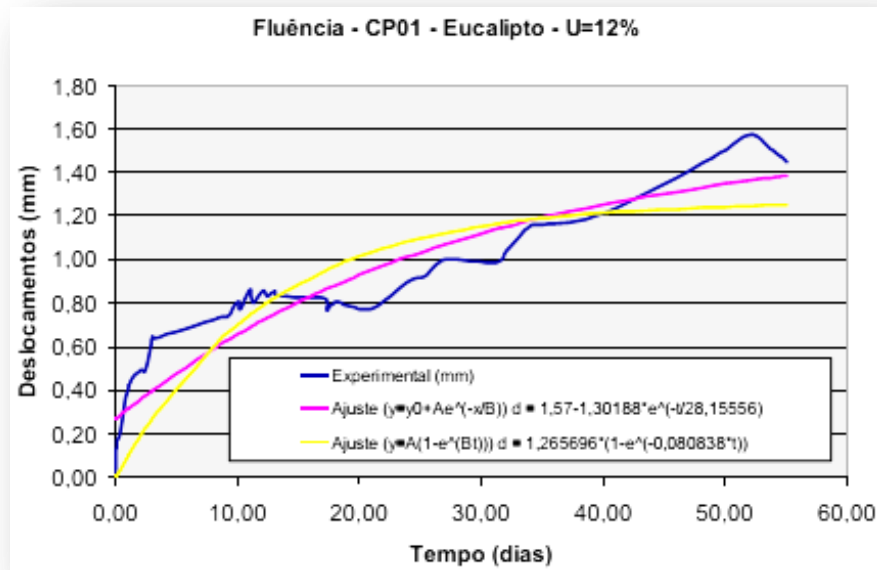
Okimoto (2001) efetuou experiências com madeira de Eucalipto utilizando dois ajustes exponenciais, de acordo com as expressões (40) e (41). Os provetes utilizados tinham dimensões de 50 x150 mm de secção transversal e um teor de humidade de 12 %. As equações de ajuste utilizadas foram as seguintes:

$$y = y_0 + A \times e^{-\frac{t}{B}} \quad (40)$$

$$y = A(1 - e^{-Bt}) \quad (41)$$

Onde,  $y$  é o deslocamento em  $mm$  e  $t$  o tempo em dias.

Os restantes parâmetros são constantes arbitradas. O resultado obtido está representado na **Figura 29**.



**Figura 29-** Resultados da deformação de ensaios experimentais e curvas de ajuste através de modelos exponenciais (Okimoto 2001)

Da **Figura 29** pode ser observado que o ensaio foi efetuado para 55 dias. A curva a azul traduz os resultados de deformação do ensaio de flexão efetuado. A deformação por Fluência para tempo igual a 50 anos através do ajuste cor-de-rosa foi de 1,37 mm e por sua vez para o ajuste a amarelo, a deformação foi de 1,22 mm (appx.). Para comparação dos resultados da presente dissertação podemos transformar os resultados de Okimoto, 2001 em deformação relativa. Sendo assim para ambos os resultados a deformação relativa seriam de 0,37 % para o ajuste cor-de-rosa e 0,22 % para o ajuste amarelo. Visualizando-se a **Figura 23** e **Figura 24**, observa-se que os valores são similares, estando dentro dos parâmetros previstos e aceitáveis.

#### 4.8 Resultados ensaio de alumínio

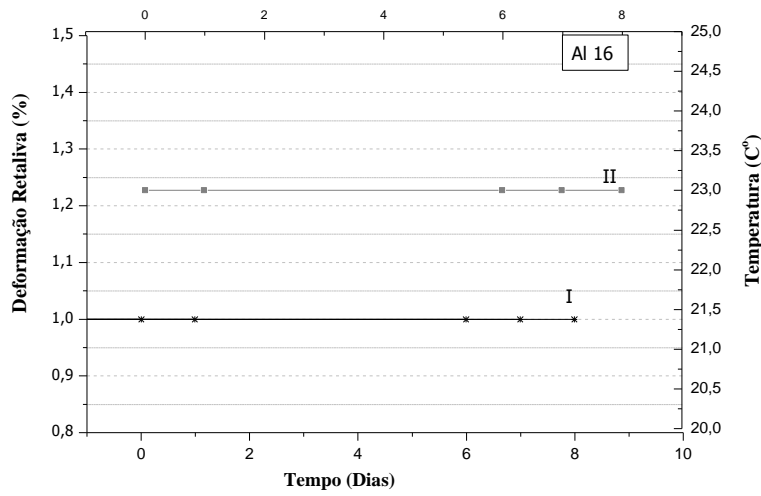
Foram efetuados ensaios em três provetes de alumínio iguais, ver **capítulo 3.3**, para verificar se os mesmos deformavam por Fluência, nomeadamente por atuação conjunta de carregamento e temperatura. Para este efeito foram realizados ensaios à flexão.

Os resultados obtidos, bem como as condições para cada provete, serão mostradas na **Figura 30**. É importante focar que, embora as condições dos ensaios não sejam fieis às reais nos seguintes aspetos: a duração do ensaio (sendo a curto prazo, 3 a 4 semanas) e as dimensões do material (escala reduzida, 1:10). Ainda assim, o objetivo é conseguir obter uma previsão do comportamento

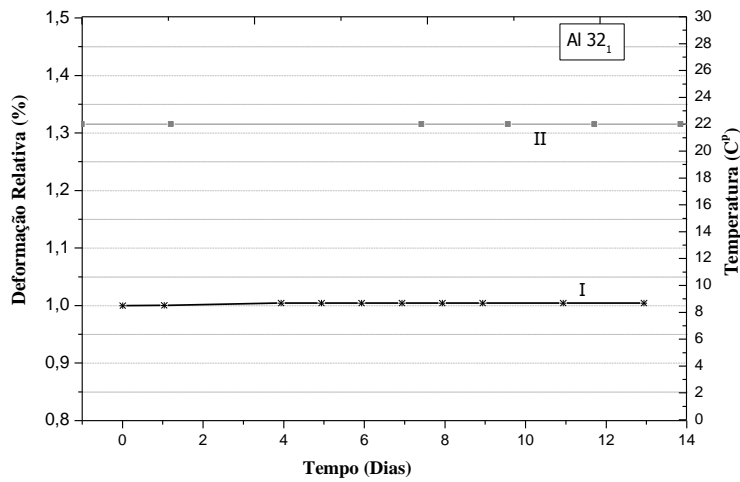
da deformação. Logo, em condições reais, espera-se o mesmo comportamento para ensaios à escala 1:1 e em número com significância estatística.

O ensaio em questão teve uma duração de um mês, iniciando-se no dia 12-03-2015 e terminando no dia 09-04-2015.

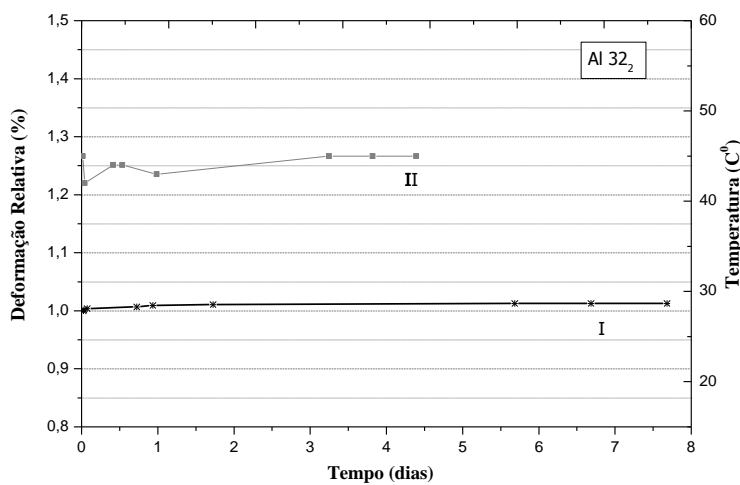
Tal como no **capítulo 4.3**, também para os ensaios descritos voltou-se a utilizar o conceito de deformação relativa (ver **item 2.1**).



①



②



③

**Figura 30-** Deformação relativa para cada provete de alumínio; ① provete de alumínio sujeito a uma carga de 16 kN e temperatura de 20 °C ② provete de alumínio sujeito a uma carga de 32 kN e temperatura de 20 °C e ③. Provete de alumínio sujeito a uma carga de 32 kN e temperatura de 50 °C

**Legenda :**  
 (I)- Deformação relativa do provete;  
 (II)- Temperatura

#### 4.8.1 Ensaio provete 1 de alumínio

Este ensaio de flexão iniciou-se a dia 12-03-2015 e foi aplicada uma carga com um peso de 160 N (16 kg) que equivale a uma tensão de cerca de 49.478 kPa como demonstrado pelas expressões (42) e (43).

$$\sigma = \frac{M}{I} \quad (42)$$

$$w = \frac{I}{h^2} \quad (43)$$

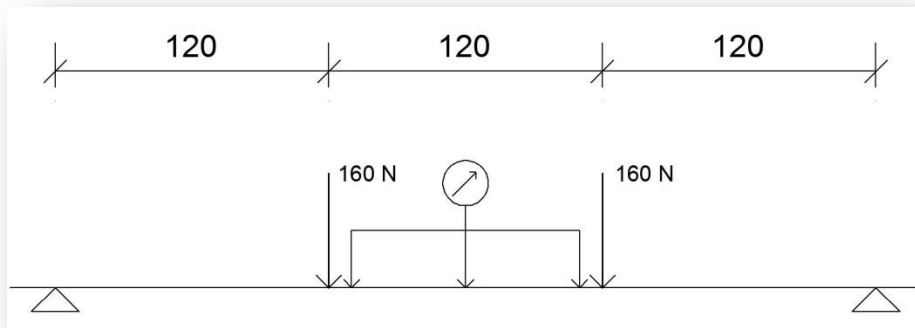
Utilizando as expressões (42) e (43):

$$\sigma = \frac{(16 \times 9.81 \times 120)}{(0.6642)^8 \times (10)^{-3} \times \frac{20.1}{0.2}} = 0,5 \text{ MPa} \quad (44)$$

Onde  $M$  é o momento fletor que atua na secção transversal do provete,  $\sigma$  é a tensão instalada do provete,  $I$  é dado pela inercia da peça.

A temperatura do ensaio foi constante de um valor de 22 °C e humidade relativa igualmente constante de um valor entre 35 a 36 %.

Os pesos, de 16 kg cada foram colocados a 120 mm dos apoios, ver a **Figura 31**:



**Figura 31-** Disposição do ensaio de flexão do provete de alumínio da liga Liga EN AW-6060 (Al MgSi)

Analisando a **Figura 30** ① pode-se observar que o provete 1 teve uma deformação instantânea (inicial) devido ao peso aplicado, no entanto, ao longo dos 8 dias esta deformação manteve-se constante.

Considerou-se que mesmo aumentando a duração do ensaio, estes resultados não se alteram, continuando a deformação inalterada. Para esta temperatura e tensão aplicada o provete não foi influenciado por deformação em Fluência.

#### **4.8.2 Ensaio do provete 2 de alumínio**

Como analisado no **item 4.8**, concluiu-se que para a tensão aplicada de 0,5 MPa, o provete 1 não sofreu Fluência. Experimentou-se carregar o 2º provete com o dobro da carga, ficando assim sujeito ao dobro da tensão anterior. A temperatura continuou constante de um valor de 22 °C. Os resultados obtidos estão representados na **Figura 29** ②.

Mais uma vez, a carga aplicada não foi suficiente para que este se deforme por Fluência. Com base nestes resultados, o que se verifica é que o alumínio não se deforma por Fluência.

#### **4.8.3 Ensaio do provete 3 de alumínio**

Por fim, para se constatar se sob o efeito da temperatura estes resultados se alteram significativamente aumentou-se a temperatura com auxílio de um ventilador a uma temperatura de 45°C a 80 cm de distância do material de ensaio. A tensão manteve-se igual à anterior (1 MPa), não se manifestou necessário aumentar novamente dados dos parâmetros anteriores. Mesmo com o aumento da temperatura, era de esperar que houvesse uma alteração no valor da deformação, pois a temperatura média a que estaria sujeito com ao auxílio do ventilador seria de 50 °C. Uma vez que na literatura indica que o alumínio pode sofrer Fluência em temperatura elevadas (a partir de 50 °C) para a temperatura ensaiada apenas verificou-se uma alteração de 0,15 % na deformação relativa.

Normalmente o material deveria manifestar nas primeiras 24 horas, 70 % da deformação em Fluência, não se registou esta situação, pois os 13 %, não são significativos.

Possivelmente, para temperaturas muito superiores à que foi conseguida já se alterariam os resultados, isto para temperaturas a rondar os 300 °C, impossível de conseguir nas condições de laboratório existentes.

## 5 Conclusões e Desenvolvimentos futuros

### 5.1 Considerações finais

O estudo da Fluência em flexão nos diferentes materiais de construção demonstrou ser bastante importante para o bom dimensionamento das estruturas de edifício. Sendo a Fluência uma propriedade mecânica que não se manifesta de forma imediata, deve ser avaliada anteriormente à execução do projeto a elaborar. Essa avaliação deverá ser efetuada através de ensaios laboratoriais, reproduzindo as condições reais de ambiente que se pretendem atingir para que se possa prever o comportamento em Fluência das estruturas.

Neste trabalho foi apresentado o comportamento em Fluência de flexão em 4 pontos da madeira de Eucalipto, sob condições ambientais tipo classe 3 (com secagem e molhagem) e em condições laboratoriais de ensaios com provetes à escala reduzida (1:10).

Analisaram-se os resultados com diferentes modelos matemáticos (Bodig, Jayne 1982). Foi possível, não só estudar a deformação por Fluência na madeira, bem como estudar a Fluência relativa e comparar vários métodos para extrapolar essa deformação diferida para outros períodos de tempo (1, 10 e 50 anos).

O interesse da comparação dos vários modelos para avaliar a deformação foi analisar a variabilidade existente entre os mesmos. Constatou-se que existiram modelos tais como (1/3 da Lei- (2) e Polinomial- (4)) nos quais, quando se extrapolou para 10 anos e 50 anos apresentaram resultados discrepantes em relação aos restantes modelos. Por este motivo é que se deve ter atenção ao risco da extrapolação, podendo conduzir a resultados que não são muito viáveis, nem fidedignos. Por outro lado, conclui-se que os modelos 1/3 da Lei- (2) e Polinomial- (4), não são aconselháveis para serem utilizados para previsão da deformação para esta espécie de madeira. E esta foi também uma intenção do trabalho, avaliar quais dos modelos estavam aptos para a ser utilizados na previsão. A avaliação estatística efetuada a partir da ferramenta escolhida (o *box plot*) também permitiu reforçar a comparação referida. Conseguiu-se ter conhecimento de entre os vários modelos referidos, quais possuem um bom ajuste, através dos parâmetros ( $\chi^2$  Ajust e  $R^2$  Ajust). Desde logo se excluiu como termo de comparação o modelo 1/3 da Lei- (2).

No final efetuou-se uma eleição do melhor ajuste para a avaliação da deformação por Fluência, donde se concluiu que os modelos sugeridos foram o modelo Parabólico- (1) e o modelo Seno Hiperbólico- (5). Tal como o referido no **item 4.5**, estes modelos revelaram uma diferença entre os

resultados extrapolados para 63 dias com ensaio de duração de 21 dias e os resultados considerados como corretos (ensaio de 63 dias) menor que 50 %.

A componente mecânico sortivo na madeira, conjuntamente com a influência das cargas para longa duração, permitiram concluir que acelera o comportamento em Fluência exponencialmente, devido ao efeito das variações cíclicas da humidade.

Posto isto, pode-se afirmar que a madeira de Eucalipto é um material que possui deformação em Fluência.

Relativamente ao material alumínio, os ensaios de flexão efetuados revelaram que este material não apresenta influência na deformação diferida à temperatura ambiente. Os resultados mostraram que para os três provetes avaliados (**Figura 30** ①, ② e ③) não houve significativa alteração da deformação relativa durante o período de um mês de ensaios. Estes resultados revelam que o alumínio é um material que não é suscetível de se deformar por Fluência, nem sobre o efeito de temperatura elevada ( $\cong 50$  °C).

Não existe nenhuma regulamentação específica que sugira valores para limites de deformação por Fluência do alumínio à temperatura ambiente. Pelo que se pode concluir que ainda não é justificada a elaboração de tal documento.

## **5.2 Desenvolvimentos futuros**

A presente dissertação procurou desenvolver e aprofundar o conceito de Fluência nos materiais madeira e alumínio. Contudo numa perspetiva futura os ensaios efetuados para o material madeira poderão ser desenvolvidos para provetes à escala real (1:1) e um maior número de provetes. Ou seja, simular as condições reais de um ensaio. A duração dos ensaios também poderia ser mais prolongada, a título de exemplo uma duração de 5-7 anos, para assim verificar em que medida é que os resultados se alterariam.

Em relação ao material alumínio sugeriu-se que para uma análise mais profunda seria interessante efetuar os ensaios com provetes de dimensão à escala real, com uma duração prolongada e ainda submetido a temperaturas superiores a 0.4 vezes a temperatura de fusão do alumínio (em Kelvin). Isto porque a temperatura é a grande condicionante deste material se deformar por Fluência, conjuntamente com a aplicação de tensão constante para grandes intervalos de tempo.

## 6 Referências Bibliográficas

- ALEGRIA RV (1984) Estudo dos efeitos de reduções de tensão no comportamento em Fluência do aço AISI-316. Tese de Mestrado, São Paulo, Brasil
- ALFTHAN J (2002) Micro-mechanical modelling of mechano- sorptive creep in paper. Trabalho de Licenciatura, Royal Institute of technology, Stockholm
- BARBOSA PAD (2013) Desenvolvimento de Aços inoxidáveis resistentes à Fluência. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto
- CALVO CF, Cotrina AD, et al. (2000) Bending strain of the Eucalyptus Grandis under longtime charges, In: Encontro Brasileiro em Madeira e em Estruturas de Madeira, 2000, São Carlos. Anais do VII Encontro Brasileiro em Madeira e em Estruturas de Madeira. São Carlos: EESC/USP
- CALVO CF, Cotrina AD, et al. (2002) Creep in small clear specimens of Argentinean Eucalyptus grandis. *Maderas: Ciencia y Tecnología* 4(2): 124-132
- CAMPOSINHOS RS (2013) Dimensionamento de fachadas. Tecnologias de Fachadas, Elementos da Disciplina, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto
- CARDOSO MD (2009) Comportamento e mecanismos de falha à Fluência em Aços P91 e juntas soldadas. Tese de mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Dezembro
- CARVALHO A (1997) Madeiras Portuguesas: estrutura anatómica, propriedades, utilizações. Vol. II. Direcção-Geral das Florestas. Lisboa. 415pg, ISBN 972-49-2081-X
- CHEN RP, Ghassemi AH, Maruyama K, Igarashi M (2011) Long-term microstructural degradation and creep strength in Gr.91 steel *Materials Science and Engineering: A* 528(13): 4390–4394
- EPMEIER H, Johansson M, et al. (2007) Bending creep performance of modified timber. *Holz als Roh- und Werkstoff* 65: 343-351
- ESTEVES BMML (2006) Melhoramento tecnológico por modificação térmica de madeiras Portuguesas. Tese de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, Portugal

SILVA JC (2003) Idade é documento também para a madeira. Revista da Madeira -ago.. Edição Especial. Eucalipto: Pesquisa amplia usos 13(75): 22-30, 138pag, Curitiba, Brasil

EN 408 (2003) Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties, CEN, Brussels, Belgium

EN 1992-1-1 (2002): Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, CEN, Brussels, Belgium

EN 1995-1-1 (2004): Design of timbers structures- Parte 1 -1 : General –Common rules and rules for buidings, CEN European Committee for Standardization, Bruxelles, Belgium

FLAIG A (2000) Thermal Cycling Creep of a fiber Reinforcer Aluminum Alloy. Tese de Mestrado, Instituto de Metallkunde da Universidade de Stuttgart e Max-Planck, instituto de Metallforschung, Stuttgart

JEKINS WD (1951) Creep oh high-Purity Aluminum. Journal of research of the national bureau of standards 46(4)

KATAOKA LT (2010) Análise da deformabilidade por Fluência e retracção e sua utilização na monotiragem de pilares de concreto. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da universidade de São Paulo, São Paulo

KAWAKAMI MS (2011) Estudo da Fluência dos aços inoxidáveis ferríticos estabilizados ao titânio e Nióbio e simulação numérica do processo no Abaqus. Tese de. Mestrado, Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista

KREMPL et al. (1979) An experimental study of room-temperature-sensitivity, creep and relaxation of AISI type 304 stainless steel. journal mechanical physics solids 27: 363-315

LOBÃO MS, LÚCIA RMD, et al. (2004) Caracterização das propriedades físico-Mecânicas da madeira de Eucalipto com diferentes densidades. Àrvore 28(6): 889-894

LOPES DB (2013) Technological improvement of Portuguese pinewood by chemical modification. Tese de doutorado, Georg-August-Universität Göttingen, Göttingen, Alemanha, 146 pg

MILER KP (2008) Estudo da Fluência em Vigas de concreto reforçado com fibras de aço. Tese de Mestrado, Escola Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil

MELO RR, Menezzi CHS (2010) Comportamento reológico da madeira e derivados. *Ciência da Madeira* 1(1): 25-40

MEHTA PK, Monteiro PJM (2008) *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*. IBRACON Instituto Brasileiro do Concreto, São Paulo, Brasil

NASCIMENTO AM, Oliveira JTS (2001) Classificação e propriedades da madeira de Pinus e Eucalipto. Relatório Técnico 27-35, Universidade Federal de Viçosa, Brasil

NEVILLE AM, Digler WH (1970). *Creep of concrete: plain, reinforced and Prestressed*. North-holland publishing company, Amestardam

NEVILLE AM (1995) *Properties of Concrete - Fourth Edition*. Longman Group Limited. England, ISBN: 0-582-23070-5, 844 pg

NEVILLE AM, Dilger WH, Brooks JJ (1983) *Creep of plain and structural concrete*. London, New yourk: construction,.

OKIMOTO FS (2001) Análise da perda de protensão em pontes protendidas de madeira. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, Outubro, Brasil

PACHECO JL (2001) Desenvolvimento de metodologia para a avaliação da interação fadiga e Fluência em aço API P22. Tese de Doutorado, Porto Alegre

PITER JC, Calvo CF, et al. (2007) Creep in structural-sized beams of Argentinean *Eucalyptus grandis*. *Maderas: Ciencia y Tecnología* 9(2): 117-126, ISSN 0718-221X

PITER JC, Zerbino RL, Blaß HJ (2006) Strains in beams of Argentinean *Eucalyptus grandis* under long-term loading. *Holz als Roh- und Werkstoff* 64: 351-355, DOI 10.1007/s00107-005-0085-5

REIS APA (2003) Reforço de vigas de concreto armado submetidas a pré -carregamento e acções de longa duração com aplicação de concretos de alta resistência e concretos com fibras de aço. Tese de Doutorado, Engenharia de estruturas - Escola de Engenharia de São Carlos -Universidade de São Paulo, Brasil 355p.

ROBINSON RL et al. (2002) *Creep resistant aluminium alloys and their applications*. University of Newcastle upon Tyne, Newcaltle upon Tyne NE1 7 RU, UK

RODRIGUES RAD (2002) Variabilidade de propriedades físico-Mecânicas em lotes de Madeira serrada de eucalipto para a construção civil. Tese de Mestrado, Estado de São Paulo, Brasil

ROSSI, JL (1987) Efeito de tratamentos mecânico-térmicos na Fluência de aço inoxidável Austenítico estabilizado com Nióbio. Tese de Mestrado, São Paulo, Brasil

RÜSCH H, Jungwirth D, Hilsdorf HK (1981) Concreto armado e protendido-propriedades dos materiais e dimensionamento. Rio de Janeiro, Campus, Brasil

SANTOS JÁ (2007) Estudos de Modelos e caracterização do comportamento mecânico da madeira. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal

SAWADA K, Suzuki K, Kushima H, Tabuchi M, Kimur K (2008) Effect of tempering temperature on Z-phase formation and creep strength in 9Cr–1Mo–V–Nb–N steel. *Materials Science and Engineering A480(1–2)*: 558–563

SHIMOYAMA VR (1990) Variações da densidade básica e características anatômicas e químicas da madeira em *Eucalyptus* sp. Tese de Mestrado em Ciência Florestal, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, Brasil, 93p.

SHRESTHAT, et al. (2013) Creep rupture behavior of grade 91 steel. *Materials science and Engineering A560(1-2)*: 382-391

TOMAZELLO FILHO M (1985) Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *E. saligna* e *E. grandis*. *IPEF Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais* 29: 37-45