



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Estudo dos efeitos diferidos e termo-higrométricos nos sistemas mistos madeira-betão

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Estruturas

Autor

Maria Madalena de Azevedo Gomes de Almeida e Sousa

Orientador

Alfredo Manuel Pereira Geraldês Dias

Coorientador

Miguel Carlos Pedrosa Ferreira

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correcções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Julho, 2013

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Alfredo Dias e ao Engenheiro Miguel Ferreira, agradeço a disponibilidade e conhecimentos transmitidos durante a orientação deste trabalho.

À minha família e amigos, agradeço todo o carinho, compreensão e apoio que me deram ao longo destes anos em que frequentei o Mestrado Integrado em Engenharia Civil.

Aos meus colegas de curso, agradeço por estarem sempre presentes e por serem não só bons colegas mas amigos que levo para a vida.

RESUMO

Nos sistemas mistos madeira-betão os dois materiais apresentam um comportamento conjunto que é assegurado pela ligação. Em geral esta ligação não é completamente rígida pelo que a sua rigidez condiciona de forma significativa o comportamento final da estrutura. Tratando-se de dois materiais com comportamentos diferidos e termo-higrométricos bastante distintos, as distribuições de esforços internos e deformações vão depender destes.

Neste trabalho pretende-se estudar a influência que as variações dimensionais induzidas pelos efeitos diferidos (retração e fluência nos materiais) e efeitos termo-higrométricos (variação do teor de água) podem ter nas distribuições de esforços e deformações neste tipo de sistema. O estudo centra-se em sistemas simplesmente apoiados, a opção usada na esmagadora maioria das aplicações práticas.

Para atingir este objetivo será desenvolvido um modelo numérico com base numa análise linear que permita simular de forma adequada o comportamento dos sistemas mistos madeira-betão. Esta análise linear será realizada por via de duas diferentes metodologias: pelo modelo simplificado apresentado no Anexo B do Eurocódigo 5, 1-1 e pelo método dos elementos finitos utilizando o programa EvalS. Os resultados deste modelo serão validados com base nos resultados disponíveis de outros modelos.

Usando o programa de elementos finitos serão introduzidas ações cinemáticas representativas dos efeitos que se pretende simular (retração, fluência e variação de teor de água) e realizadas as correspondentes análises. Com base nos resultados obtidos será avaliada a influência que estes efeitos podem ter na distribuição de esforços e deformações.

Das análises efetuadas concluiu-se que um modelo simplificado de análise de uma estrutura mista madeira-betão deve ter em conta o efeito da retração do betão e a variação do teor de água na madeira e não só a fluência dos materiais, uma vez os dois primeiros efeitos provocam uma variação significante na distribuição de tensões.

ABSTRACT

In composite timber-concrete systems both materials have an aggregate behavior which is ensured by the connection. The connection is not completely stiff, so its stiffness influences significantly the structure final behavior. Being two materials with different deferred and thermo-hygrometric behaviors, the internal stresses share and the deflections rely on those parameters.

This document aims to study the influence of dimensional variations induced by delayed effects (shrinkage and creep) and thermo-hygrometric effects (variation of moisture content) on stresses distribution and deformations in this kind of systems. The report focuses on simply supported systems, the option used in the majority of practical applications.

To achieve this goal will be developed a numerical model based on linear analysis that allows a satisfactory simulation of the behaviour of composite timber-concrete systems. This analysis will be done via two different methods: the simplified model presented on the Annex B of Eurocode 5, 1-1 and the finite elements method using the program EvalS. The results of this model will be validated based on results of other models available.

Using this model will be introduced dynamic actions representing the effects that are being studied (shrinkage, creep and variation of moisture content) and performed the corresponding analysis. Based on the results will be evaluated the influence of each effect on the stresses distribution and deformations.

The analysis performed let conclude that a simplified model to study the behaviour of timber-concrete composite structures should take into account not only the materials creep but also the concrete shrinkage and the variation of moisture content, once the last two effects have a significant influence on the stresses distribution variation.

ÍNDICE GERAL

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract	iii
Índice geral	iv
Índice de figuras	vi
Índice de quadros	viii
Simbologia.....	ix
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento geral	1
1.2 Objetivos do trabalho	4
1.3 Organização da dissertação	5
2 Revisão bibliográfica e estado da arte.....	6
2.1 Introdução.....	6
2.2 Enquadramento histórico	6
2.3 Modelos de cálculo para estruturas mistas madeira-betão.....	8
2.4 Efeitos diferidos e termo-higrométricos em estruturas mistas madeira-betão	10
2.5 Ligações	14
3 Análise de estruturas mistas madeira-betão.....	20
3.1 Modelo simplificado do Eurocódigo 5	21
3.1.1 Rigidez efetiva à flexão.....	21
3.1.2 Tensões normais	22
3.1.3 Tensões tangenciais	23
3.1.4 Deformações.....	23
3.1.5 Comportamento diferido	24
3.2 Programa de Elementos Finitos – EvalS.....	27
3.2.1 Modelação	27
3.2.2 Análise de dados.....	30
3.2.3 Comportamento diferido	32
3.3 Verificações.....	33

3.3.1	Verificação dos Estados Limites Últimos	33
3.3.2	Verificação dos Estados Limites de Utilização	35
4	Caraterização da ponte mista madeira-betão em Quiaios.....	36
4.1	Materiais	36
4.1.1	Betão	36
4.1.2	Madeira	36
4.1.3	Ligação.....	37
4.2	Dimensões	37
4.3	Ações.....	40
4.3.1	Ações estáticas.....	40
4.3.2	Ações cinemáticas	42
4.4	Comportamento diferido	46
5	Análise de resultados.....	48
5.1	Introdução.....	48
5.2	EvalS vs EC5.....	48
5.3	Variação do teor de água na madeira.....	49
5.4	Ações estáticas vs Ações cinemáticas.....	50
5.5	Fluência do betão vs Fluência da madeira	51
5.6	Fluência da ligação	53
5.7	Fluência vs Variação do teor de água da madeira vs Retração do betão	54
5.8	Resultante dos efeitos diferidos e termo-higrométricos.....	54
5.9	Forças nos ligadores.....	56
6	Conclusão e recomendações para trabalhos futuros.....	58
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60
	ANEXO A - Resultados.....	A-1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Exemplo de um pavimento misto madeira-betão utilizado em estruturas de alvenaria na Europa; (a) viga principal; (b) viga secundária; (c) telhas de tijolo; (d) laje de betão; (e) malha de aço; (f) conetores de aço; (g) ganchos que ligam a camada de betão. Fonte: (Ceccotti 2002)	2
Figura 1.2 - Relação entre o peso próprio do pavimento e o vão da viga, para uma carga de serviço de $2,5 \text{ kN/m}^2$: (a) secção de madeira; (b) secção mista madeira-betão; (c) secção de betão. Fonte: (Ceccotti 2002)	3
Figura 1.3 - Ponte de Quiaios, 2005. Fonte: (Rodrigues, Providência e Dias 2010).....	4
Figura 2.1 – Ponte Vihantasalmi, Finlândia, 1999. Fonte: Flickr	7
Figura 2.2 - Comportamento elástico das ligações. Fonte: (Van der Linden 1999).....	9
Figura 2.3 - Desenvolvimento temporal dos coeficientes de fluência e da retração relacionada com os valores limite. Fonte: (Ulrike e Schänzlin s.d.)	13
Figura 2.4 - Influência da ação compósita. Fonte: (Ulrike e Schänzlin s.d.), em que ϵ_{cr} é a extensão provocada por fluência, ϵ_{el} é a extensão elástica e ϵ_{res} é a extensão total.....	14
Figura 2.5 - (a1) pregos, (a2) barras de aço coladas, (a3 e a4) parafusos, (b1) <i>split-rings</i> , (b2) placas dentadas, (b3) tubos de aço, (b4) placas metálicas, (c1) furos redondos na madeira e conetores, (c2) denteação e conetores, (c3) denteação e barras de aço pós-tensionadas, (c4) tábuas de madeira pregadas e placas de aço dispostas nos espaços criados, (d1) treliça de aço colada, (d2) placa de aço colada. Fonte: (Ceccotti 2002)	16
Figura 2.6 - Ensaio de (Dias 2005)	18
Figura 2.7 - Ensaio de (Döhner e Rautenstrauch 2006).....	18
Figura 2.8 - Ensaio de (Fragiacomo, Amadio e Macorini 2007).....	19
Figura 3.1 - Secção e distribuição de tensões. Fonte: (EN 1995 2003)	21
Figura 3.2 - Componentes da deformação a longo prazo. Fonte: (Branco e Cruz 2002)	24
Figura 3.3 - Método para determinação do coeficiente de fluência. Fonte: (EN 1992 2004).....	25
Figura 3.4 - Viga simplesmente apoiada. EvalS	27
Figura 3.5 - Elementos <i>beam</i> e respectivas secções. EvalS	28
Figura 3.6 - Ligações (libertações de esforço transversal). EvalS.....	29
Figura 3.7 - Apoio duplo. EvalS	29
Figura 3.8 - Apoio simples. EvalS	29
Figura 3.9 - Combinações de ações - EvalS	30
Figura 3.10 - Deformações na combinação de ações característica – EvalS	31

Figura 3.11 - Esforço axial na combinação de ações característica – EvalS	31
Figura 3.12 - Esforço transversal na combinação de ações característica – EvalS	31
Figura 3.13 - Momento fletor na combinação de ações característica - EvalS	31
Figura 4.1 - Esboço 3D do sistema estrutural.....	38
Figura 4.2 - Dimensões do sistema estrutural	38
Figura 4.3 - Dimensões da secção efetiva	39
Figura 4.4 – Posicionamento das ligações, em <i>mm</i>	39
Figura 4.5 - Ações permanentes	40
Figura 4.6 - Ações variáveis - carga de 50 kN/m	40
Figura 4.7 - Ações variáveis - carga de 4 kN/m ²	41
Figura 4.8 - Ações variáveis	41
Figura 4.9 - Gama de variação esperada para o teor de água de equilíbrio da madeira consoante o local de aplicação. Fonte: (LNEC-M9 1997)	45
Figura 4.10 - Relação entre variação do teor de água e a variação dimensional. Fonte: (LNEC- M9 1997)	45
Figura 5.1 - Tensões na secção mista para Estados Limites Últimos a curto e longo prazo, com os valores das tensões em N/mm ²	49
Figura 5.2 - Envolventes das tensões das análises da variação do teor de água na madeira, com os valores das tensões em N/mm ²	50
Figura 5.3 - Envolventes das tensões das análises das ações cinemáticas e das ações estáticas, com os valores das tensões em N/mm ²	51
Figura 5.4 - Deslocamentos a meio vão provocadas por ações cinemáticas e por ações estáticas, com os valores dos deslocamentos em mm	51
Figura 5.5 - Envolventes das tensões das análises a curto prazo e dos efeitos da fluência do betão e da madeira, com os valores das tensões em N/mm ²	52
Figura 5.6 - Deslocamentos a meio vão provocadas pelas ações estáticas tendo em conta os efeitos da fluência do betão e da madeira, com os valores dos deslocamentos em mm	53
Figura 5.7 - Envolventes das tensões das análises a curto prazo e dos efeitos da fluência da ligação, com os valores das tensões em N/mm ²	53
Figura 5.8 - Envolventes das tensões das análises dos efeitos da retração do betão, da variação de teor de água na madeira e das fluências dos materiais, com os valores das tensões em N/mm ²	54
Figura 5.9 - Envolventes das tensões das análises a curto prazo e dos efeitos diferidos e termo- higrométricos, com os valores das tensões em N/mm ²	55
Figura 5.10 - Deslocamentos a meio vão numa análise a curto prazo considerando apenas as ações estáticas e numa análise a longo prazo considerando as ações estáticas e cinemáticas, com os valores dos deslocamentos em mm	56
Figura 5.11 - Força nos ligadores, em kN, nas várias análises realizadas	57

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 4.1 - Propriedades do Betão C30/37. Fonte: Quadro 3.1, (EN 1992 2004).....	36
Quadro 4.2 - Propriedades do Madeira GL28h. Fonte: Tabela 1 (EN1194 1999)	37
Quadro 4.3 - Valores das ações afetadas pelos coeficientes de cada uma das combinações de ações, em kN/m	42
Quadro 4.4 - Valores das retrações do betão	44
Quadro 4.5 - Variações de temperaturas para simular efeito de variação do teor de água na madeira no programa de elementos finitos	46
Quadro 4.6 - Coeficientes de fluência e módulos de elasticidade e de escorregamento utilizados nas análises realizadas	46
Quadro 4.7 - Módulos de elasticidade/escorregamento afetados dos coeficientes de fluência	47
Quadro 5.1 - Deformações a curto e a longo prazo para Estados Limites de Serviço	49
Quadro A.1 - Tensões para análise a curto-prazo.....	A-1
Quadro A.2 - Deformações para análise a curto-prazo	A-1
Quadro A.3 - Tensões para análise a longo-prazo	A-1
Quadro A.4 - Deformações para análise a longo-prazo	A-2
Quadro A.5 - Tensões para análise do efeito da fluência do betão.....	A-2
Quadro A.6 - Deformações para análise do efeito da fluência do betão.....	A-2
Quadro A.7 - Tensões para análise do efeito da fluência da madeira.....	A-2
Quadro A.8 - Deformações para análise do efeito da fluência da madeira	A-3
Quadro A.9 - Tensões para análise do efeito da fluência da ligação	A-3
Quadro A.10 - Deformações para análise do efeito da fluência da ligação	A-3
Quadro A.11 - Tensões e deformações para análise do efeito da retração do betão	A-3
Quadro A.12 - Tensões e deformações para análise do efeito da variação do teor de água da madeira	A-4
Quadro A.13 – Tensões e deformações para análise dos efeitos diferidos e termo-higrométricos (sendo considerado o caso mais gravoso na variação do teor de água na madeira).....	A-4

SIMBOLOGIA

A	área
E	módulo de elasticidade
$E_{0,mean}$	valor médio do módulo de elasticidade paralelo às fibras da madeira
E_c	módulo de elasticidade do betão aos 28 dias
$E_{c,eff}$	módulo de elasticidade efetivo do betão
$(EI)_{ef}$	rigidez à flexão efetiva
$E_{t,eff}$	módulo de elasticidade efetivo da madeira
F	força
G_k	valor característico das ações permanentes
I	momento de inércia
K	módulo de escorregamento
M	momento fletor
N	esforço axial
Q_k	valor característico das ações variáveis
R_d	tensão resistente
T	temperatura
V	esforço transverso
a	distância
b_i	largura do componente i
f_{cd}	valor de cálculo da resistência do betão à compressão
f_{ck}	valor característico da resistência do betão à compressão
f_{ctm}	valor médio da tensão de rotura do betão à tração simples
f_{ctmd}	valor de cálculo da resistência do betão à tração
$f_{m,d}$	valor de cálculo da resistência da madeira à flexão
$f_{m,k}$	valor característico da resistência da madeira à flexão
$f_{t,0,d}$	valor de cálculo da resistência da madeira à tração na direção das fibras
$f_{t,0,k}$	valor característico da resistência da madeira à tração na direção das fibras
$f_{v,d}$	valor de cálculo da resistência ao corte da madeira
$f_{v,k}$	valor característico da resistência ao corte da madeira
h_i	altura do componente i
k_{def}	fator de deformação

k_{mod}	fator de correção para as classes de serviço e duração das ações
k_{ser}	módulo de escorregamento da ligação em estados limites de utilização
k_u	módulo de escorregamento da ligação em estados limites últimos
l	vão
s	espaçamento dos ligadores
u	deformação
y_G	posição do eixo neutro
α	coeficiente de dilatação térmica
γ	fator de redução
γ_G	coeficiente de majoração das ações permanentes
γ_M	coeficiente parcial de redução das propriedades do material
γ_Q	coeficiente de majoração das ações variáveis
ε_{ca}	retração autógena
ε_{cd}	retração por secagem
ε_{cs}	retração total
θ	rotação
ρ	peso volúmico
σ_i	tensão no componente i
τ	tensão tangencial
φ	coeficiente de fluência do betão
$\varphi_{(\infty,t0)}$	valor final do coeficiente de fluência
φ_{ef}	coeficiente de fluência efetivo
ψ_0	fator representativo do valor raro das ações variáveis
ψ_2	fator representativo do valor quase-permanente das ações variáveis

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento geral

As estruturas de madeira foram uma opção muito utilizada desde os tempos mais antigos. Nos dias de hoje, esta preferência resulta do aspecto estético destas e no reduzido impacto ambiental que estas provocam, uma vez que as emissões de dióxido de carbono são reduzidas, assim como a energia inerente ao material (Yeoh, et al. 2011). Este interesse pelas estruturas de madeira desencadeou uma procura do domínio das propriedades mecânicas e físicas deste material e uma investigação de novas soluções que tirem o máximo partido dos benefícios da madeira e que limitem as suas fraquezas.

Desta pesquisa surgiram os sistemas mistos madeira-betão, sendo esta uma tecnologia com bastante potencial uma vez que combina a resistência do betão à compressão com a resistência da madeira à tração. (Ceccotti 2002) afirma que a conceção de uma secção transversal constituída por madeira e betão possibilita uma ação composta e eficiente quando utilizadas ligações que limitam o escorregamento. Estes sistemas são usualmente compostos por uma laje de betão apoiada em vigas de madeira como é apresentado na Figura 1.1. Neste tipo de sistemas, ambos os materiais apresentam um comportamento compósito, garantido através de ligações adequadas, do qual resultam vantagens mecânicas em relação às estruturas de madeira e às estruturas de betão.

Em comparação com as estruturas de betão armado esta técnica de construção caracteriza-se por um peso próprio menor, tal como pode ser observado no gráfico da Figura 1.2, reduzindo assim as solicitações sobre as estruturas de suporte. A rapidez de construção também é outra vantagem, especialmente quando utilizada para pavimentos, existindo a possibilidade de utilizar o pavimento de madeira como cofragem perdida para a nova estrutura. Quando comparado com estruturas de madeira simples este tipo de sistema apresenta uma capacidade de carga até três vezes maior e a rigidez à flexão é ampliada até seis vezes (Ceccotti 2002). Estes sistemas mistos também são caracterizados por apresentarem um coeficiente de amortecimento mais elevado reduzindo as vibrações do pavimento, tantas vezes incomodativos para o utilizador. A resistência ao fogo também é um parâmetro que apresenta

desempenhos mais satisfatórios, uma vez que a laje superior de betão constitui uma eficiente barreira contra a propagação do mesmo (Ceccotti 2002). Em comparação com estruturas convencionais de madeira os sistemas mistos madeira-betão apresentam um melhor desempenho acústico para sons que se propagam pelo ar devido ao aumento da massa.

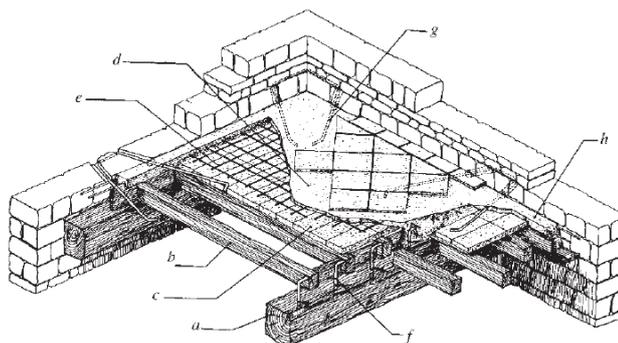


Figura 1.1 - Exemplo de um pavimento misto madeira-betão utilizado em estruturas de alvenaria na Europa; (a) viga principal; (b) viga secundária; (c) telhas de tijolo; (d) laje de betão; (e) malha de aço; (f) conectores de aço; (g) ganchos que ligam a camada de betão. Fonte: (Ceccotti 2002)

Apesar das vantagens indiscutíveis deste tipo de sistema misto, é necessário ter em conta alguns problemas que advêm deste funcionamento conjunto e que dificultam a expansão desta tecnologia. Uma das dificuldades mais significativas resulta do comportamento distinto da madeira, do betão e da ligação, não só a curto prazo mas também a longo prazo. Os fenómenos mais condicionantes para o desempenho das estruturas mistas madeira-betão a longo prazo são a fluência do betão, da madeira e da ligação, a retração no betão e a retração ou dilatação na madeira devido a variações das condições termo-higrométricas. Embora cada elemento da estrutura tenha o seu comportamento de fluência próprio, estes interagem entre si, uma vez que o efeito de fluência de um componente influi nos outros, conduzindo a uma transferência de tensões entre os elementos constituintes.

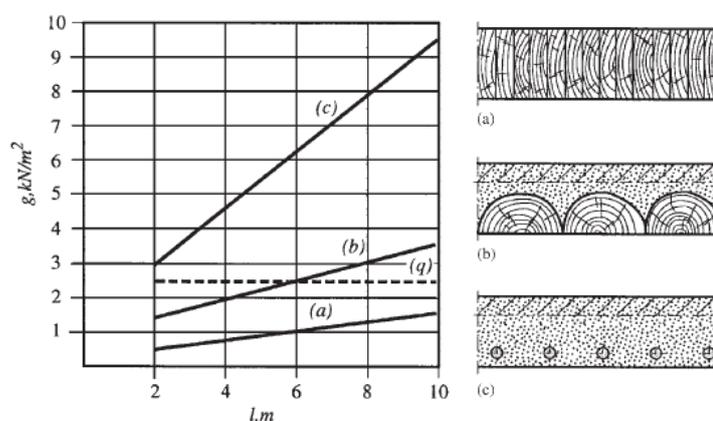


Figura 1.2 - Relação entre o peso próprio do pavimento e o vão da viga, para uma carga de serviço de $2,5 \text{ kN/m}^2$: (a) secção de madeira; (b) secção mista madeira-betão; (c) secção de betão. Fonte: (Ceccotti 2002)

As estruturas madeira-betão são usadas tanto em reabilitação de estruturas antigas de madeira como em estruturas novas. Esta opção estrutural é usualmente utilizada para pavimentos, mas também tem potencialidade para ser utilizada em paredes pré-fabricadas, devido à capacidade de carga no plano de camada de betão e contraventamento conferido pelos elementos de betão. Outras das aplicações destes sistemas compósitos são as pontes. Esta técnica ainda não está suficientemente divulgada e implementada no nosso país, mas já é uma prática usual noutros países. A utilização de estruturas de madeira-betão na construção de pontes tem várias vantagens. O uso de uma camada de betão sobre toda a extensão dos elementos de madeira limita o contacto destes com a água, contribuindo para aumentar a durabilidade da madeira e diminuir os efeitos causados pela variação de humidade na estrutura. Esta cobertura de betão também permite reduzir o impacto do contacto direto entre as rodas dos veículos e os elementos de madeira, evitando assim a sua deterioração. Apesar das vantagens da utilização deste tipo de sistemas mistos na construção de pontes; ainda existem importantes desafios no seu dimensionamento. Exemplos destes são as deformações diferenciais devido à retração do betão e à variação de humidade na madeira e a baixa capacidade de carga dos apoios atribuída a altos níveis de carga e à baixa resistência da madeira à compressão na direção perpendicular às fibras.

Em Portugal, os sistemas mistos madeira-betão são maioritariamente utilizados em reabilitações e reforço de estruturas antigas. Outra aplicação deste tipo de sistemas são as pontes rodoviárias, mas este tipo de construção ainda não está suficientemente implementada no nosso país. Apenas existe um caso de uma ponte mista madeira-betão, construída na

Estrada Florestal nº1 em Quiaios, Figueira da Foz, em 2005 (Figura 1.3), cujo estudo foi publicado no artigo *Timber-concrete practical applications – bridgecase study* (Dias, et al. 2011). Estudos anteriores sugerem que esta solução também pode ser utilizada em construções ou reconstruções de variados tipos de pontes, desde caminhos pedestres até auto-estradas sujeitas a níveis de tráfego elevados (Dias, et al. 2011).



Figura 1.3 - Ponte de Quiaios, 2005. Fonte: (Rodrigues, Providência e Dias 2010)

Este trabalho incidirá na análise dos efeitos diferidos e termo-higrométricos na estrutura mencionada anteriormente, a ponte mista madeira-betão em Quiaios.

1.2 Objetivos do trabalho

Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento a longo prazo de estruturas mistas madeira-betão, devido às divergências de comportamento dos materiais constituintes. Pretende-se analisar a influência de efeitos diferidos, como a retração no betão, a variação do teor de água na madeira e a fluência nos materiais, na distribuição de tensões na secção mista e nas deformações da estrutura global. Esta análise é efetuada para o caso concreto da ponte mista madeira-betão em Quiaios, utilizando duas metodologias: o modelo simplificado do Eurocódigo 5 e o programa de elementos finitos EvalS. Para além da análise da influência dos efeitos diferidos e termo-higrométricos, outro objetivo da dissertação será comparar os resultados obtidos pelos dois métodos utilizados.

1.3 Organização da dissertação

Nesta dissertação começa-se por apresentar várias investigações realizadas no âmbito da análise a longo prazo de estruturas mistas madeira-betão, expondo as principais conclusões e resultados que se podem obter destes estudos, relacionados com os assuntos aqui tratados.

De seguida são descritas as metodologias de análise de estruturas mistas que foram utilizadas neste estudo, fazendo uma exposição detalhada do modelo simplificado do Eurocódigo 5 e do modelo do programa de elementos finitos, EvalS. Neste capítulo são ainda descritas as ações estáticas e cinemáticas consideradas na análise.

No capítulo seguinte são apresentados os resultados obtidos para cada uma das análises, e discutidas as comparações entre a influência da retração no betão, a fluência de cada um dos materiais e a variação do teor de água na madeira.

Por fim, no último capítulo, são apresentadas as conclusões finais deste documento em relação aos resultados obtidos e às análises realizadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTADO DA ARTE

2.1 Introdução

As estruturas mistas madeira-betão têm sido cada vez mais usadas na área da construção. Nesse sentido a comunidade científica tem vindo a desenvolver vários trabalhos no sentido de acompanhar a evolução deste tipo de sistemas mistos. Um dos artigos mais recentes e relevantes nesta área é o *State of the Art on Timber-Concrete Composite Structures: Literature Review*, elaborado por Yeoh, D.; Fragiacom, M.; De Franceschi, M. e Heng Boon, K. (Yeoh, et al. 2011), onde constam os principais trabalhos desenvolvidos sobre este tema e respetivas conclusões. Para além de normas, publicações, teses de mestrado e de doutoramento desenvolvidas sobre esta tipologia estrutural, outras referências importantes na abordagem a este tema são o Eurocódigo 5 (EN 1995 2003).

2.2 Enquadramento histórico

Entre a Primeira (1914-1918) e a Segunda (1939-1945) Guerras Mundiais assistiu-se a uma escassez de aço, o que provocou o desenvolvimento de sistemas mistos madeira-betão na Europa em substituição dos sistemas convencionais de betão armado (Van der Linden 1999). Embora só nestas datas se tenha observado um crescimento mais significativo deste tipo de estruturas, existem estruturas mistas em Inglaterra que antecedem este período (Forti 2004).

Inicialmente foi patenteado por (Muller 1922) um sistema constituído por uma ligação de pregos e cintas de aço entre a laje de betão e as vigas de madeira. Seguiu-se em 1939 na Suíça, uma patente de (Schaub 1939) que utiliza perfis metálicos em Z e em I como sistema de ligação.

Até aos anos 70 não existem muitos relatos sobre investigação e desenvolvimento desta técnica. A partir deste período observou-se uma crescente utilização deste tipo de estruturas. As aplicações estruturais destes sistemas tinham como objetivo principal a reabilitação de edifícios antigos e de pavimentos, uma vez que os sistemas mais antigos não eram

dimensionados de acordo com os regulamentos mais recentes e era necessário colmatar as falhas existentes relativas à acústica e à resistência ao fogo. Outras das aplicações deste tipo de sistema misto eram a construção de novos pavimentos e a edificação de pontes. O interesse pelos sistemas mistos madeira-betão teve grande impacto na Europa, por exemplo em Itália (Turrini e Piazza 1983), nos Estados Unidos da América (Cook 1976), na Nova Zelândia (Cone 1963) e na Austrália, onde foi edificado o maior sistema misto numa ponte rodoviária (Benitez 2000).

Em 1984 surgiu a primeira publicação (Godycki, Pawlica e Kleszczewski 1984), sobre a reabilitação de pavimentos de madeira antigos adicionando uma laje de betão. Este procedimento foi muito utilizado na Polónia nos anos 80, uma vez que era bastante mais económico que os métodos de reabilitação alternativos.

Nas últimas décadas, a investigação realizada sobre as estruturas mistas madeira-betão tem resultado em soluções inovadoras e competitivas, possibilitando o aumento da construção de pontes, da melhoria de pavimentos existentes e da construção de novos edifícios (Natterer, Hamm e Favre 1996). Um dos exemplos mais simbólicos é a ponte Vihantasalmi (Figura 2.1), construída em 1999 na Finlândia, usando uma mistura de aço, madeira e betão. Esta ponte tem 168 metros de comprimento (3 vãos centrais de 42 metros cada um e dois elementos laterais de 21 metros) e o tabuleiro tem uma largura de 14 metros.



Figura 2.1 – Ponte Vihantasalmi, Finlândia, 1999. Fonte: Flickr

O aumento da investigação na área das estruturas mistas madeira-betão está relacionado com o aumento da sua utilização. Estas pesquisas procuram não só descobrir novas técnicas de aplicação para este tipo de sistemas mistos assim como também desenvolver o estudo dos seus aspetos mais condicionantes, dos quais é exemplo o comportamento a longo-prazo.

2.3 Modelos de cálculo para estruturas mistas madeira-betão

A análise de estruturas mistas madeira-betão é uma tarefa com alguma complexidade, uma vez que, normalmente, a interação entre os dois materiais é apenas parcial. Devido ao escorregamento relativo entre os dois materiais, a hipótese de Bernoulli da conservação das secções planas em flexão não é válida para a análise de estruturas mistas madeira-betão, logo não pode ser efetuada uma análise através da teoria clássica da flexão de vigas (Jorge 2005). Para além desta dificuldade acresce ainda o comportamento não-linear dos materiais a curto e a longo prazo.

Muitos têm sido os estudos que têm como objetivo desenvolver modelos de cálculo que simulem o comportamento das estruturas mistas madeira-betão, alguns dos quais apresentam-se de seguida.

(Van der Linden 1999) apresentou um modelo linear elástico, com base nos modelos de (Möhler 1956) e (Newmark, Siess e Viest 1951), cujos pressupostos são os seguintes:

- i) todos os materiais (betão, madeira e ligação) têm um comportamento linear até à rotura da viga de madeira, não sendo consideradas a fendilhação e a plastificação;
- ii) as ligações são espaçadas igualmente;
- iii) as ligações têm a mesma relação força/escorregamento. Esta relação é considerada linear elástica até à capacidade de carga da ligação e a partir deste ponto é definida como perfeitamente plástica. Neste modelo apenas é utilizada a parte elástica e não é definida a resistência última da ligação. Cada ligação é apenas definida pelo seu módulo de escorregamento, K (Figura 2.2);
- iv) as ligações atuam como uma ligação contínua;
- v) o esforço transversal na interface recai totalmente sobre o sistema de ligação, não sendo considerado o atrito entre madeira e betão.

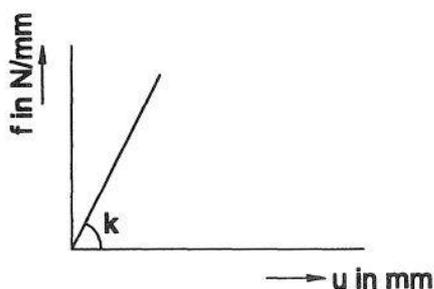


Figura 2.2 - Comportamento elástico das ligações. Fonte: (Van der Linden 1999)

(Ceccotti 2002) confirma que o modelo definido por Van der Linden se encontra do lado da segurança e é aplicável a problemas em que a verificação dos estados limites de utilização não é muito condicionante, como é o caso de estruturas de vãos médios/baixos expostas a ambientes com características pouco severas. Para soluções em que tal não se verifica, os fenómenos diferidos na estrutura mista madeira-betão são mais condicionantes e é aconselhável o uso de modelos mais precisos, como por exemplo modelos de elementos finitos.

Este modelo é o mais usado para este tipo de análise, sendo indicado no Anexo B do Eurocódigo 5, Parte 1-1.

No caso de estruturas mistas madeira-betão, o dimensionamento dos componentes deve respeitar os pressupostos referidos não só no anexo B do Eurocódigo 5 como também as indicações previstas no Eurocódigo 2 (EN 1992 2004) para a verificação da segurança relativa ao elemento de betão.

No método descrito no Eurocódigo 5 utiliza-se uma rigidez à flexão efetiva, $(EI)_{ef}$, que considera a ação compósita entre as superfícies de madeira e de betão através de um fator de redução γ que varia entre 0 (quando não existe ação mista entre os dois materiais) e 1 (quando a ação entre os dois materiais é perfeita):

$$(EI)_{ef} = E_1 I_1 + E_2 I_2 + \gamma_1 E_1 A_1 a_1^2 + \gamma_2 E_2 A_2 a_2^2 \quad (1)$$

onde 1 e 2 referem-se aos elementos de betão e madeira, respetivamente, E é o módulo de elasticidade do material, A é a área da secção transversal, I é o segundo momento da área da

secção transversal, a é a distância do centro geométrico do elemento ao eixo neutro da secção mista e γ é o fator de redução referente à ligação. É possível através deste módulo efetivo calcular os esforços máximos para os elementos de madeira e betão.

Também existe uma solução elasto-plástica desenvolvida por (Frangi e Fontana 2003). Este modelo foi desenvolvido para casos em que a rotura da estrutura mista acontece após a plastificação dos ligadores, o que normalmente acontece quando se tratam de ligadores de baixa resistência e elevada ductilidade.

Outro procedimento que pode ser utilizado na análise a curto e longo prazo deste tipo de estruturas é o método dos elementos finitos. Relativamente às vigas mistas madeira-betão, em (Fragiacomo, Amadio e Macorini 2004) e (Fragiacomo 2005) é definido um modelo unidimensional de elementos finitos para análises não-lineares de rotura e de longo prazo. Este modelo é constituído por dois elementos viga paralelos, que representam a laje de betão e a viga de madeira, ligados na sua interface por um sistema que tem em conta a rigidez da ligação.

Modelos tridimensionais de análise a longo prazo de estruturas mistas madeira-betão foram implementadas no Abaqus por (Chassagne, et al. 2006) e (To 2008). Em relação a análises não-lineares de curto prazo foram implementados modelos tridimensionais no Abaqus e no Ansys por (Dias, Van de Kuilen e Lopes, et al. 2007) e (Aldi 2008), respetivamente. Da comparação entre modelos unidimensionais e tridimensionais concluiu-se que são alcançados valores semelhantes para ambos, tendo o modelo unidimensional a vantagem de ser menos complexo e requerer menos tempo de análise computacional (Yeoh, Fragiaco, et al. 2011).

2.4 Efeitos diferidos e termo-higrométricos em estruturas mistas madeira-betão

Os efeitos diferidos da madeira e do betão relacionam-se com o comportamento a longo prazo destes, quantificados através da fluência de ambos os materiais e da retração do betão. Os efeitos termo-higrométricos são estudados para o elemento de madeira, tendo em conta a variação do teor de água no mesmo.

O estudo do comportamento a longo prazo dos sistemas mistos madeira-betão para além de ser bastante complexo e de requerer uma cuidada análise de resultados, também exige quantias monetárias bastante avultadas para os ensaios laboratoriais.

Para analisar o comportamento a longo prazo é necessário ter em conta os efeitos diferidos e as variações termo-higrométricas do betão, da madeira e das ligações. A camada de betão é a mais afectada pelas variações de temperatura e a madeira pelas variações de humidade. Estas variações apenas vão ter influência significativa para ligações muito rígidas e para elementos mais longos (STEP 1995). As variações dimensionais no betão podem contribuir para um melhor desempenho das ligações, por exemplo, quando o betão retrai a redução do comprimento da laje de betão diminui as deformações e aumenta as deformações de flexão na viga.

Apesar de existirem alguns algoritmos sofisticados que permitem modelar os efeitos de fluência, na prática de dimensionamento são utilizadas formulações mais simplificadas, sendo o modelo mais usual o Método do Módulo Efetivo sugerido por (Ceccotti 2002). Este método tem como objetivo modificar a rigidez dos componentes de modo a converter um problema visco-plástico com equações diferenciais num problema elástico com equações lineares mais simples. Para tal afeta-se o módulo de elasticidade dos materiais, E , e o módulo de escorregamento, K , do coeficiente de fluência respetivo, φ e k_{def} .

$$E_{c,eff} = \frac{E_c}{1+\varphi_c} \quad (2)$$

$$E_{t,eff} = \frac{E_{0,mean}}{1+k_{def}} \quad (3)$$

$$K_{eff} = \frac{K}{1+2k_{def}} \quad (4)$$

em que E_c e $E_{0,mean}$ são os módulos de elasticidade do betão aos 28 dias e da madeira aquando do início do carregamento, respetivamente; $E_{c,eff}$ e $E_{t,eff}$ são os módulos de elasticidade efetivos do betão e da madeira, respetivamente; K e K_{eff} são o módulo de rigidez da ligação aquando do início do carregamento e o módulo de rigidez da ligação, respetivamente; φ_c e k_{def} são os coeficientes de fluência do betão e da madeira, respetivamente.

Embora o Método do Módulo Efetivo seja o mais utilizado, este não tem em conta os efeitos dos esforços causados pelas variações de dimensões dos elementos de betão e de madeira devidos a retração do betão e retração/dilatação da madeira, resultando numa subestimação das deformações no final da vida útil da estrutura.

(Fragiacomo 2006), de modo a colmatar este problema, desenvolveu soluções mais complexas mas igualmente mais rigorosas, considerando os efeitos de estirpe ambiental e da retração do betão nas vigas mistas madeira-betão.

Seguem-se alguns estudos, que foram realizados através de ensaios laboratoriais, no âmbito da avaliação dos efeitos diferidos e das variações termo-higrométricas nas estruturas mistas madeira-betão.

(Ceccotti, Fragiaco e Giordano 2006) ensaiaram uma viga com duplo vão com 6 metros apoiado em vigas T. As vigas foram carregadas e descarregadas por duas vezes antes de serem sujeitas à realização do teste de colapso. Este teste de colapso devido à flexão foi monitorizado ao longo de 5 anos. A viga entrou em colapso com um comportamento rígido quando atingida a tensão de cedência na madeira, ao aplicar-se uma carga 2,44 vezes maior que a carga prevista no dimensionamento. Foi observada uma eficiência da ação mista de 87-93%. Também realizou um ensaio de longo prazo numa viga mista madeira-betão exposta a condições ambientais exteriores durante 5 anos. A deformação a meio vão aumentou nos dois primeiros anos com variação da deformação, escorregamento relativo, tensões, teor de humidade, temperatura e humidade relativa do ar durante os 5 anos de monitorização. Os resultados experimentais deste ensaio foram comparados com os regulamentos expostos no Eurocódigo 5. Verificou-se que a deformação a meio vão aumentou maioritariamente nos dois primeiros anos e que o valor final do deslocamento a meio vão era muito inferior ao limite imposto pelos regulamentos. Por sua vez, o escorregamento nos apoios aumentou sempre ao longo dos anos. Tanto os valores da deformação como do escorregamento variaram ao longo do ano e diariamente devido às variações das condições ambientais. Concluiu-se ainda que os procedimentos analíticos do Eurocódigo 5 subestimam os efeitos diferidos uma vez que existem fenómenos, como a retração do betão, que são desprezados.

(Yeoh 2010) testou 3 vigas mistas madeira-betão constituídas por LVL (*laminated veneer lumber*). Duas das vigas tinham uma ligação feita com entalhes recortados no LVL e reforçadas com parafusos, numa utilizou betão normal e na outra betão de baixa retração. A terceira viga utilizou também betão de baixa retração e uma ligação de placas metálicas dentadas pressionadas na superfície lateral do LVL. Trinta e seis dias após a colocação do betão aplicou a carga correspondente à combinação de ações quase-permanente. Após um ano de monitorização verificou-se que a viga constituída por betão normal apresentava uma deformação a meio vão 20% maior que as duas vigas em que se utilizou betão de baixa retração. Embora as duas vigas constituídas por betão de baixa retração tivessem ligações

diferentes (com coeficientes de fluência de 0,54 e 2,81), verificou-se que as deformações a meio vão observadas eram idênticas. Deste estudo concluiu-se que o coeficiente de fluência da ligação não tem um efeito significativo na deformação de vigas mistas madeira-betão. Para minimizar as deformações a longo prazo das estruturas mistas madeira-betão, devem ser reduzidas as deformações iniciais. Tal pode ser feito através de vários métodos, como por exemplo aplicando uma contra-flecha na viga antes de ser aplicada a carga ou utilizando betão de baixa retração.

(Ulrike e Schänzlin s.d.), através de ensaios realizados, concluíram que o betão atinge cerca de 90% do seu valor máximo de fluência dentro dos primeiros 3 a 7 anos, enquanto os valores de fluência da madeira atingem apenas os 50% (Figura 2.3).

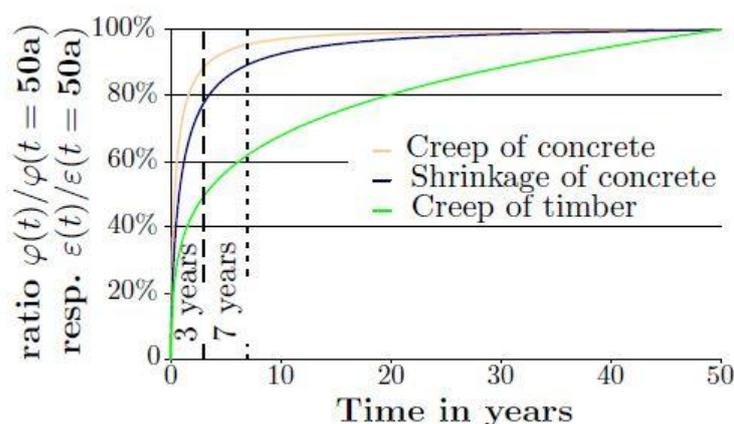


Figura 2.3 - Desenvolvimento temporal dos coeficientes de fluência e da retração relacionada com os valores limite. Fonte: (Ulrike e Schänzlin s.d.)

Durante o período de retração, o elemento de betão diminui o seu comprimento, conduzindo a uma curvatura positiva na estrutura, provocando o aumento das deformações e dos momentos fletores na secção, a diminuição dos esforços internos no betão e a diminuição de cargas na ligação que leva a um aumento dos esforços na madeira. Desta condição resulta que a não consideração da retração no betão é uma solução que não se encontra do lado da segurança, no que se refere a deformações e esforços na secção a longo prazo. Após os primeiros 3 a 7 anos, a retração na madeira devido à fluência influi na estrutura de forma inversa, ou seja, diminui a deflexão. Para uma correta construção é necessário colocar a madeira em obra com um teor de água correspondente ao teor de água de equilíbrio com as condições ambientais

espectáveis e devido a este fator, a retração prevista na madeira terá uma amplitude menor que a retração que poderá ocorrer no betão. No entanto esta retração na madeira, devido a secagem, deve ser subvalorizada se ocorrer no mesmo sentido que a do betão. O comportamento compósito da estrutura pode ser resumido no esquema apresentado na Figura 2.4.

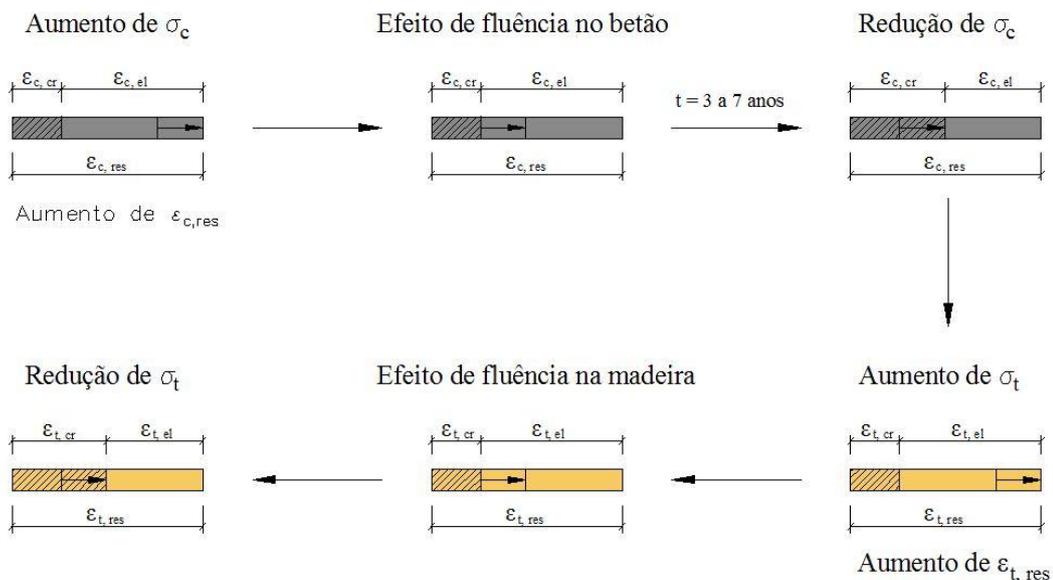


Figura 2.4 - Influência da ação compósita. Fonte: (Ulrike e Schänzlin s.d.), em que ε_{cr} é a extensão provocada por fluência, ε_{el} é a extensão elástica e ε_{res} é a extensão total

2.5 Ligações

O desempenho deste tipo de sistema misto depende de forma significativa das características da ligação, pois devido às diferenças nas propriedades mecânicas e nos comportamentos termo-higrométricos da madeira e do betão a junção destes dois materiais nem sempre é fácil. A ligação tem como função transmitir forças de equilíbrio entre os elementos, produzindo esforços axiais de tração no elemento de madeira e de compressão no elemento de betão. A eficiência estrutural de uma viga mista madeira-betão, que depende fortemente da rigidez do sistema de ligação. Esta pode ser determinada através da seguinte fórmula generalizada dada por (Gutkowski, Balogh e To 2010):

$$E(\%) = \frac{\Delta_{NC} - \Delta_{PC}}{\Delta_{NC} - \Delta_{FC}} \cdot 100 \quad (5)$$

em que Δ é a deformação a meio vão e os índices *NC*, *PC* e *FC* referem-se a ligação não rígida, parcialmente rígida e rígida, respetivamente.

Existe uma grande variedade de sistemas de ligação de uma laje de betão e uma viga de madeira, cujas características e desempenhos estruturais diferem, igualmente bastante. Assim, para determinar a rigidez e a resistência de um determinado sistema de ligação e proceder à sua caracterização é necessário realizar ensaios ou usar modelos numéricos a esse sistema de ligação, sendo a primeira quantificada pelo módulo de escorregamento quando a amostra se encontra sujeita a uma carga elástica, geralmente 40% da carga máxima, e a última quantificada pela carga máxima a que a ligação consegue resistir.

Ceccotti (STEP 1995) apresenta vários tipos de ligação agrupados de acordo com a sua rigidez ou módulo de escorregamento (Figura 2.5). Não é possível obter uma ligação completamente rígida através de ligadores mecânicos, discretos ou contínuos, esta apenas é alcançada através da colagem (Jorge 2005).

Foram realizados diversos estudos para o desenvolvimento de sistemas mistos com recurso a ligações coladas, tendo sido obtidos desempenhos bastante interessantes, que necessitam de ser confirmados em estudos de longo prazo. Nos estudos de (Negrão, Maia de Oliveira, et al. 2010) concluiu-se que as capacidades de carga de ligações de pregos e através de colagem são semelhantes, mas as últimas apresentam maior rigidez e, conseqüentemente, menores deformações.

Para vigas mistas madeira-betão um dos sistemas que tem um melhor desempenho em relação à resistência e à rigidez é o entalhe cortado na madeira reforçado com um parafuso ou cavilha metálica, embora esta não seja a solução mais vantajosa em termos económicos (Kuhlmann e Schänzlin 2001).

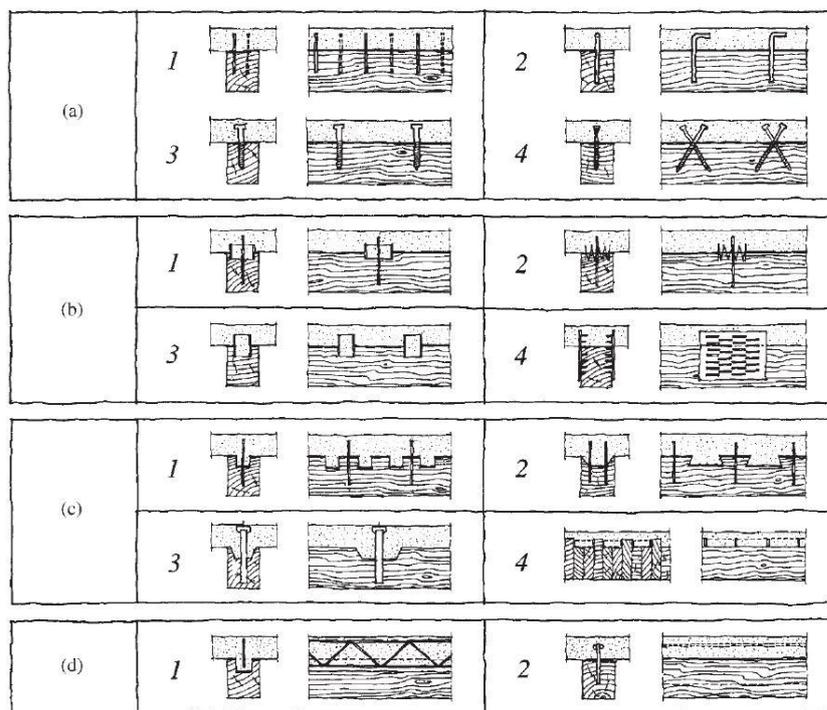


Figura 2.5 - (a1) pregos, (a2) barras de aço coladas, (a3 e a4) parafusos, (b1) *split-rings*, (b2) placas dentadas, (b3) tubos de aço, (b4) placas metálicas, (c1) furos redondos na madeira e conetores, (c2) denteação e conetores, (c3) denteação e barras de aço pós-tensionadas, (c4) tábuas de madeira pregadas e placas de aço dispostas nos espaços criados, (d1) treliça de aço colada, (d2) placa de aço colada. Fonte: (Ceccotti 2002)

Numa viga mista madeira-betão os ligadores estão posicionados ao longo desta conforme o esforço transversal atuante, ou seja, devem estar concentrados nos apoios onde o valor do esforço transversal é máximo e espaçados proporcionalmente à diminuição deste. (Yeoh, Fragiaco, et al. 2011).

Não existem modelos específicos para análise do comportamento a longo-prazo de ligações mistas madeira-betão. De acordo com o Eurocódigo 5 (EN 1995 2003), para alguns tipos de ligações a capacidade de carga última deve ser calculada utilizando os modelos existentes neste regulamento para ligações madeira-madeira, considerando as propriedades da madeira quer para elementos de madeira quer para elementos de betão. O resultado desse modelo deve ser multiplicado por 1,2 para obter a capacidade de carga última para a ligação madeira-betão.

Uma das propriedades mais importantes das ligações em termos de longo prazo é o coeficiente de fluência da ligação, o qual pode ser determinado através da seguinte equação:

$$\varphi(t) = \frac{\Delta(t) - \Delta_{el}}{\Delta_{el}} \quad (6)$$

em que $\Delta(t)$ é o escorregamento relativo da ligação no tempo t , Δ_{el} é o escorregamento elástico instantâneo imediatamente depois da aplicação da carga.

(Bonamini, Ceccotti e Uzielli 1990) realizaram ensaios de ligações em condições de humidade relativa controlada e variável, verificando-se o significativo aumento do coeficiente de fluência devido à variação de humidade.

(Capozucca 1998) avaliou a perda de esforço que poderia ocorrer nas ligações, em madeira protegida e não protegida, tanto em caso de elevados teores de humidade como em condições de variação de temperatura e de humidade. Durante os testes verificou-se que a variação da humidade relativa do ambiente afeta diretamente as tensões numa ligação inserida em madeira não protegida, um aumento ou redução da humidade conduz a uma redução ou aumento da tensão na ligação. Concluiu-se que uma ligação em madeira protegida não é afetada significativamente pelas variações de humidade.

(Kuhlmann e Michelfelder 2004) realizaram ensaios em entalhe, onde foram determinados coeficientes de fluência, após 8 meses de carga, tendo-se obtido valores de 0,44, 0,53 e 0,56 para entalhes com parafusos de cabeça hexagonal, com parafusos de auto-perfuração e para entalhes sem parafusos, respetivamente.

(Dias 2005) realizou ensaios sob condições climáticas controladas e não controladas e concluiu-se que, após 285 dias, para todos os tipos de ligações testados, os coeficientes de fluência em condições climáticas não controladas eram, aproximadamente o dobro das condições controladas. Também foram realizados para ligações com três diferentes tipos de betão, e observou-se que para betão normal o coeficiente de fluência, ao fim do tempo referido, era cerca de 0,487, para betão de alta resistência era de 0,625 e para betão de agregados leves era de 1,005 (Figura 2.6).



Figura 2.6 - Ensaio de (Dias 2005)

(Döhler e Rautenstrauch 2006) testaram nove amostras, três para cada tipo de ligação, compostas por duas lajes de betão e um elemento de madeira no interior. As ligações ensaiadas foram entalhes, ligações verticais e ligações inclinadas em forma de X. As amostras foram colocadas no exterior sob condições de classe de serviço 2 de acordo com o Eurocódigo 5. Após 120 dias de monitorização observou-se que o escorregamento elástico aumentou cerca de 10-24% (Figura 2.7).



Figura 2.7 - Ensaio de (Döhler e Rautenstrauch 2006)

(Fragiacomo, Amadio e Macorini 2007) realizaram ensaios em ligadores Tecnaria[®] que permitiram concluir que o sistema de ligação é influenciado pelo comportamento higrométrico da interface entre a madeira e a ligação. Estimou-se que ao fim de 50 anos o coeficiente de fluência para condições de humidade relativa constante era 0,5 e para condições com variação de humidade era 2 (Figura 2.8).



Figura 2.8 - Ensaio de (Fragiacomo, Amadio e Macorini 2007)

Mais recentemente (Dias e Van de Kuilen 2011) realizaram ensaios que permitiram determinar o efeito da fluência no comportamento a longo-prazo de ligações madeira-betão. Uma vez que na análise dos resultados dos testes verificou-se que os valores dos coeficientes de fluência são sensíveis às condições ambientais e às deformações instantâneas. A análise dos resultados permitiu concluir que para uma ligação madeira-betão exposta a uma classe de serviço 1 os valores obtidos pelo Eurocódigo 5 são aceitáveis, mas se for considerada uma classe de serviço 2 obtém-se uma solução não-conservativa relativamente a deformações a longo-prazo.

3 ANÁLISE DE ESTRUTURAS MISTAS MADEIRA-BETÃO

A análise de estruturas mistas madeira-betão pode ser feita de acordo com a teoria clássica de flexão de vigas quando a ligação tem um comportamento rígido, sendo apenas necessário homogeneizar a secção num só material e aplicar as equações básicas da resistência dos materiais. Quando estamos perante uma ligação com comportamento semi-rígido a hipótese de Bernoulli de conservação das secções planas em flexão deixa de ser válida, pois existe escorregamento relativo entre os dois materiais.

Desde há muito que existem metodologias que permitem considerar esse comportamento semi-rígido da ligação. Para além do modelo simplificado do Anexo B do Eurocódigo 5, 1-1 descrito anteriormente, também é apresentado na ficha E13 do (STEP 1995) um procedimento que descreve o comportamento de uma viga mista madeira-betão com ligações semi-rígidas e os parâmetros a ter em conta para o seu dimensionamento. Outra metodologia simplificada bastante utilizada para analisar os efeitos diferidos dos materiais é o Método do Módulo Efetivo, que consiste na afetação dos módulos de elasticidade dos materiais e do módulo de escorregamento da ligação por coeficientes de fluência dos respetivos materiais (Jorge 2005). Hoje em dia são os programas de análise de estruturas pelo método dos elementos finitos que mais são utilizados devido à sua simplicidade e exatidão.

Nesta dissertação serão utilizadas duas metodologias: o procedimento sugerido no Anexo B do Eurocódigo 5, combinado com as indicações específicas da ficha E13 do (STEP 1995), e a análise através de um programa de elementos finitos (EvalS, v.3.6.1 – Setembro 2012).

Neste trabalho pretende-se estudar os efeitos diferidos e termo-higrométricos nas estruturas mistas madeira-betão em termos de tensões e deslocamentos. Neste capítulo descrevem-se as análises realizadas para o estudo desses efeitos no caso concreto da ponte mista construída na Estrada Florestal nº1 em Quaios.

3.1 Modelo simplificado do Eurocódigo 5

Para colmatar a complexidade do dimensionamento nos casos em que a ligação tem um comportamento semi-rígido, o Eurocódigo 5 apresenta um modelo simplificado (Figura 3.1) que se baseia no cálculo da rigidez efetiva à flexão e na distribuição de tensões determinada em função da rigidez da ligação.

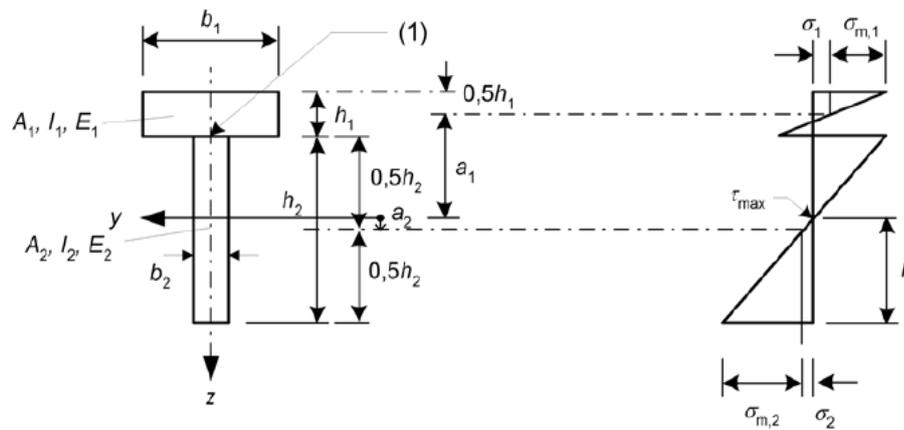


Figura 3.1 - Secção e distribuição de tensões. Fonte: (EN 1995 2003)

Seguem-se as equações necessárias para determinar a solução através deste modelo.

3.1.1 Rigidez efetiva à flexão

Para ter em conta as diferentes rigidezes à flexão dos materiais constituintes da estrutura determina-se uma rigidez efetiva à flexão, $(EI)_{ef}$, através de uma ponderação definida pela seguinte expressão:

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^2 (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) \quad (7)$$

utilizando valores característicos para E_i e sendo A_i a área do material i , dada por

$$A_i = b_i h_i \quad (8)$$

I_i o momento de inércia do material i em relação ao seu eixo neutro, determinado por:

$$I_i = \frac{b_i h_i^3}{12} \quad (9)$$

Considera-se que:

$$\gamma_2 = 1 \quad (10)$$

$$\gamma_1 = [1 + \pi^2 E_1 A_1 s / (Kl^2)]^{-1} \quad (11)$$

em que s é o valor do espaçamento entre ligadores, que de acordo com o Eurocódigo 5 deve ser um valor constante, $s_{eq} = 0,75 \cdot s_{min} + 0,25 \cdot s_{máx}$; $K = K_{ser}$ para cálculo dos Estados Limites de Utilização; $K = K_u = \frac{2}{3} K_{ser}$ para cálculo dos Estados Limites Últimos, onde K_{ser} é o módulo de escorregamento da ligação.

3.1.2 Tensões normais

Em seguida determina-se a distribuição de tensões normais devidas à flexão na secção mista, calculando os valores extremos das tensões axiais e de flexão nos dois materiais:

$$\sigma_i = \frac{\gamma_i E_i a_i M}{(EI)_{ef}} \quad (12)$$

$$\sigma_{m,i} = \frac{0,5 \cdot E_i h_i M}{(EI)_{ef}} \quad (13)$$

sendo M o valor de cálculo do momento fletor atuante, determinado pela expressão da resistência dos materiais para uma viga simplesmente apoiada de vão l , sujeita a um carregamento uniformemente distribuído Q e uma carga pontual P aplicada a meio vão:

$$M = \frac{Ql^2}{8} + \frac{Pl}{4} \quad (14)$$

Através dos valores de σ_i e $\sigma_{m,i}$ é possível determinar as tensões no topo e na base das secções de betão e de madeira através das seguintes expressões:

$$\sigma_{c,topo} = \sigma_1 + \sigma_{m,1} \quad (15)$$

$$\sigma_{c,base} = \sigma_1 - \sigma_{m,1} \quad (16)$$

$$\sigma_{t,topo} = \sigma_2 - \sigma_{m,2} \quad (17)$$

$$\sigma_{t,base} = \sigma_2 + \sigma_{m,2} \quad (18)$$

sendo $\sigma_{c,topo}$ e $\sigma_{c,base}$ as tensões no topo e na base da secção de betão, respetivamente, e $\sigma_{t,topo}$ e $\sigma_{t,base}$ as tensões no topo e na base da secção de madeira, respetivamente.

3.1.3 Tensões tangenciais

Para o cálculo das tensões tangenciais admite-se que apenas a madeira resiste ao esforço transversal, sendo o valor máximo destas tensões dado por:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{m\acute{a}x}}{A_2} \quad (19)$$

sendo A_2 a área da secção transversal do elemento de madeira; $V_{m\acute{a}x}$ o valor de cálculo do esforço transversal, determinado pela equação da resistência dos materiais para uma viga simplesmente apoiada de vão l , sujeitas a um carregamento uniformemente distribuído Q e uma carga pontual P aplicada a meio vão:

$$V_{m\acute{a}x} = \frac{Ql}{2} + \frac{P}{2} \quad (20)$$

3.1.4 Deformações

Segundo o Eurocódigo 5, as deformações do sistema estrutural vão ter contribuições instantâneas e diferidas, sendo subdivididas nas resultantes das ações permanentes e nas provocadas pelas ações variáveis.

A deformação instantânea, u_{inst} é quantificada pela seguinte expressão da resistência dos materiais:

$$u_{inst} = \frac{5 \cdot Ql^4}{384 \cdot (EI)_{serv}} \quad (21)$$

em que l é o valor do vão da viga simplesmente apoiada; Q é o carregamento atuante nesta; $(EI)_{serv}$ é o valor da rigidez à flexão efetiva da secção mista para estados limite de utilização, determinada de acordo com a expressão (7).

O valor da deformação final aparente determina-se a partir da seguinte expressão:

$$u_{net,fin} = u_{1,fin} + u_{2,fin} - u_0 \quad (22)$$

onde $u_{1,fin}$ e $u_{2,fin}$ são as deformações finais devidas às cargas permanentes e às cargas variáveis, respetivamente, e u_0 é o valor da contra-flecha, que neste estudo não se vai considerar (Figura 3.2).

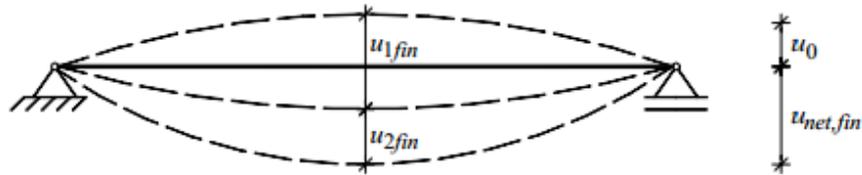


Figura 3.2 - Componentes da deformação a longo prazo. Fonte: (Branco e Cruz 2002)

É ainda possível determinar o valor da rotação nos apoios através da seguinte expressão da resistência dos materiais para uma viga simplesmente apoiada de vão l , sujeita a um carregamento uniformemente distribuído Q :

$$\theta_{\text{apoio}} < \frac{Ql^3}{24 \cdot (EI)_{\text{serv}}} \quad (23)$$

em que $(EI)_{\text{serv}}$ é o valor da rigidez à flexão efetiva da secção mista para estados limite de utilização.

Os cálculos das deformações e das rotações a longo prazo são em tudo iguais aos cálculos da deformação e rotação instantâneas, sendo apenas atualizada a rigidez efetiva à flexão para o valor desta numa análise a longo prazo.

3.1.5 Comportamento diferido

Para ter em conta os efeitos diferidos como a fluência ou a retração dos materiais, os Eurocódigos relativos aos dois materiais em estudo (betão e madeira) apresentam coeficientes que quantificam esses efeitos.

No caso do betão, o módulo de elasticidade a longo prazo é determinado a partir da seguinte expressão do (STEP 1995):

$$E_{1,fin} = E_1 \left[\frac{c_1}{(1+\varphi_{\infty,t0})} + \frac{c_2}{(1+\varphi_{ef})} \right] \quad (24)$$

em que E_1 é o módulo de elasticidade a curto prazo do betão; c_1 é a relação entre as cargas permanentes e a carga total; c_2 é a relação entre as cargas variáveis e a carga total, $\varphi_{\infty,t0}$ é o coeficiente de fluência para cargas permanentes; φ_{ef} é o coeficiente de fluência para cargas quase-permanentes.

Estes coeficientes de fluência são estabelecidos segundo o Eurocódigo 2, 1-1. O coeficiente de fluência para cargas permanentes é determinado através da Figura 3.3, tomando neste caso o valor de 1,865.

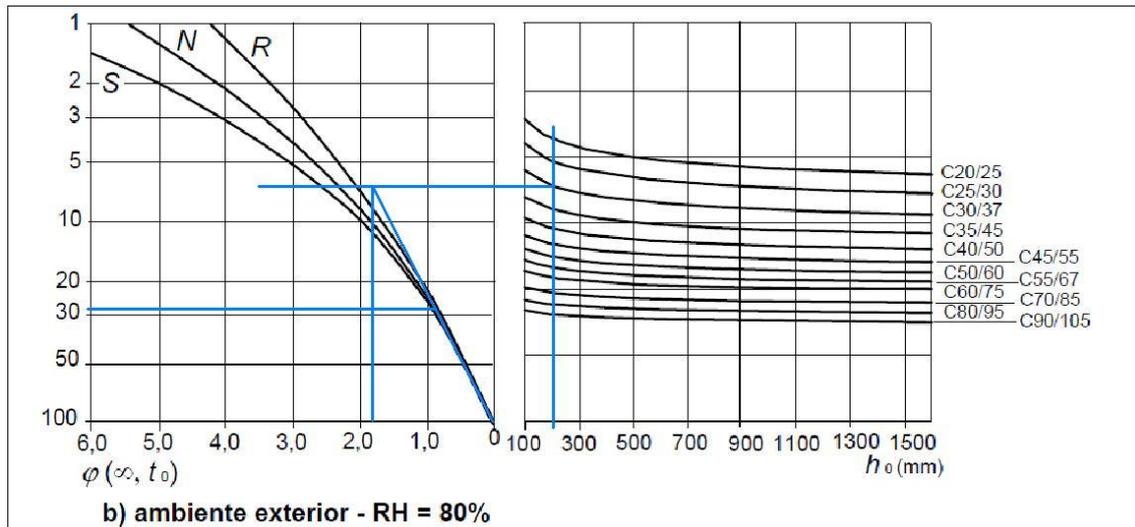


Figura 3.3 - Método para determinação do coeficiente de fluência. Fonte: (EN 1992 2004)

Para ter em conta a duração do carregamento, segundo o Eurocódigo 2, 1-1, determina-se um coeficiente de fluência efetivo, φ_{ef} , que utilizado em conjunto com a ação de cálculo produz uma deformação por fluência correspondente à ação quase-permanente:

$$\varphi_{ef} = \varphi_{(\infty, t_0)} \cdot \frac{M_{0Eqp}}{M_{0Ed}} \quad (25)$$

em que $\varphi_{(\infty, t_0)}$ é o coeficiente de fluência para ações permanentes determinado anteriormente; M_{0Eqp} é o momento fletor de primeira ordem na combinação de ações quase-permanente; M_{0Ed} é o momento fletor de primeira ordem na combinação de ações fundamental.

Em relação ao elemento de madeira, o cálculo do módulo de elasticidade a longo prazo é semelhante ao do betão, dado por:

$$E_{2,fin} = E_2 \left[\frac{c_1}{(1+k_{def,g})} + \frac{c_2}{(1+k_{def,q})} \right] \quad (26)$$

em que E_2 é o módulo de elasticidade a curto prazo da madeira; $k_{def,g}$ é o fator de cálculo das deformações finais para cargas permanentes, sendo o seu valor igual a k_{def} ; $k_{def,q}$ é o fator de cálculo das deformações finais para cargas variáveis. Esta última parcela é determinada pela seguinte expressão:

$$k_{def,q} = \psi_2 k_{def} \quad (27)$$

em que ψ_2 é o coeficiente para a determinação do valor quase-permanente de uma ação variável e k_{def} é o fator de cálculo para as deformações finais.

Na Tabela 3.2 do Eurocódigo 2, 1-1 encontram-se os valores para k_{def} . No caso deste estudo, para madeira lamelada colada e uma classe de serviço 2, o fator k_{def} toma o valor de 0,8.

Relativamente à ligação, o cálculo do valor corrigido do módulo de escorregamento é análogo ao procedimento utilizado para o betão e para a madeira. Assim sendo, em análises a longo prazo tem-se:

$$K_{u,fin} = K_u \left[\frac{c_1}{(1+k_{def,g,ligação})} + \frac{c_2}{(1+k_{def,q,ligação})} \right] \text{ para ELU} \quad (28)$$

$$K_{ser,fin} = K_{ser} \left[\frac{c_1}{(1+k_{def,g,ligação})} + \frac{c_2}{(1+k_{def,q,ligação})} \right] \text{ para ELS} \quad (29)$$

De acordo com o Eurocódigo 5, se a ligação é feita entre dois elementos com diferentes comportamentos diferidos, os valores de $k_{def,g,ligação}$ e de $k_{def,q,ligação}$ devem ser definidos pelas seguintes expressões:

$$k_{def,g,ligação} = 2\sqrt{k_{def,g} \cdot \varphi_{\infty,t0}} \quad (30)$$

$$k_{def,q,ligação} = 2\sqrt{k_{def,q} \cdot \varphi_{ef}} \quad (31)$$

em que $k_{def,g}$ e $k_{def,q}$ são os fatores de cálculo das deformações finais para cargas permanentes e para cargas variáveis, respetivamente, do elemento de madeira; $\varphi_{\infty,t0}$ e φ_{ef} são os coeficientes de fluência para ações permanentes e para ações variáveis, respetivamente, do elemento de betão.

3.2 Programa de Elementos Finitos – EvalS

A utilização de programas de elementos finitos desenvolveu-se em conjunto com a expansão do uso do computador, tendo os restantes métodos de cálculo caído em desuso, restringindo-se apenas a utilização dos últimos à determinação de soluções teóricas de problemas simples para validação de métodos aproximados. O método dos elementos finitos permite a determinação do estado de tensão e de deformação de uma estrutura arbitrária sujeita a ações exteriores. Esta formulação requer a existência de uma equação integral de domínio complexo, baseada no Princípio dos Trabalhos Virtuais, que possa ser substituída por um somatório de integrais com subdomínios mais simples, ou seja, consiste na discretização de uma estrutura em sub-estruturas, designadas por elementos finitos, cujo comportamento individual é conhecido, sendo o comportamento global igual à soma de todas as frações. São apenas considerados os deslocamentos generalizados nos n nós do elemento finito, sendo os deslocamentos nos restantes pontos calculados por interpolação dos primeiros (Azevedo 2003).

3.2.1 Modelação

O programa utilizado, o EvalS, é um programa de elementos finitos 2D desenvolvido pelo Engenheiro Miguel Pedrosa Ferreira e pelo Professor Ricardo Teixeira Costa. Este programa permite analisar estruturas reticuladas em termos de deformações e esforços, a duas dimensões.

No programa de elementos finitos começou por definir-se a grelha necessária para o desenho da estrutura. Esta grelha tem em conta a posição dos eixos neutros da estrutura global e dos elementos de madeira e de betão e o espaçamento entre ligações. No programa optou-se por utilizar os espaçamentos reais entre os ligadores para uma maior aproximação da realidade, uma vez que no procedimento sugerido no Eurocódigo 5 apenas é possível considerar um espaçamento efetivo (Figura 3.4).

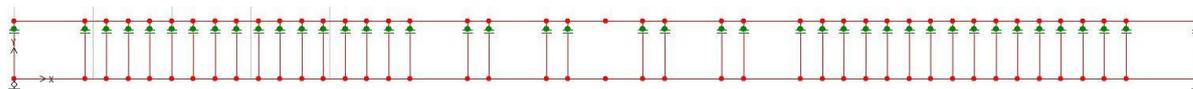


Figura 3.4 - Viga simplesmente apoiada. EvalS

Construída a grelha procede-se ao desenho dos elementos de madeira, de betão e de ligação. Todos estes componentes serão definidos como elementos *beam*, ou seja, elementos lineares

que podem estar sujeitos a esforços axiais, de flexão e de esforço transversal, definidos pelas coordenadas dos seus pontos inicial e final e cujas propriedades são atribuídas definindo uma secção (Figura 3.5). Para tal criaram-se três secções diferentes, segundo as características de cada material (madeira, betão e ligação), sendo estas propriedades as mesmas que as utilizadas no modelo numérico simplificado do Eurocódigo 5.

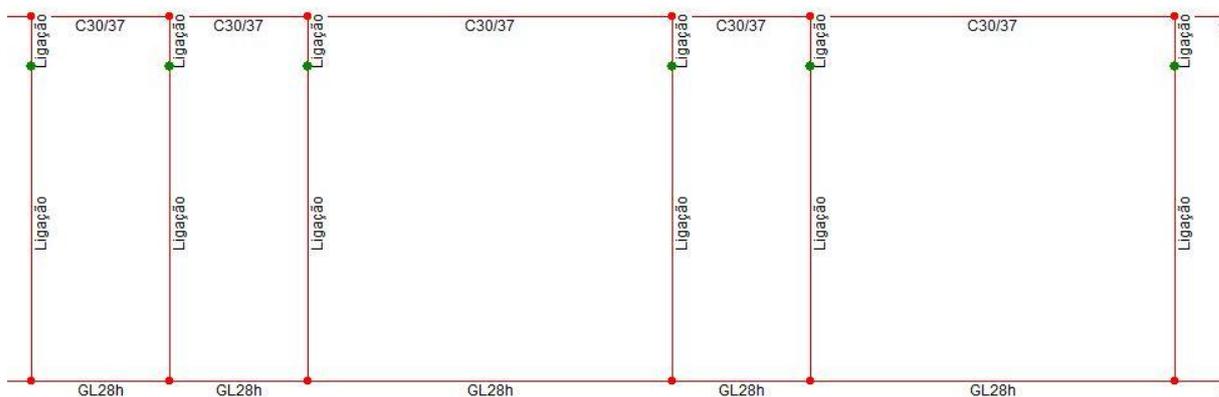


Figura 3.5 - Elementos *beam* e respectivas secções. EvalS

No caso da ligação (elementos *beam* verticais que ligam os elementos horizontais de madeira e betão) considerou-se um módulo de elasticidade e uma área suficientemente elevados para que esses elementos possam ser considerados rígidos e os deslocamentos possam ser desprezados, não influenciando por isso o comportamento global da estrutura. A ligação é caracterizada por um módulo de escorregamento, K . No programa de elementos finitos as ligações foram representadas por libertações (*releases*), posicionadas no eixo neutro do sistema estrutural, com rigidez segundo o eixo da viga igual ao módulo de escorregamento da ligação e rígidas segundo os outros dois eixos (Figura 3.6). As *releases* dos extremos da viga mista têm rigidez nula segundo o eixo da viga, mantendo-se rígidas segundo os outros dois eixos, uma vez que não existem ligações nessas posições, logo o escorregamento entre os elementos de betão e de madeira não está restringido.

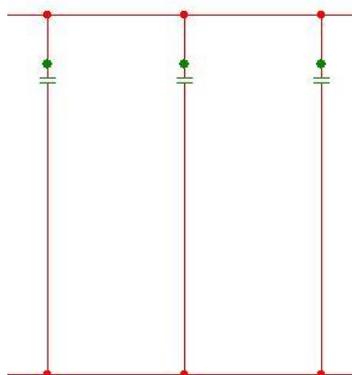


Figura 3.6 - Ligações (libertações de esforço transverso). EvalS

Para terminar a modelação da estrutura são introduzidos um apoio duplo (Figura 3.7) e um apoio simples (Figura 3.8) nos extremos do elemento de madeira (*joint restraints*). O apoio duplo trata-se de uma restrição dos deslocamentos na direção do eixo da viga e na direção perpendicular a esta, e o apoio simples é definido por uma restrição na direção perpendicular ao eixo da viga. Estas restrições são impostas aos nós que se encontram nos extremos da viga simplesmente apoiada e que unem o elemento *beam* de madeira ao elemento *beam* de ligação, representando as ligações reais da estrutura.

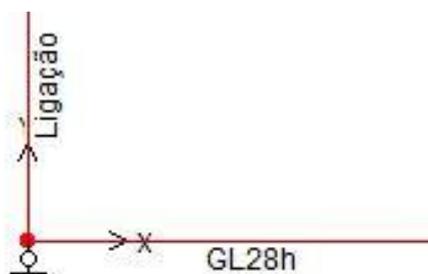


Figura 3.7 - Apoio duplo. EvalS



Figura 3.8 - Apoio simples. EvalS

Após a conclusão do modelo definem-se as ações estáticas (ações permanentes e variáveis) e cinemáticas a atuar sobre o sistema misto sob a forma de *uniform loads* e *temperatura loads*, respetivamente.

Para validar este modelo, considerou-se uma carga uniformemente distribuída de 10 kN/m, mas agora considerando o espaçamento equivalente determinado pelo EC5, e compararam-se

os valores obtidos para as deformações numa análise a curto prazo com os valores determinados pelo modelo simplificado do Eurocódigo 5 para as mesmas condições. O deslocamento a meio vão e a rotação nos apoios pelo programa de elementos finitos são 4,205 mm e 0,909 mm/m e os resultados obtidos segundo o modelo simplificado do EC5 são iguais a 4,169 mm e a 0,889 mm/m, respetivamente. Logo, dada a aproximação dos resultados, podemos validar a modelação concebida para o programa de elementos finitos.

3.2.2 Análise de dados

No programa é possível correr uma análise linear atribuindo um coeficiente de majoração ou minoração a cada uma das ações definidas. Este coeficiente terá valor igual ao coeficiente parcial relativo às combinações de ações a estudar (Figura 3.9).

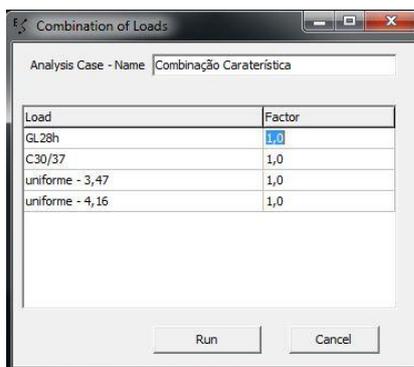


Figura 3.9 - Combinações de ações - EvalS

Para cada análise linear realizada, ou seja, para cada combinação de ações estudada, é possível exportar os valores dos esforços atuantes nos elementos constituintes da estrutura (elementos *beam* de madeira e de betão), bem como as suas deformações (deslocamentos e rotações). Estes valores podem ser exportados para um ficheiro Excel ou podem ser visualizados em forma de diagrama de esforços e de deformada no programa, como apresentado nos exemplos para a combinação característica da Figura 3.10 à Figura 3.13.

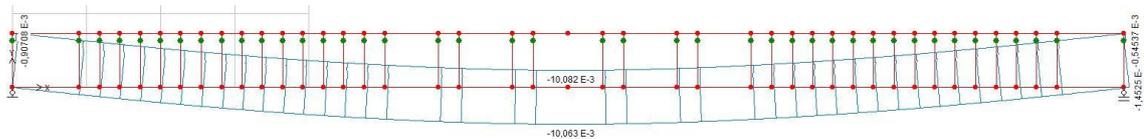


Figura 3.10 - Deformações na combinação de ações característica a curto prazo – EvalS



Figura 3.11 - Esforço axial na combinação de ações fundamental a curto prazo – EvalS

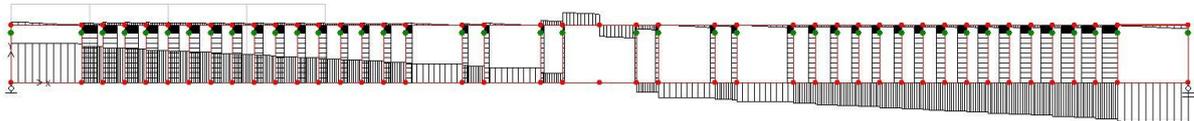


Figura 3.12 - Esforço transversal na combinação de ações fundamental a curto prazo – EvalS

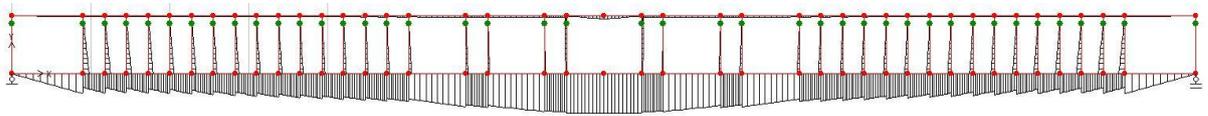


Figura 3.13 - Momento fletor na combinação de ações fundamental a curto prazo - EvalS

Os elementos de betão e de madeira estão sujeitos a flexão composta, ou seja, existe um momento fletor e um esforço axial atuantes em cada um. Para determinar as tensões no elemento utiliza-se a expressão de resistência dos materiais:

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_x}{I_x} \cdot y \quad (32)$$

sendo N o esforço axial atuante; A a área do elemento; M_x o momento fletor atuante segundo o eixo perpendicular ao eixo da viga simplesmente apoiada (eixo x); I_x o momento de inércia do material em relação ao eixo neutro; y a distância do eixo neutro da secção ao ponto considerado.

Para as tensões atuantes nos extremos da secção dos elementos a expressão toma a seguinte forma:

$$\sigma_{topo} = \frac{N}{A} + \frac{M_x}{I_x} \cdot \left(-\frac{h}{2}\right) \text{ para o topo da secção} \quad (33)$$

$$\sigma_{base} = \frac{N}{A} + \frac{M_x}{I_x} \cdot \left(\frac{h}{2}\right) \text{ para a base da secção} \quad (34)$$

em que h é a altura da secção.

Para o cálculo das tensões tangenciais, admite-se, tal como no modelo simplificado do Eurocódigo 5, que apenas a madeira resiste ao esforço transversal, sendo o valor máximo destas tensões dado por:

$$\tau_{máx} = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{máx}}{A_2} \quad (35)$$

sendo A_2 a área da secção transversal do elemento de madeira; $V_{máx}$ o valor de cálculo do esforço transversal, determinado pelo programa de elementos finitos.

3.2.3 Comportamento diferido

A influência dos efeitos diferidos no sistema estrutural também é analisada no programa de elementos finitos. Para análise do efeito da fluência do betão, alterou-se, na respetiva secção, o módulo de elasticidade deste para o módulo determinado segundo a fórmula (24). No caso da análise do efeito da fluência da madeira, tal como no betão, altera-se o módulo de elasticidade do material para o módulo de elasticidade corrigido determinado pela expressão (26). Altera-se ainda o módulo de escorregamento da ligação, uma vez que este vai depender do efeito da fluência nos dois materiais nas análises a longo prazo. O módulo de escorregamento será igual ao determinado pelas equações (28) e (29).

Em cada uma das situações, após alterar as propriedades corre-se novamente uma análise linear para as combinações de ações a estudar e exportam-se os resultados dos esforços e deformações obtidos

3.3 Verificações

3.3.1 Verificação dos Estados Limites Últimos

A verificação dos ELU é assegurada quando é garantida a segurança dos elementos de madeira e de betão em relação às tensões atuantes no topo e na base das secções transversais, quando é satisfeita a resistência ao corte e quando é assegurada a segurança da ligação relativamente à sua capacidade de carga.

Para a verificação da segurança aos ELU nesta dissertação utilizar-se-ão as verificações previstas no (STEP 1995).

As verificações das tensões no topo e na base da secção de betão são dadas, respetivamente, por:

$$\sigma_{c,topo} < f_{cd} \quad (36)$$

$$\sigma_{c,base} < f_{ctmd} \quad (37)$$

em que f_{cd} e f_{ctmd} são os valores de cálculo da resistência do betão à compressão e à tração, respetivamente. Estes valores de cálculo são determinados através das seguintes expressões do Eurocódigo 2, 1-1:

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} f_{ck}}{\gamma_c} \quad (38)$$

$$f_{ctmd} = \frac{\alpha_{ct} f_{ctm}}{\gamma_c} \quad (39)$$

em que f_{ck} é o valor característico da tensão de rotura do betão à compressão; f_{ctm} é o valor médio da tensão de rotura do à tração simples; γ_c é o coeficiente parcial relativo ao betão, que segundo o Quadro 2.1N do Eurocódigo 2, 1-1 toma o valor 1,5; α_{cc} e α_{ct} são os coeficientes que têm em conta os efeitos de longo prazo na resistência à compressão e à tração, respetivamente, e os efeitos desfavoráveis resultantes do modo como a carga é aplicada, e cujo valor recomendado é 1.

Por sua vez, a verificação da secção de madeira é dada pela seguinte inequação:

$$\frac{\sigma_2}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,2}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (40)$$

em que $f_{t,0,d}$ e $f_{m,d}$ são os valores de cálculo da resistência da madeira à tração na direção das fibras e à flexão, respetivamente. Estes valores de cálculo são determinados através das seguintes expressões do Eurocódigo 5, 1-1:

$$f_{t,0,d} = k_{mod} \frac{f_{t,0,k}}{\gamma_M} \quad (41)$$

$$f_{m,d} = k_{mod} \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} \quad (42)$$

em que $f_{t,0,k}$ e $f_{m,k}$ são os valores característicos da resistência à tração na direção das fibras e da resistência à flexão da madeira, respetivamente; γ_M é o coeficiente parcial relativo à madeira, que segundo o Quadro 2.3 do Eurocódigo 5, 1-1 toma o valor 1,25 para madeira lamelada-colada; k_{mod} é o fator que tem em conta o efeito da duração da carga e o teor em água, cujos valores são apresentados no Quadro 3.1 do Eurocódigo 5, 1-1 e que, neste caso, para uma classe de serviço 2 e uma carga de média duração toma o valor de 0,80.

No caso da análise pelo programa de elementos finitos os valores de σ_2 e $\sigma_{m,2}$ são determinados pelas seguintes expressões:

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_{t,topo} + \sigma_{t,base}}{2} \quad (43)$$

$$\sigma_{m,2} = \frac{\sigma_{t,topo} - \sigma_{t,base}}{2} \quad (44)$$

Para ser verificada a resistência ao corte deve respeitar-se a seguinte inequação:

$$\tau_{máx} \leq f_{v,d} \quad (45)$$

onde $f_{v,d}$ é o valor de cálculo da resistência ao corte da madeira, determinado através da expressão do Eurocódigo 5, tal como os valores das resistências de cálculo à tração na direção das fibras e da resistência à flexão:

$$f_{v,d} = k_{mod} \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} \quad (46)$$

sendo $f_{v,k}$ o valor característico da resistência ao corte da madeira; k_{mod} igual a 0,8 e γ_M a 1,25, tal como foi referenciado anteriormente.

Para verificar a segurança do elemento de ligação entre o betão e a madeira é necessário determinar o valor de cálculo da força aplicada num ligador, F_d . Pelo método dos elementos

finitos este é exportado diretamente do programa, pelo método simplificado do Eurocódigo 5 é determinado através da seguinte expressão:

$$F_d = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 a_1 s V_{sd}}{(EI)_{ef}} \quad (47)$$

em que V_{sd} é o valor de cálculo do esforço transversal máximo, determinado pela equação da resistência dos materiais para vigas simplesmente apoiadas:

$$V_{sd} = \frac{Ql}{2} \quad (48)$$

A tensão resistente, R_d , considerada é igual à capacidade de carga da ligação, logo deve verificar-se:

$$F_d \leq R_d \quad (49)$$

3.3.2 Verificação dos Estados Limites de Utilização

Para além da verificação da capacidade resistente é também necessário assegurar a sua satisfatória capacidade de utilização, para tal limitam-se as deformações.

O Eurocódigo 5 sugere uma gama de limitações para deformações de vigas simplesmente apoiadas. Para a verificação dos Estados Limites de Utilização, neste estudo, considerou-se aceitável os valores médios dos limites apresentados, sendo estes valores representados nas expressões (50) e (51).

$$u_{2,inst} < l/400 \quad (50)$$

$$u_{2,fin} < l/200 \quad (51)$$

4 CARATERIZAÇÃO DA PONTE MISTA MADEIRA-BETÃO EM QUIAIOS

Neste capítulo serão apresentadas as características e as ações atuantes na ponte mista construída na Estrada Florestal nº1 em Quiaios, Figueira da Foz, em 2005, cujos efeitos diferidos e variações termo-higrométricas se pretendem analisar.

4.1 Materiais

4.1.1 Betão

O betão utilizado nesta estrutura mista tem classe de resistência C30/37 e as suas propriedades características são apresentadas no Quadro 4.1:

Quadro 4.1 - Propriedades do Betão C30/37. Fonte: Quadro 3.1, (EN 1992 2004)

Propriedades	C30/37
f_{ck} (MPa)	30
$f_{ctk,0,05}$ (MPa)	2,0
E_{cm} (GPa)	33
$\rho_{C30/37}$ (kg/m ³)	25

Como não existem informações rigorosas acerca do coeficiente de dilatação térmica linear do betão, α_B , este pode ser considerado igual a $10 \cdot 10^{-6} K^{-1}$, ou $10 \cdot 10^{-6} / ^\circ C$ (Eurocódigo 2, 1-1, 3.1.3 (5)).

4.1.2 Madeira

A madeira utilizada para as quatro vigas da estrutura é lamelada colada da classe de resistência GL28h, e as propriedades deste tipo de madeira são apresentadas no Quadro 4.2:

Quadro 4.2 - Propriedades do Madeira GL28h. Fonte: Tabela 1 (EN1194 1999)

Propriedades	GL28h
$f_{m,k}$ (MPa)	28
$f_{t,0,k}$ (MPa)	19,5
$f_{v,k}$ (MPa)	3,2
E_{cm} (GPa)	12,6
ρ_{GL28h} (kg/m ³)	410

Segundo o capítulo 3 do (Wood Handbook - Wood as an engineering material 1999), o coeficiente de dilatação térmica linear da madeira, α_M , na direção das fibras não depende do peso volúmico da espécie. Os valores para esta propriedade podem variar entre $3,1 \cdot 10^{-5}/K$ e $4,6 \cdot 10^{-6}/K$, pelo que neste trabalho foi utilizado o valor médio, ou seja $1,775 \cdot 10^{-5}/K$, o que equivale a $1,775 \cdot 10^{-5}/^{\circ}C$.

4.1.3 Ligação

Todas as ligações têm um módulo de escorregamento, K , de 200 kN/mm e uma capacidade de carga, $F_{m\acute{a}x}$, que se assumiu igual a 914 kN, com base no estudo efetuado para uma outra ponte mista madeira-betão (Tommola, Salokangas e Jutila 1999).

4.2 Dimensões

A ponte é constituída apenas por uma faixa de trânsito, tendo o tabuleiro um vão de 15 metros e uma largura de 5 metros. A estrutura é constituída por uma laje de betão com secção transversal 500 cm x 20 cm e por quatro vigas de madeira igualmente espaçadas com secção transversal 126 cm x 24 cm (Figura 4.1 e Figura 4.2).

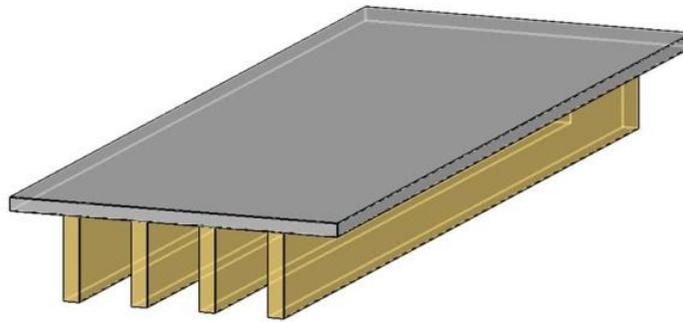


Figura 4.1 - Esboço 3D do sistema estrutural

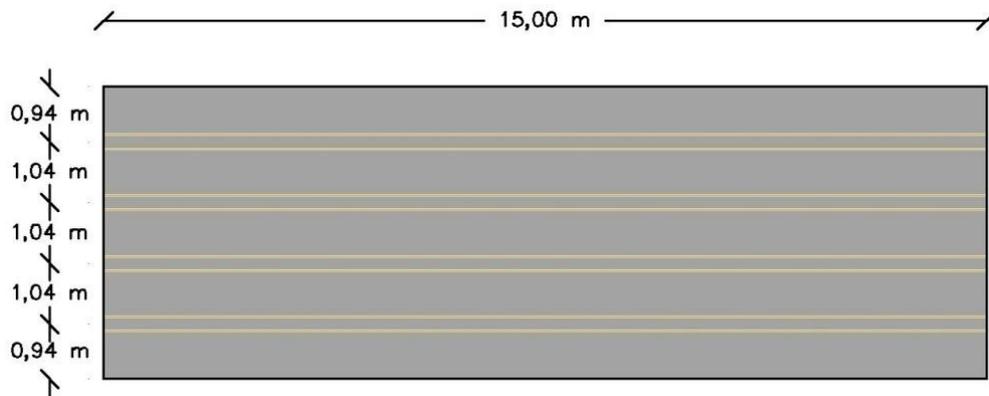


Figura 4.2 - Dimensões do sistema estrutural

Para análise considerou-se apenas uma viga mista com as dimensões efetivas apresentadas na Figura 4.3. No programa de elementos finitos admite-se que as ligações se encontram a uma cota igual à altura do elemento de madeira, ou seja, à altura da interface madeira-betão.

4.3 Ações

4.3.1 Ações estáticas

Para o dimensionamento da estrutura consideraram-se ações permanentes e ações variáveis. Para as ações permanentes teve-se em conta os pesos próprios da madeira (1,21 kN/m) e do betão (5,20 kN/m) e consideraram-se que as cargas atuam no eixo de cada um dos elementos (Figura 4.5).

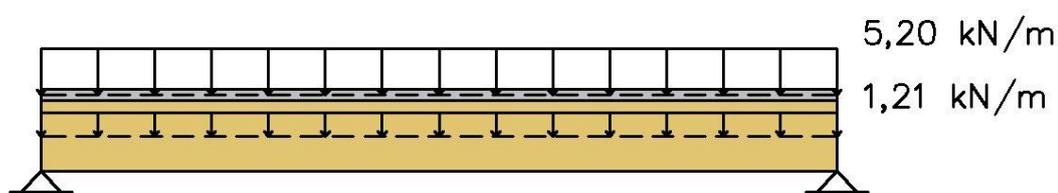


Figura 4.5 - Ações permanentes

No que diz respeito às ações variáveis foram consideradas uma carga uniformemente distribuída ao longo da largura com o valor de 50 kN/m segundo o eixo perpendicular ao eixo do vão da viga (Figura 4.6) e uma carga uniformemente distribuída de 4 kN/m² a atuar em toda a área da laje de betão (Figura 4.7).

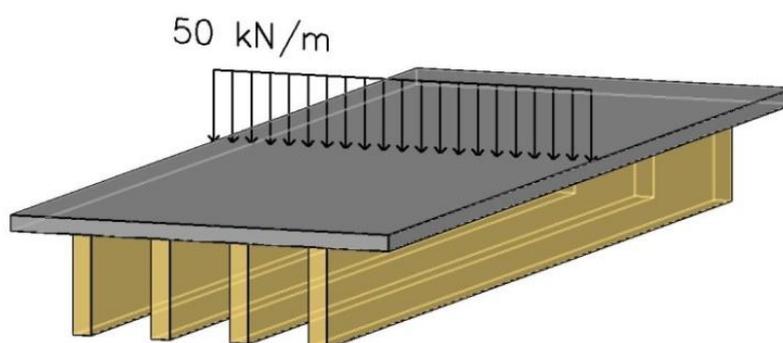
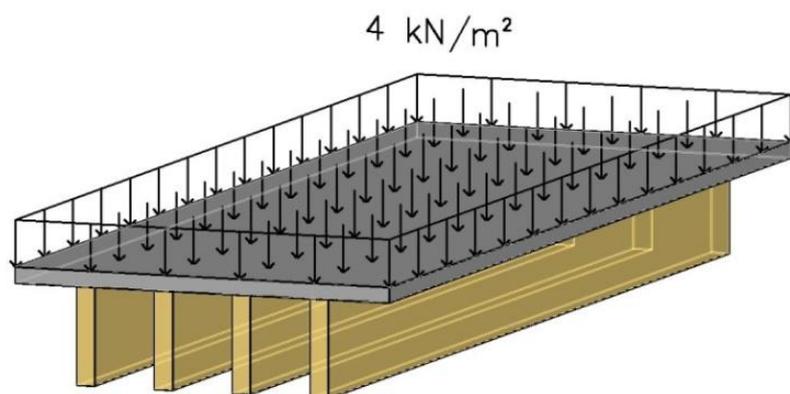


Figura 4.6 - Ações variáveis - carga de 50 kN/m

Figura 4.7 - Ações variáveis - carga de 4 kN/m^2

Para analisar o efeito destas ações numa viga simplesmente apoiada, consideraram-se as cargas pontual e uniformemente distribuída ao longo do eixo do vão equivalentes a estas, tendo em conta a largura efetiva da secção. Resultando uma carga pontual de 52 kN a meio vão (correspondente à carga de 50 kN/m) e uma carga uniformemente distribuída de $4,16 \text{ kN/m}$ (respetiva à carga de 4 kN/m^2). Considerou-se que as ações variáveis atuam sobre o eixo neutro do elemento de betão, conforme representado na Figura 4.8.

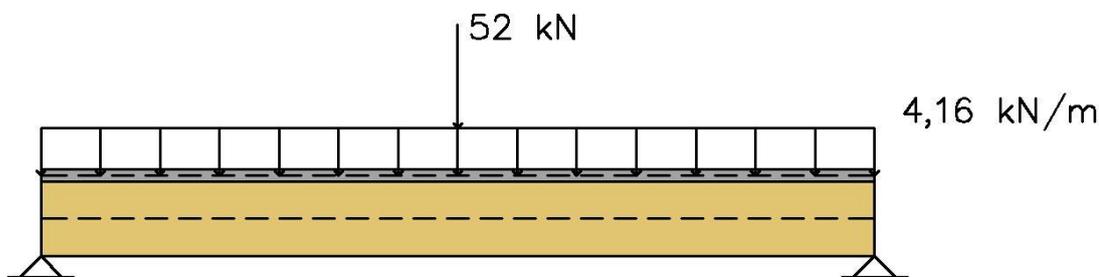


Figura 4.8 - Ações variáveis

Para realizar a análise da estrutura a curto e longo prazo em termos de tensões e deslocamentos, utilizaram-se as combinações de ações sugeridas no Eurocódigo 0.

Para o estudo a curto e longo prazo dos Estados Limites Últimos (ELU) utilizou-se a combinação fundamental, dada pela expressão que se segue:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (54)$$

em que, segundo o Quadro A1.2 (A) do Eurocódigo 0, $\gamma_{G,j, sup} = 1,35$ e $\gamma_{Q,1} = 1,50$.

Para o estudo a curto prazo dos Estados Limites de Utilização (ELS) usou-se a combinação característica, dada pela expressão:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (55)$$

Em relação ao estudo a longo prazo dos ELS usou-se a combinação de ações quase-permanente, dada pela expressão:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (56)$$

Para este tipo de sobrecarga o Eurocódigo não apresenta valores para os coeficientes de redução, pelo que foram utilizados os que constam do Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes, Capítulo IX, artigo 41^a (Decreto-Lei n.º 235/83, de 31 de Maio):

$$\psi_0 = 0,6; \psi_2 = 0,2 \quad (57)$$

As ações afetadas do coeficiente de redução para cada uma das combinações de ações apresentam-se no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 - Valores das ações afetadas pelos coeficientes de cada uma das combinações de ações, em kN/m

		ELU	ELS – curto prazo	ELS – longo prazo
Ações permanentes		8,65	6,41	6,41
Ações variáveis	Carga pontual	78,00	52,00	10,40
	Carga uniforme	6,24	4,16	0,83

4.3.2 Ações cinemáticas

Para simular o efeito desta retração no programa de elementos finitos determinou-se a temperatura necessária para provocar esta retração, sabendo que:

$$\Delta \varepsilon = \alpha \cdot \Delta T \quad (58)$$

em que $\Delta\varepsilon$ é a variação do comprimento do elemento; α é o coeficiente de dilatação térmica; ΔT a variação de temperatura a que o elemento está sujeito.

Ao correr a análise no programa para as ações cinemáticas considerou-se apenas essa ação, sem ações permanentes e variáveis, com um coeficiente parcial da ação igual a 1,0.

4.3.2.1 Retração do betão

Para o estudo do efeito da retração do betão na estrutura mista determinou-se a retração esperada a longo prazo, segundo o procedimento apresentado no Eurocódigo 2, 1-1.

A extensão total de retração do betão, ε_{cs} , é resultado da soma de duas componentes, a extensão de retração de secagem, ε_{cd} e a extensão de retração autogénea, ε_{ca} .

O valor final da extensão de retração por secagem é igual a $k_h \cdot \varepsilon_{cd,0}$, sendo esta última parcela determinada pela seguinte expressão do Anexo B do Eurocódigo 2, 1-1:

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot \exp\left(-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{f_{cmo}}\right) \right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH} \quad (59)$$

em que:

$$\beta_{RH} = 1,55 \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right] \quad (60)$$

f_{cm} é o valor da tensão de rotura do betão à compressão; f_{cmo} tem o valor de 10 MPa; α_{ds1} e α_{ds2} para cimento da Classe N são iguais a 4 e a 0,12; RH é a humidade relativa ambiente (%), como a estrutura encontra-se em ambiente exterior considerou-se uma humidade relativa de 80%; RH_0 é igual a 100%.

O coeficiente k_h depende da espessura equivalente da secção transversal e, neste caso, toma o valor de 0,846, por interpolação dos valores apresentados no Quadro 3.3. do Eurocódigo 2, 1-1, para um valor de h_0 igual a 204 mm.

A extensão de retração autogénea final é dada pela expressão:

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5(f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} \quad (61)$$

em que f_{ck} é o valor característico da tensão de rotura do betão à compressão, em MPa.

Os valores obtidos para a estrutura em estudo são apresentados no Quadro 4.4.

Quadro 4.4 - Valores das retrações do betão

$\varepsilon_{cd}(\infty)$	$2,28 \times 10^{-4}$ m/m
$\varepsilon_{ca}(\infty)$	$5,00 \times 10^{-5}$ m/m
$\varepsilon_{cs}(\infty)$	$2,78 \times 10^{-4}$ m/m

Logo, sabendo que o coeficiente de dilatação térmica do betão é igual a $10 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ e pela expressão (58) a variação de temperatura a ser imposta ao elemento de betão é de $-27,8^{\circ}\text{C}$.

4.3.2.2 Variação do teor de água na madeira

A madeira é um material higroscópico, ou seja perde ou ganha humidade em função das variações de temperatura e humidade relativa do ambiente que a rodeia de modo a atingir um equilíbrio higrométrico. Devido a estas variações no teor de água a madeira sofre alteração de dimensões, e sendo um material anisotrópico, estas variações não ocorrem de igual modo em toda a peça, tendo valores diferentes para as direções longitudinal, tangencial e radial. Segundo a Figura 4.10 verifica-se que a variação de dimensão é máxima na direção tangencial e mínima na direção longitudinal.

Para este estudo consideraram-se variações do teor de água de 1 e 6%, uma vez que se trata de uma estrutura que se encontra no exterior e em que as vigas de madeira estão cobertas pela laje de betão (Figura 4.9).

Relativamente à variação dimensional apenas foi estudada a direção longitudinal. Considerou-se um valor inferior de 0,1% e um limite superior de 1%, tendo por base os valores existentes para o Pinho bravo em (LNEC-M9 1997), apresentados na Figura 4.10.

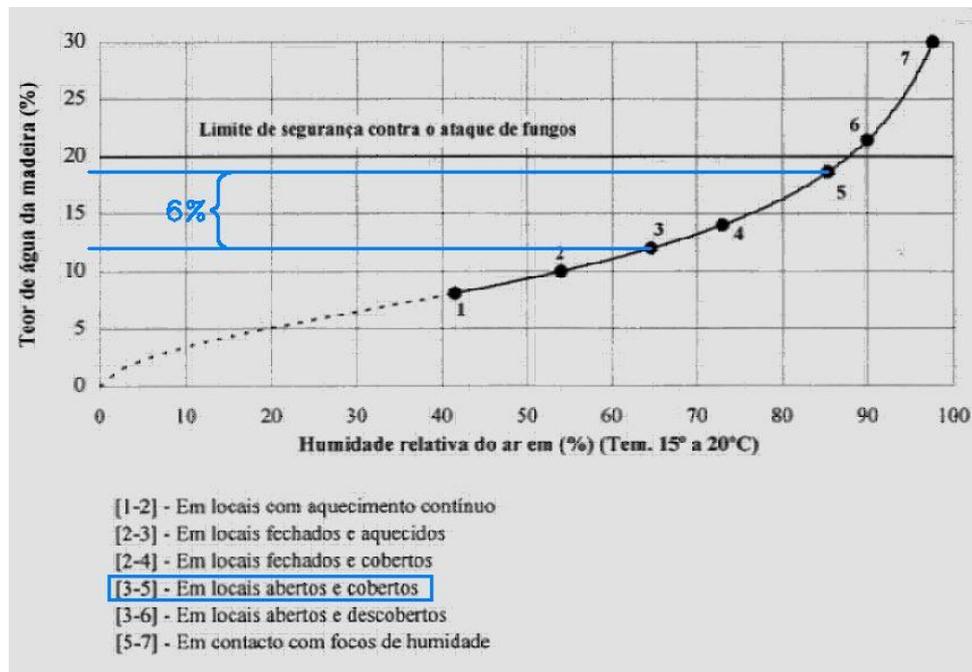


Figura 4.9 - Gama de variação esperada para o teor de água de equilíbrio da madeira consoante o local de aplicação. Fonte: (LNEC-M9 1997)

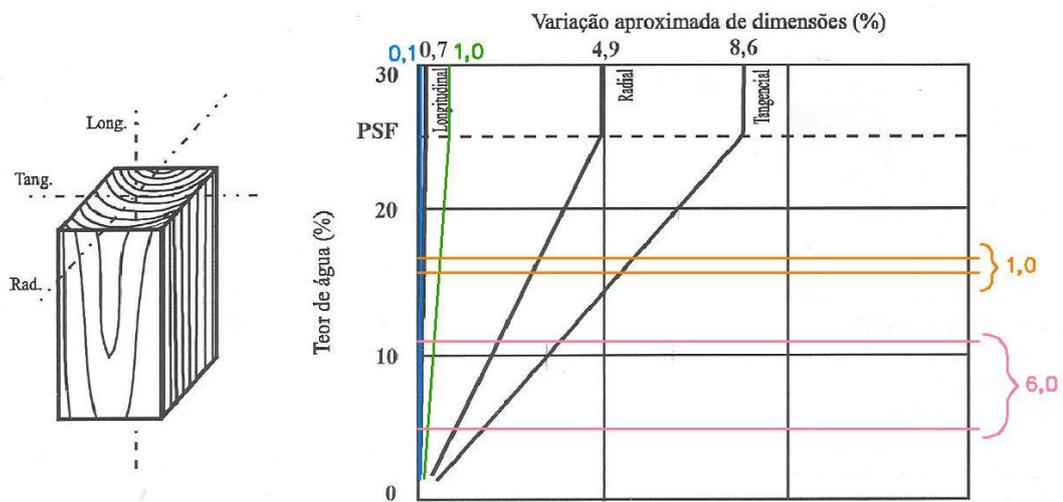


Figura 4.10 - Relação entre variação do teor de água e a variação dimensional. Fonte: (LNEC-M9 1997)

Determinadas as extensões para cada uma das variações de humidade e cada um dos limites de variação dimensional, simulou-se no programa de elementos finitos o efeito desta variação dimensional pelo mesmo procedimento utilizado para a retração do betão, ou seja, determinaram-se, através da expressão (58), as variações de temperatura necessárias para atingir as extensões calculadas. Do Quadro 4.5 constam os valores das extensões bem como as variações de temperaturas a ser impostas ao elemento de madeira.

Quadro 4.5 - Variações de temperaturas para simular efeito de variação do teor de água na madeira no programa de elementos finitos

Variação do teor de água	Variação de dimensões de 0,1%		Variação de dimensões de 1%	
	$\Delta\varepsilon$ [m/m]	ΔT [°C]	$\Delta\varepsilon$ [m/m]	ΔT [°C]
1%	0,04	2,3	0,004	0,2
6%	0,24	13,5	0,024	1,4

4.4 Comportamento diferido

Nas análises a longo prazo consideraram-se coeficientes de modo a ter em conta os efeitos diferidos dos elementos. Estes coeficientes dependem da fluência de cada material e os valores determinados através da metodologia descrita no capítulo 3 apresentam-se no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 - Coeficientes de fluência e módulos de elasticidade e de escorregamento utilizados nas análises realizadas

Elemento	Coeficiente de fluência	
Betão	acções permanentes - $\varphi_{(\infty,t_0)}$	1,87
	acções variáveis - φ_{ef}	0,64
Madeira	acções permanentes - $k_{def,g}$	0,80
	acções variáveis - $k_{def,q}$	0,16
Ligação	acções permanentes - $k_{def,g,ligação}$	2,44
	acções variáveis - $k_{def,q,ligação}$	0,64

No Quadro 4.7 são apresentados os módulos de elasticidade e de escorregamento utilizados em análises de curto prazo e os mesmos módulos usados nas análises a longo, ou seja, os módulos iniciais afetados dos coeficientes de fluência determinados.

Quadro 4.7 - Módulos de elasticidade/escorregamento afetados dos coeficientes de fluência

Elemento		Módulo de elasticidade /escorregamento	
Betão		curto prazo - E_1	33000 N/mm ²
		longo prazo - $E_{1,fin}$	16218 N/mm ²
Madeira		curto prazo - E_2	12600 N/mm ²
		longo prazo - $E_{2,fin}$	9098 N/mm ²
Ligação	ULS	curto prazo - K_u	133000 N/mm
		longo prazo - $K_{u,fin}$	61910 N/mm
	SLS	curto prazo - K_{ser}	200000 N/mm
		longo prazo, permanentes - $K_{ser,fin}$	58090 N/mm
	longo prazo, variáveis - $K_{ser,fin}$	122092 N/mm	

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 Introdução

Tal como foi referido no capítulo “Análise de estruturas mistas madeira-betão” utilizaram-se duas metodologias para o cálculo das tensões atuantes: o programa de elementos finitos EvalS e a metodologia apresentada no Anexo B do Eurocódigo 5. Os resultados obtidos a nível de tensões e deformações para ambas as metodologias encontram-se no Anexo A desta dissertação. Neste capítulo serão apresentadas comparações entre esses resultados e a influência dos vários efeitos diferidos e termo-higrométricos no sistema misto em termos de tensões na secção a meio vão da viga simplesmente apoiada. Os gráficos que apresentam a influência dos efeitos diferidos (fluência) têm em conta as ações estáticas atuantes na estrutura, e os gráficos relativos à retração do betão e às variações do teor de água na madeira apenas têm em conta esses mesmos efeitos, ou seja, os acréscimos/decréscimos de tensões e deformações por eles provocados.

5.2 EvalS vs EC5

Nesta subsecção comparam-se os valores obtidos com a metodologia sugerida no Anexo B do Eurocódigo 5 e com o programa de elementos finitos.

A Figura 5.1 apresenta os valores das tensões máximas obtidas para os extremos dos elementos de madeira e de betão para os Estados Limites Últimos em análises de curto e longo prazo, pelo programa EvalS e pela metodologia do EC5.

Ao observarmos a figura mencionada anteriormente, podemos verificar que as tensões obtidas pelo EC5 tomam valores mais baixos que os determinados pelo EvalS, sendo portanto o último o que se encontra mais do lado da segurança. É de realçar a existência de diferenças significativas nos valores das tensões no elemento de betão.



Figura 5.1 - Tensões na secção mista para Estados Limites Últimos a curto e longo prazo, com os valores das tensões em N/mm^2

Quadro 5.1 - Deformações a curto e a longo prazo para Estados Limites de Serviço

Análise	Deslocamento a meio vão (mm)		Rotação dos apoios (mm/m)	
	EvalS	EC5	EvalS	EC5
curto prazo	6,656	7,586	1,470	1,587
longo prazo	6,750	6,903	1,522	1,465

Pela Figura 5.1 e pelo Quadro 5.1, conferimos que os valores determinados pelas duas metodologias não diferem muito, sendo também uma justificação para esta divergência o facto de no programa se utilizarem os espaçamentos reais entre ligadores e no método do Eurocódigo 5 utilizar-se um espaçamento uniforme.

5.3 Variação do teor de água na madeira

Os valores das tensões e das deformações para a variação do teor de água na madeira conforme explicado em 4.3.2.2 apresentam-se no Quadro A.12.

A Figura 5.2 apresenta as envolventes para as tensões atuantes em cada uma das análises de variação do teor de água da madeira e respetivo valor da variação dimensional resultante para atingir o equilíbrio higrométrico. Pela figura é possível verificar que apenas uma variação dimensional de 1% e uma variação do teor de água de 6% conduzem a acréscimos de tensão significativos na secção mista. Sendo os resultados das restantes análises praticamente nulos.

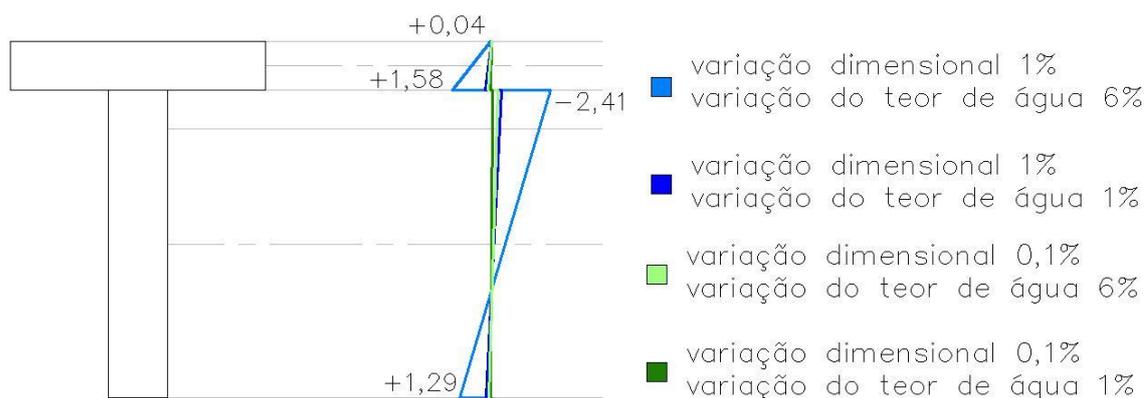


Figura 5.2 - Envolventes das tensões das análises da variação do teor de água na madeira, com os valores das tensões em N/mm^2

5.4 Ações estáticas vs Ações cinemáticas

Os valores das tensões e das deformações da análise das ações estáticas são as mesmas que para a análise a curto prazo, e encontram-se no Quadro A.1e Quadro A.2. Os valores para a análise de retração no betão encontram-se no Quadro A.11, e as tensões e deformações para a combinação mais gravosa de variação do teor de água na madeira apresentam-se no Quadro A.12.

Na Figura 5.3 apresentam-se as envolventes dos acréscimos de tensões provocadas por essas ações. Da figura é possível afirmar que a retração no betão produz um maior acréscimo de tensões na secção mista que a variação do teor de água na madeira. Também se verifica que a grandeza das tensões provocadas pelas ações estáticas é superior à grandeza das tensões provocadas pela retração no betão e pela variação do teor de água na madeira.

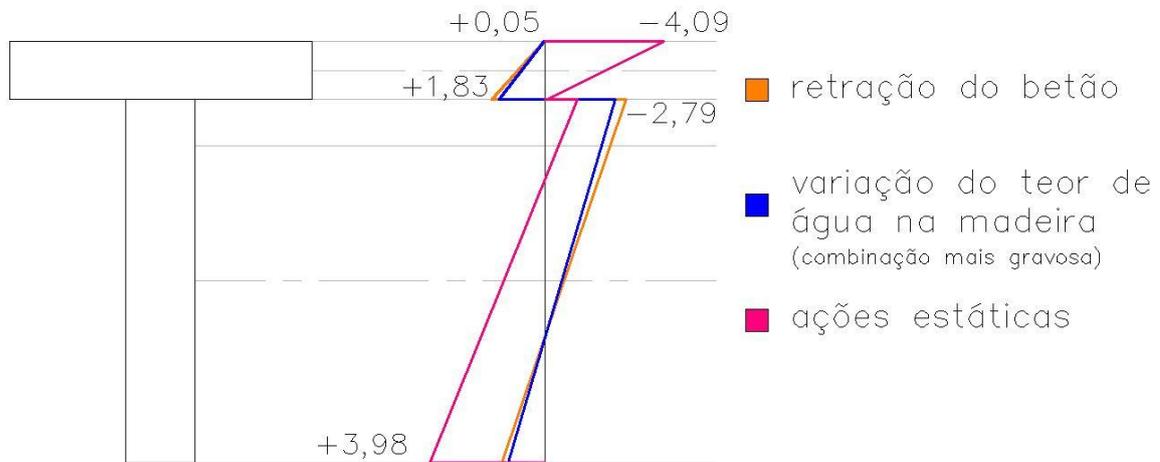


Figura 5.3 - Envolventes das tensões das análises das ações cinemáticas e das ações estáticas, com os valores das tensões em N/mm^2

Em termos de deformações, tal como podemos observar pela Figura 5.4, a grandeza dos deslocamentos a meio vão provocados por ações estáticas é idêntica à grandeza dos deslocamentos provocados pelas ações cinemáticas (retração no betão e o caso mais gravoso da variação do teor de água na madeira).

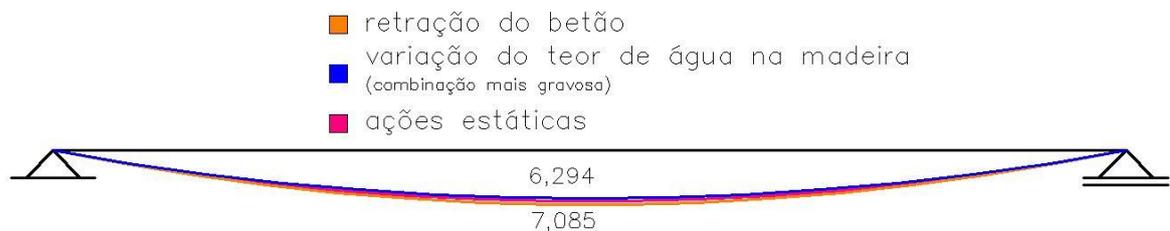


Figura 5.4 - Deslocamentos a meio vão provocadas por ações cinemáticas e por ações estáticas, com os valores dos deslocamentos em mm

5.5 Fluência do betão vs Fluência da madeira

Pretende-se agora analisar os efeitos da fluência do betão e da madeira em termos de acréscimos/decréscimos nas tensões da secção mista, sendo as tensões provocadas por cada um dos efeitos comparadas com as tensões da análise a curto prazo (Figura 5.5).

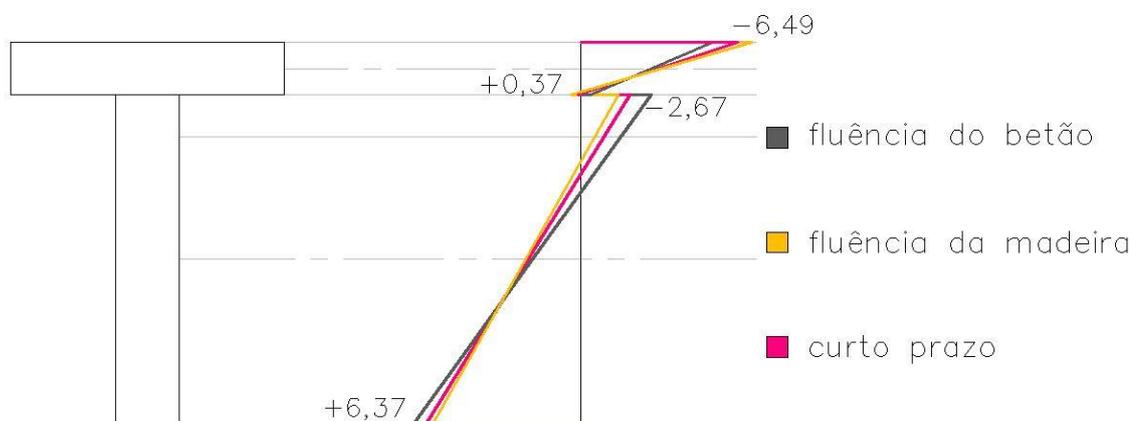


Figura 5.5 - Envolventes das tensões das análises a curto prazo e dos efeitos da fluência do betão e da madeira, com os valores das tensões em N/mm^2

Da Figura 5.5 observa-se que o efeito da fluência da madeira aumenta a tensão de compressão no topo do elemento de betão e aumenta também a tensão de tração na sua base. Em relação ao elemento de madeira o efeito referido anteriormente provoca uma diminuição da tensão de compressão no topo e da tensão de tração na base. A fluência do betão produz um efeito contrário da fluência da madeira, diminuindo a tensão de compressão no topo e a tensão de tração na base do elemento de betão e aumentando a tensão de compressão no topo e a tensão de tração na base do elemento de madeira.

A comparação entre as deformações causadas pelas ações estáticas e a fluência da madeira e as primeiras e a fluência do betão é apresentada na Figura 5.6. Comparativamente aos deslocamentos provocados pelas ações estáticas na análise a curto prazo, esta figura permite concluir que a fluência da madeira aumenta os deslocamentos a meio vão e a fluência do betão diminui esses mesmos valores.



Figura 5.6 - Deslocamentos a meio vão provocadas pelas ações estáticas tendo em conta os efeitos da fluência do betão e da madeira, com os valores dos deslocamentos em mm

5.6 Fluência da ligação

De modo a analisar a influência dos efeitos diferidos da ligação no sistema estrutural global compararam-se as tensões obtidas para Estados Limites Últimos numa análise a curto prazo e numa análise em que apenas se alterava o módulo de escorregamento atual para o módulo determinado para longo prazo (Figura 5.7).

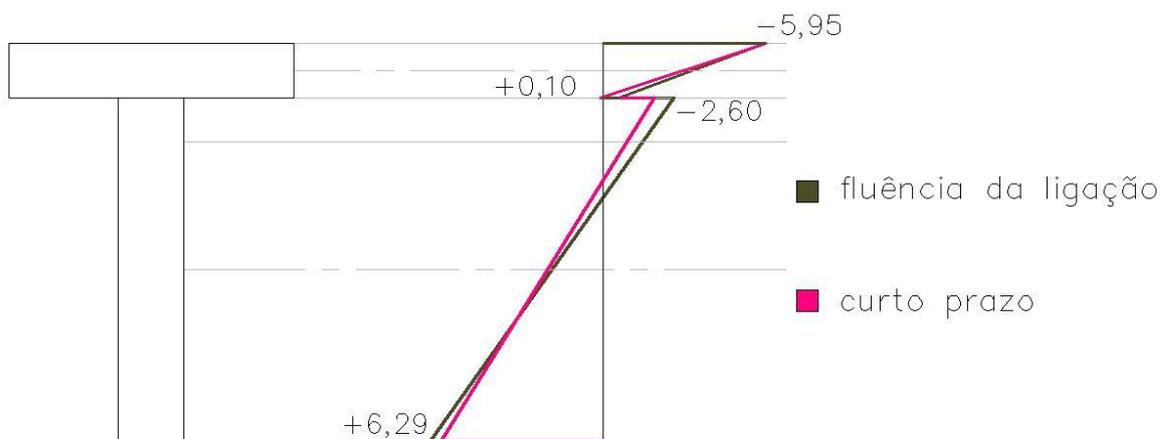


Figura 5.7 - Envoltórias das tensões das análises a curto prazo e dos efeitos da fluência da ligação, com os valores das tensões em N/mm^2

Da figura anterior podemos concluir que a fluência da ligação não influi significativamente nas tensões da estrutura, sendo estas muito semelhantes às de uma análise a curto prazo, sendo na interface onde se observam essas reduzidas variações de tensões.

5.7 Fluência vs Variação do teor de água da madeira vs Retração do betão

Dos efeitos analisados, pretende-se agora aferir qual aquele que produz um maior acréscimo nas tensões do sistema misto. Para tal, podemos comparar as envolventes das tensões para análises dos efeitos da variação do teor de água, da retração do betão e da fluência dos materiais (Figura 5.8).

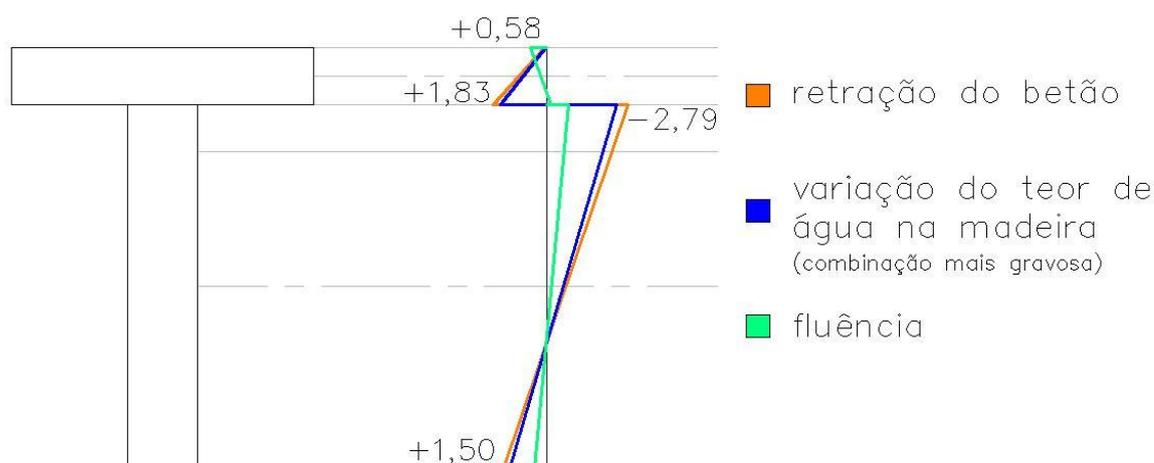


Figura 5.8 - Envolventes das tensões das análises dos efeitos da retração do betão, da variação de teor de água na madeira e das fluência dos materiais, com os valores das tensões em N/mm^2

Da Figura 5.8 podemos concluir que o efeito que influencia mais a distribuição de tensões na secção mista madeira-betão é a retração do betão. A fluência dos materiais apenas tem maior preponderância no topo do elemento de betão.

5.8 Resultante dos efeitos diferidos e termo-higrométricos

O anexo B do Eurocódigo 5 permite determinar a resultante das tensões a longo prazo tendo em conta apenas a fluência dos materiais. Nesta secção pretende-se analisar se ao somar linearmente os efeitos da fluência, da retração no betão e da variação do teor de água na madeira, as verificações pretendidas pelo Eurocódigo 5 continuam a ser satisfeitas.

Na Figura 5.9 apresenta-se a envolvente de tensões resultante da soma referida anteriormente.

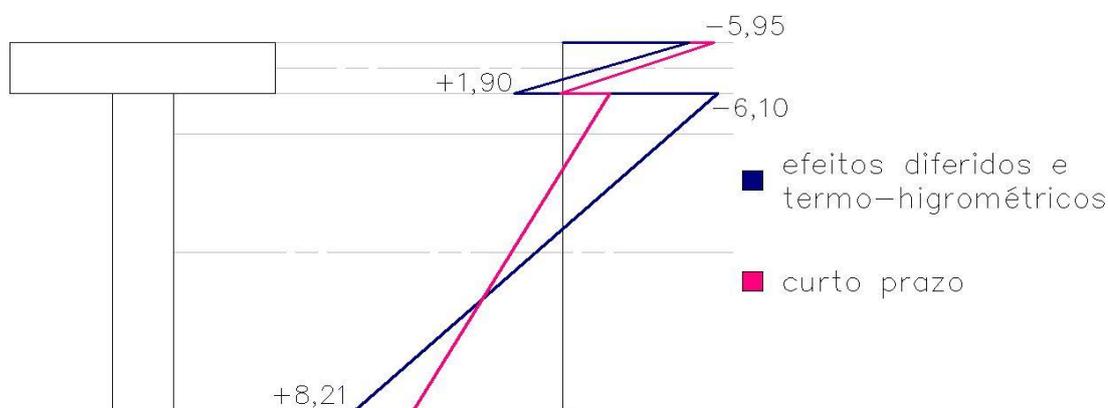


Figura 5.9 - Envolventes das tensões das análises a curto prazo e dos efeitos diferidos e termo-higrométricos, com os valores das tensões em N/mm^2

Após a soma linear dos efeitos diferidos e termo-higrométricos, verificaram-se todas as condições necessárias para garantir a segurança das estruturas em relação aos Estados Limites Últimos e aos Estados Limites de Serviço.

Na Figura 5.9 é ainda possível verificar que as maiores alterações nos valores das tensões vão ocorrer na interface da secção mista, apresentando-se um aumento na ordem dos 1700% da tensão na base do elemento de betão e uma diminuição de cerca de 200% da tensão no topo do elemento de madeira. O acréscimo de tensões no topo e na base dos elementos de betão e de madeira é mais reduzida, sendo cerca de 17% e 40%, respetivamente.

Pela Figura 5.10 é possível comparar a influência dos efeitos diferidos e termo-higrométricos nos deslocamentos a meio vão da viga mista, e verificamos que estes aumentam cerca de 3,5 vezes o deslocamento da secção a meio vão em relação ao deslocamento determinado para uma análise a curto prazo tendo em conta apenas as ações estáticas.



Figura 5.10 - Deslocamentos a meio vão numa análise a curto prazo considerando apenas as ações estáticas e numa análise a longo prazo considerando as ações estáticas e cinemáticas, com os valores dos deslocamentos em mm

5.9 Forças nos ligadores

Foram ainda analisadas as forças máximas nos ligadores, e observou-se que estas se encontravam nas ligações dos extremos da viga simplesmente apoiada.

Com os resultados obtidos para Estados Limites Últimos das várias análises realizadas, compararam-se os valores obtidos na ligação mais esforçada para as mesmas.

Do gráfico apresentado na Figura 5.11 é possível verificar que a fluência do betão e da ligação provocam uma diminuição da força máxima no ligador e que a fluência da madeira provoca um aumento da mesma. É visível também que considerando todos os efeitos diferidos e termo-higrométricos e as cargas estáticas aplicadas o valor da força máxima no ligador mais esforçado vai ser inferior ao mesmo valor na análise a curto prazo. Repara-se que esta diminuição é maior quando a variação do teor de água na madeira provoca uma dilatação do elemento de madeira e não uma retração do mesmo.

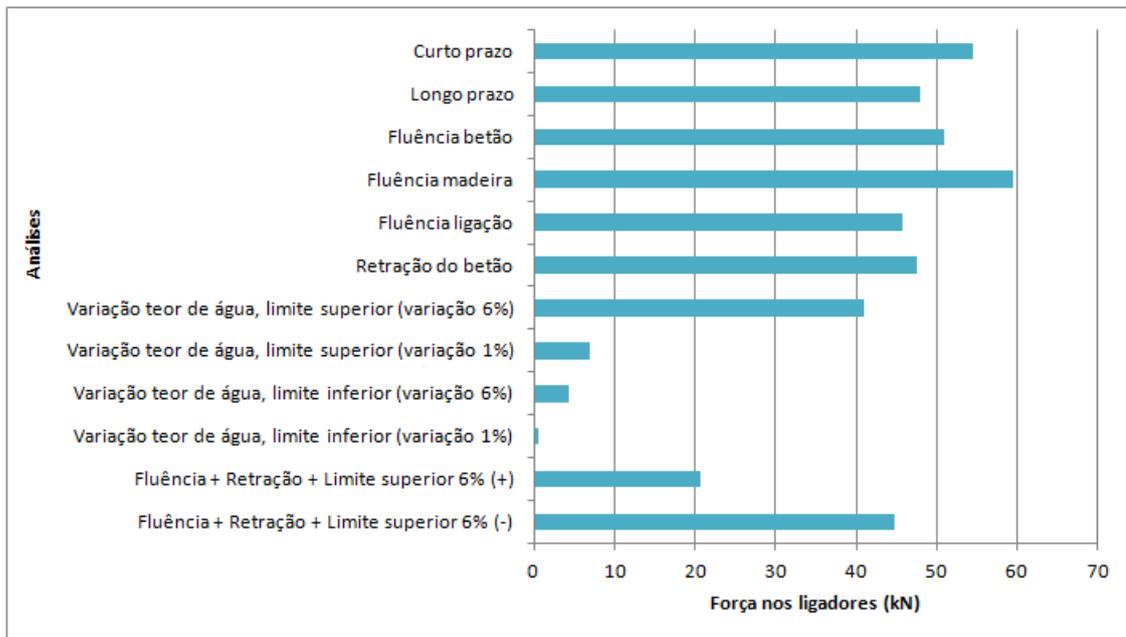


Figura 5.11 - Força nos ligadores, em kN, nas várias análises realizadas

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho tinha como objetivo estudar o comportamento a longo prazo de estruturas mistas madeira-betão, analisando a influência de efeitos diferidos, como a retração no betão, a variação do teor de água na madeira e a fluência nos materiais, na distribuição de tensões na secção mista e nas deformações da estrutura global.

Para este estudo foram utilizadas duas metodologias de análise de estruturas mistas: o modelo simplificado do Eurocódigo 5 e um programa de elementos finitos, o EvalS.

Através destes dois métodos foi possível analisar o comportamento da estrutura face aos efeitos diferidos e termo-higrométricos dos materiais, induzindo ações estáticas e cinemáticas. Destas análises obtiveram-se resultados para as tensões no topo e na base de cada elemento constituinte da estrutura mista, assim como as deformações resultantes no sistema estrutural.

Os resultados determinados por cada uma das metodologias foram relativamente aproximados, verificando-se uma discrepância maior nas tensões no elemento de betão, podendo estar relacionado com a divergência do espaçamento das ligações.

Após a determinação dos resultados, efetuaram-se comparações entre as envolventes das tensões e as deformações para cada análise, confrontando os resultados obtidos para análise a curto prazo e para análises que tiveram em conta a retração do betão, a variação do teor de água da madeira e a fluência dos elementos.

Do estudo realizado concluiu-se que o efeito que tem maior influência na distribuição de tensões é a retração no betão. Também se verificou que a grandeza das tensões provocadas pelas ações estáticas é superior à grandeza das tensões provocadas pelas ações cinemáticas. Em termos de deformações verifica-se que os valores são idênticos para os dois tipos de ações.

Conclui-se também que ao somarmos linearmente os efeitos da fluência dos elementos, da retração do betão e do caso mais gravoso de variação do teor de água da madeira achamos tensões se verificam as condições dos Estados Limites Últimos e dos Estados Limites de Serviço.

Relativamente à força nos ligadores verificou-se que os mais esforçados se encontram nos extremos da viga mista. Concluiu-se que as ações estáticas e as ações cinemáticas provocam esforços nos ligadores de grandeza idêntica.

Segundo os valores obtidos, pode afirmar-se que o Anexo B do Eurocódigo 5, 1-1, deveria ser completado com uma análise da retração do betão e da variação do teor de água na madeira quando se tratasse da análise de uma estrutura mista madeira-betão, uma vez que são estes efeitos que provocam uma maior variação da distribuição de tensões e deformações a longo prazo.

Sugere-se então que seja criado um modelo simplificado para análise de estruturas mistas madeira-betão que tenha em conta não só a fluência dos materiais mas também a retração no betão e a variação do teor de água na madeira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aldi, P. "Timber-concrete composite beams: A numerical approach to investigate the behaviour of grooved connections." *Proc., 7th FIB Ph.D. Symp., Estugarda, Alemanha, 2008.*

Azevedo, Álvaro. *Método dos Elementos Finitos*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.

Benitez, M. F. "Development and testing of timber/concrete shear connectors." *Proc., 6th World Conf. on Timber Engineering*. Vancouver, BC, Canadá, 2000.

Bonamini, G., A. Ceccotti, e L. Uzielli. "Short- and long-term experimental tests on antique larch and oak wood-concrete composite elements." *Proceedings, C.T.E. Conference*. Bolonha, Itália, 1990.

Branco, J., e P. Cruz. "Lajes Mistas de Madeira-Betão." Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 2002.

Capozucca, R. "Bond stress system of composite-concrete timber beams." *Materials and Structures, Vol. 31*, 1998.

Ceccotti, A. "Composite concrete-timber structures." *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2002.

Ceccotti, A., M. Fragiaco, e S. Giordano. "Long-term and collapse tests on a timber-concrete composite beam with glued-in connection." *Materials and Structures 40 (1)*, 2006.

Chassagne, P., E. Bou Saïd, F. J. Jullien, e P. Galimard. "Three dimensional creep model for wood under variable humidity - Numerical analyses at different material scales." *Mech. Time-Depend. Mater.*, 9, 203-223, 2006.

Cone, C. M. "A composite timber-concrete bridge." *TDA Bulletin 1 (9)*, 1963.

Cook, J. P. "Composite construction methods." *J. Constr. Div*, 102(1), 1976: 21-27.

Dias, A., e J. Van de Kuilen. “Long-term load-deformation behaviour of timber-concrete joints.” *Structures and Buildings*, 164, 141-154, 2011.

Dias, A., J. Van de Kuilen, S. Lopes, e H. Cruz. “A non-linear 3D FEM model to simulate timber-concrete joints.” *Adv. Eng. Software*, 38, 522-530, 2007.

Dias, Alfredo. “Mechanical behaviour of timber–concrete joints.” Ph.D. thesis, Delft University of Technology, 2005.

Dias, Alfredo, Miguel Ferreira, Luis Jorge, e Helder Martins. “Timber-concrete practical applications - bridge case study.” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, 2011.

Döhrer, A., e K. Rautenstrauch. “Connectors for timber-concrete composite-bridges.” *Proceedings, 35th Meeting of Working Comission W18 - Timber Structures*. International Council for Research and Innovation in Building and Construction (CIB), Roterdão, Holanda, 2006.

EN 1992, 1-1. *Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão - Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*. CEN, 2004.

EN 1995, 1-1. *Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings*. CEN, 2003.

EN1194. *EN 1194 - Timber structures - Glued laminated timber - Strenght classes and determination of characteristic values*. CEN, 1999.

Forti, Nádia. “Análise numérica de vigas mistas em concreto e madeira.” Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, 2004.

Fragiacomo, M. “A finite element model for long-term analysis of timber-concrete composite beams.” *Struct. Eng. Mech.*, 20, 173-179, 2005.

Fragiacomo, M. “Long-term behaviour of timber-concrete composite beams. II: Numerical analysis and simplified evaluation.” *Journal of Structural Engineering*, 2006.

Fragiacomo, M., C. Amadio, e L. Macorini. "A finite element model for collapse and long-term analysis of steel-concrete composite beams." *Journal of Structural Engineering*, 130, 489-497, 2004.

Fragiacomo, M., C. Amadio, e L. Macorini. "Short- and long-term performance of the 'Tecnaria' stud connector for timber-concrete composite beams." *Materials and Structures*, 40(10), 2007.

Frangi, A., e M. Fontana. "Elasto-plastic model for timber-concrete composite beams with ductile connection." *Structural Engineering International* 13 (1), 2003.

Godycki, T., J. Pawlica, e J. Kleszczewski. "Verbunddecke aus Holzrippen und Bettonplatte." *Bauingenieur* 59, 1984.

Gutkowski, R., J. Balogh, e L. G. To. "Finite element modeling of short-term field response of composite wood-concrete floors/decks." *Journal of Structural Engineering*, 136 (6), 2010.

Jorge, Luís. "Estruturas mistas madeira-betão com a utilização de betões de agregados leves." Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2005.

Kuhlmann, U., e B. Michelfelder. "Grooves as shear-connectors in timber-concrete composite structures." *Proceedings, 8th World Conference on Timber Engineering*. Lahti, Finlândia, 2004.

Kuhlmann, U., e J. Schänzlin. "Grooves as shear connectors for timber-concrete composite decks." *Proceedings, RILEM Conference on Joints in Timber Structures*. RILEM, Bagnaux, França, 2001.

LNEC-M9. "Laboratório Nacional de Engenharia Civil, M9 - Humidade da madeira." 1997.

Muller, P. "Decke aus hochkanting stehenden Holzbohlen oder Holzbrettern und Betondeckschicht." *Patentschau aus dem Betonbau und den damit verwandten Gebieten, Auszuge aus den Patentschriften Beton und Eisen*, 1922.

Möhler, K. "On the load carrying behavior of beams and columns of compound sections with flexible connections." Technical Univ. of Karlsruhe, Alemanha, 1956.

Natterer, J., J. Hamm, e P. Favre. “Composite wood-concrete floors for multi-story buildings.” *Proc., Int. Wood Engineering Conf., Vol. 3*. New Orleans: 431-435, 1996.

Negrão, J., C. Leitão de Oliveira, F. Maia de Oliveira, e P. Cachim. “Glued composite timber-concrete beams I: Interlayer connection specimen tests.” *Journal of Structural Engineering*, 136, 1236-1245, 2010.

Negrão, J., F. Maia de Oliveira, C. Leitão de Oliveira, e P. Cachim. “Glued composite timber-concrete beams II: Analysis and Tests of Beam Specimens.” *Journal of Structural Engineering*, 136, 1246-1254, 2010.

Newmark, N. M., C. P. Siess, e I. M. Viest. “Tests and analysis of composite beams with incomplete interaction.” *Proceedings, Society for Experimental Stress Analysis*, VI. 9, No.1, 1951.

Papadopoulos, P. “Introduction to the finite Element Method (course notes - Chapter 1).” Berkeley, Universidade da Califórnia, 2010.

Rodrigues, João, Paulo Providência, e Alfredo Dias. “Use of composite timber-concrete bridges solutions in Portugal.” *International Conference on Timber Bridges 2010*. 2010.

Schaub, O. “Verbunddecke aus Holzrippen und Betonplatte.” *Patentschrift No. 673*, 1939.

Schänzlin, J. *Time dependent behavior of composite structures of board stacks and concrete*. University of Stuttgart, Germany: Ph. D. thesis, 2003.

STEP. *STEP - Timber Engineering*. First Edition Centrum Hout, Holanda, 1995.

To, L. G. “3D finite element modelling of time-dependent behaviour of wood-concrete composite beams.” Ph.D. thesis, Colorado State University, Fort Collins, CO, 2008.

Tommola, J., L. Salokangas, e A. Jutila. “Tests on shear connectors.” *Nordic Timber Bridge Project: Nordic Timber Council*. Estocolmo, Suécia, 1999.

Turrini, G., e M. Piazza. “A technique for stiffness and strength upgrading of wooden floors.” *Recuperare*, 5, 1983: 224-237.

Turrini, G., e M. Piazza. “Static behaviour of timber-concrete composite structures.” *Recuperare*, 6, 1983: 214-225.

Ulrike, K., e J. Schänzlin. “Time dependent behaviour of timber-concrete-composite structures.”

Van der Linden, Mario. “Timber-concrete composite beams.” 1999.

Wood Handbook. *Wood Handbook - Wood as an engineering material*. U.S. - Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999.

Yeoh, David. “Behaviour and design of timber-concrete composite floor system.” Ph. D. thesis, University of Canterbury, Nova Zelândia, 2010.

Yeoh, David, Massimo Fragiaco, Mary De Franceschi, e Koh Heng Boon. “State of the Art on Timber-Concrete Composite Structures: Literature Review.” *Journal of Structural Engineering*, 2011.

ANEXO A - RESULTADOS

Neste anexo apresentam-se os valores obtidos a nível de tensões e de deformações para todas as análises realizadas. As tensões negativas correspondem a esforços de compressão e as positivas a esforços de tração.

Quadro A.1 - Tensões para análise a curto-prazo

Combinação	Tensões [N/mm ²]							
	EvalS				EC5			
	Betão		Madeira		Betão		Madeira	
	Topo	Base	Topo	Base	Topo	Base	Topo	Base
Fundamental (ULS)	-5,95	0,10	-1,87	5,89	-4,60	-1,45	-1,71	5,88
Quase-Permanente (SLS)	-1,77	-0,35	-0,48	1,94	-	-	-	-
Caraterística (SLS)	-4,09	-0,09	-1,11	3,98	-3,19	-1,13	-0,98	3,96

Quadro A.2 - Deformações para análise a curto-prazo

Combinação	Deslocamentos [mm]		Rotações dos apoios [mm/m]	
	EvalS	EC5	EvalS	EC5
Quase-Permanente (SLS)	3,443	-	0,779	-
Caraterística (SLS)	6,656	7,586	1,470	1,587

Quadro A.3 - Tensões para análise a longo-prazo

Combinação	Tensões [N/mm ²]							
	EvalS				EC5			
	Betão		Madeira		Betão		Madeira	
	Topo	Base	Topo	Base	Topo	Base	Topo	Base
Fundamental (ULS)	-5,37	-0,03	-2,60	6,31	-4,03	-1,53	-2,51	6,33
Quase-Permanente (SLS)	-1,57	-0,38	-0,75	2,09	-1,36	-0,58	-0,78	2,12
Caraterística (SLS)	-3,71	-0,18	-1,58	4,25	-	-	-	-

Quadro A.4 - Deformações para análise a longo-prazo

Combinação	Deslocamentos [mm]		Rotações dos apoios [mm/m]	
	EvalS	EC5	EvalS	EC5
Quase-Permanente (SLS)	6,750	6,903	1,522	1,465
Caraterística (SLS)	10,935	-	2,417	-

Quadro A.5 - Tensões para análise do efeito da fluência do betão

Combinação	Tensões [N/mm ²]							
	EvalS				EC5			
	Betão		Madeira		Betão		Madeira	
	Topo	Base	Topo	Base	Topo	Base	Topo	Base
Fundamental (ULS)	-5,02	-0,35	-2,67	6,37	-3,69	-1,88	-2,53	6,36
Quase-Permanente (SLS)	-0,93	-0,21	-2,03	2,81	-1,20	-0,68	-0,90	2,19
Caraterística (SLS)	-2,40	0,07	-4,03	5,64	-	-	-	-

Quadro A.6 - Deformações para análise do efeito da fluência do betão

Combinação	Deslocamentos [mm]		Rotações dos apoios [mm/m]	
	EvalS	EC5	EvalS	EC5
Quase-Permanente (SLS)	2,661	3,917	0,577	0,939
Caraterística (SLS)	4,998	-	1,066	-

Quadro A.7 - Tensões para análise do efeito da fluência da madeira

Combinação	Tensões [N/mm ²]							
	EvalS				EC5			
	Betão		Madeira		Betão		Madeira	
	Topo	Base	Topo	Base	Topo	Base	Topo	Base
Fundamental (ULS)	-6,49	0,37	-1,41	5,62	-5,13	-1,22	-1,21	5,58
Quase-Permanente (SLS)	-2,03	-0,19	-0,30	1,83	-1,84	-0,41	-0,28	1,83
Caraterística (SLS)	-4,43	0,11	-0,85	3,82	-	-	-	-

Quadro A.8 - Deformações para análise do efeito da fluência da madeira

Combinação	Deslocamentos [mm]		Rotações dos apoios [mm/m]	
	EvalS	EC5	EvalS	EC5
Quase-Permanente (SLS)	4,916	4,416	1,119	1,044
Caraterística (SLS)	8,476	-	1,886	-

Quadro A.9 - Tensões para análise do efeito da fluência da ligação

Combinação	Tensões [N/mm ²]							
	EvalS				EC5			
	Betão		Madeira		Betão		Madeira	
	Topo	Base	Topo	Base	Topo	Base	Topo	Base
Fundamental (ULS)	-5,94	0,58	-2,60	6,29	-4,59	-0,88	-2,59	6,35
Quase-Permanente (SLS)	-1,77	-0,16	-0,76	2,09	-1,57	-0,33	-0,84	2,14
Caraterística (SLS)	-4,08	0,18	-1,51	4,19	-	-	-	-

Quadro A.10 - Deformações para análise do efeito da fluência da ligação

Combinação	Deslocamentos [mm]		Rotações dos apoios [mm/m]	
	EvalS	EC5	EvalS	EC5
Quase-Permanente (SLS)	4,098	4,407	0,924	1,040
Caraterística (SLS)	7,523	-	1,659	-

Quadro A.11 - Tensões e deformações para análise do efeito da retração do betão

Ação dinâmica	Tensões [N/mm ²]				Deslocamento [mm]	Rotação dos apoios [mm/m]
	Betão		Madeira			
	Topo	Base	Topo	Base		
Retração	0,05	1,83	-2,79	1,50	7,085	1,558

Quadro A.12 - Tensões e deformações para análise do efeito da variação do teor de água da madeira

Ação dinâmica	Tensões [N/mm ²]				Deslocamento [mm]	Rotação dos apoios [mm/m]
	Betão		Madeira			
	Topo	Base	Topo	Base		
Varição dimensional 1% Varição teor de água 1%	0,01	0,27	-0,41	0,22	1,072	0,229
Varição dimensional 1% Varição teor de água 6%	0,04	1,58	-2,41	1,29	6,294	1,343
Varição dimensional 0,1% Varição teor de água 6%	0,00	0,02	-0,04	0,02	0,093	0,020
Varição dimensional 0,1% Varição teor de água 6%	0,00	0,16	-0,25	0,13	0,653	0,139

Quadro A.13 – Tensões e deformações para análise dos efeitos diferidos e termo-higrométricos (sendo considerado o caso mais gravoso na variação do teor de água na madeira)

Fluência + Retração + Varição teor de água (sup. 6%)	Tensões [N/mm ²]				Deslocamento [mm]	Rotação dos apoios [mm/m]
	Betão		Madeira			
	Topo	Base	Topo	Base		
ULS	-4,97	1,90	-6,10	8,21	-	-
SLS	-3,30	1,78	-5,13	6,18	22,969	5,000