

A MADEIRA DE CASTANHO PARA FINS ESTRUTURAIS

casos de estudo e investigação
realizada pela Universidade do
Minho, Portugal

Ricardo Brites

2007-05-23



Universidade do Minho

Sumário:

- ❑ O que é o ISISE
- ❑ CASOS DE ESTUDO
 - Sala do Relicário de Santa Cruz, Coimbra
 - Sé do Porto
 - Câmara Municipal, Arcos de Valdevez
 - Igreja da Conceição, Braga
- ❑ INVESTIGAÇÃO REALIZADA NA UM
 - Avaliação das propriedades mecânicas da madeira de castanho nova e antiga
 - Comportamento mecânico das ligações tradicionais sujeitas a cargas monotónicas
 - Estimação das propriedades mecânicas da madeira com base em microprovetes recolhidos *in situ*.
 - Efeito da degradação biológica nas propriedades mecânicas da madeira
 - Avaliação probabilística da segurança de estruturas de madeira

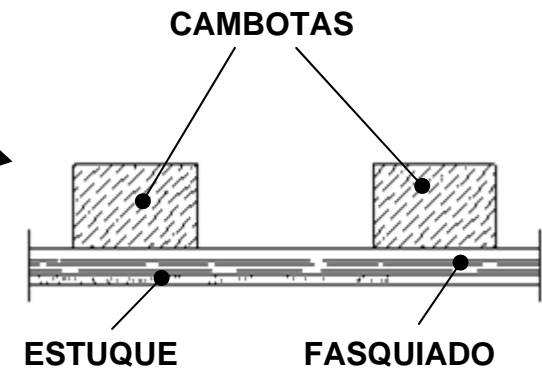
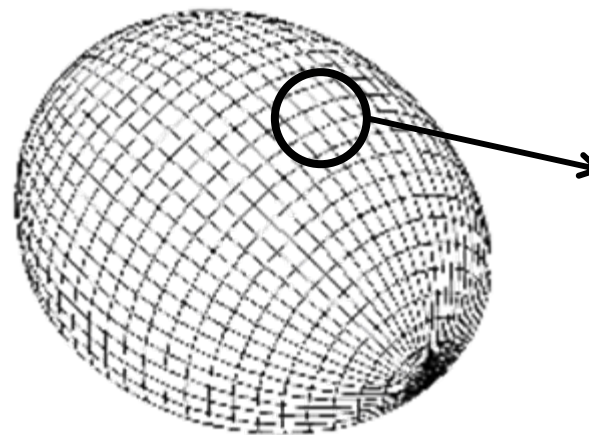
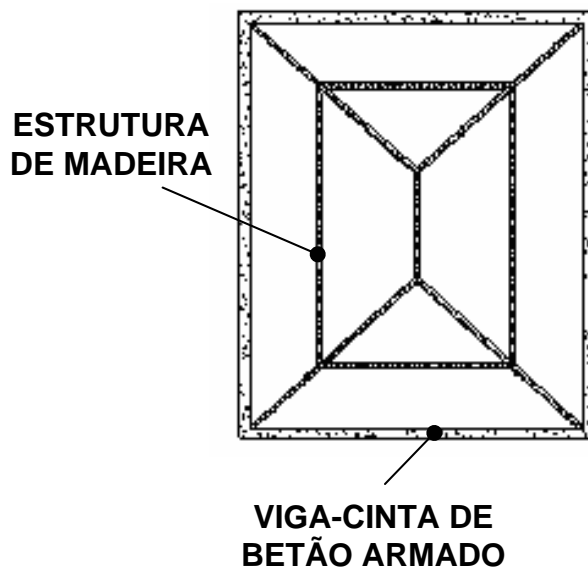
O QUE É O ISISE

- ❑ O ISISE (Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering) é uma unidade que incorpora as divisões de estruturas dos Departamentos de Engenharia Civil das Universidades de Coimbra e Minho. Conta ainda com membros da Universidade da Beira Interior, Institutos Politécnicos de Bragança, Castelo Branco, Coimbra, Guarda, Leiria e Viseu, bem como a Universidade Fernando Pessoa (privada).
- ❑ O ISISE procura promover a inovação e a sustentabilidade em articulação com o sector industrial da construção. A Unidade está organizada em 3 Grupos de Investigação, nomeadamente nas áreas das Construções Históricas e Alvenaria, Aço e sistemas mistos, e Betão.
- ❑ O grupo de Construções Históricas e Alvenaria (HMS) conta com intervenções em mais de 30 edifícios históricos nacionais.

CASOS DE ESTUDO: Sala do Relicário de Santa Cruz

□ Enquadramento Histórico

- O mosteiro de Santa Cruz, em Coimbra, data do ano de 1131.
- A cobertura da sala do relicário é composta por uma abóbada de fasquiado que apresenta uma deformação considerável e fendas devido à deformação da estrutura da cobertura (também em madeira) que se encontrava em contacto com a abóbada.



CASOS DE ESTUDO: Sala do Relicário de Santa Cruz

❑ Anomalias detectadas

- A estrutura da cobertura é bastante complexa, devido à introdução de diversos elementos estruturais ao longo do tempo
- Foi utilizada madeira de castanho (originalmente) e de pinho bravo (em intervenções posteriores)
- Principais patologias:
 - Estrutura principal: manchas de humidade, podridão do forro (~30%), deformação excessiva; ataque biológico (carunchos pequenos)
 - Abóbada: ataque biológico (caruncho pequeno), detritos de animais e de intervenções anteriores, deformação excessiva



CASOS DE ESTUDO: Sala do Relicário de Santa Cruz

❑ Ensaios não-destrutivos efectuados:

- Inspeção Visual
- Precursão
- Escarificação
- Pilodyn®
- Resistograph®

❑ Conclusões :

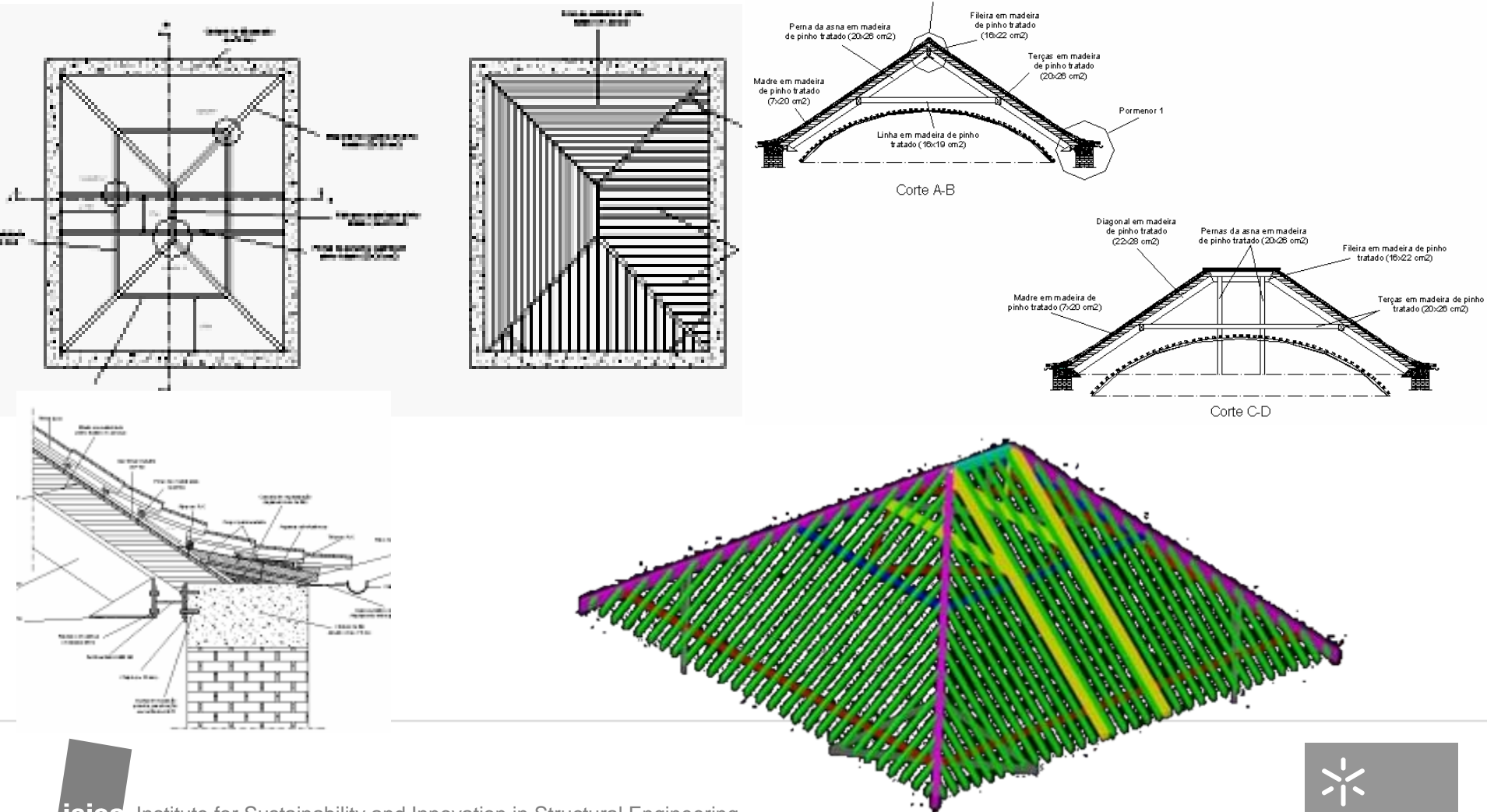
- Os madeiramentos encontram-se atacados por insectos xilófagos, que na maioria dos casos, restringe-se à zona do borne.
- As entregas das vigas de suporte da estrutura nas paredes de alvenaria encontram-se em bom estado.
- Alguns dos elementos do forro e do madeiramento da cobertura, não se apresentam em condições devido ao seu avançado estado de deterioração, devendo-se proceder nestes casos à sua substituição.

CASOS DE ESTUDO: Sala do Relicário de Santa Cruz

- ❑ Hipóteses apresentadas:
 - Manter a actual estrutura de madeira e introduzir novos elementos de madeira de eixo curvilíneo a apoiar nas paredes exteriores;
 - Implementação de uma nova estrutura de madeira
- ❑ Características da nova cobertura:
 - Forro em madeira de pinho
 - Elementos estruturais em madeira de pinho e abeto (apenas quando pinho não estiver disponível nas dimensões pretendidas)
 - Sub-telha ONDULINE®
 - Telha cerâmica
- ❑ A presença da abóbada em fasquiado não permite uma solução tradicional de asnas simples, com linhas ao nível dos apoios na viga-cinta de betão armado.

CASOS DE ESTUDO: Sala do Relicário de Santa Cruz

☐ Solução apresentada:



CASOS DE ESTUDO: Sala do Relicário de Santa Cruz

- ❑ Execução da nova cobertura:



CASOS DE ESTUDO: Sé do Porto

❑ Enquadramento Histórico

- A Sé do Porto foi construída em meados do Século XII.
- Está situada no coração do centro histórico do Porto, sendo um dos seus principais e mais antigos monumentos.



CASOS DE ESTUDO: Sé do Porto

☐ Intervenções Efectuadas

- Nos últimos anos, foram conduzidos avultados trabalhos de conservação.
- Estes trabalhos procuraram utilizar técnicas tradicionais e minimizar as intervenções a realizar.



CASOS DE ESTUDO: Sé do Porto

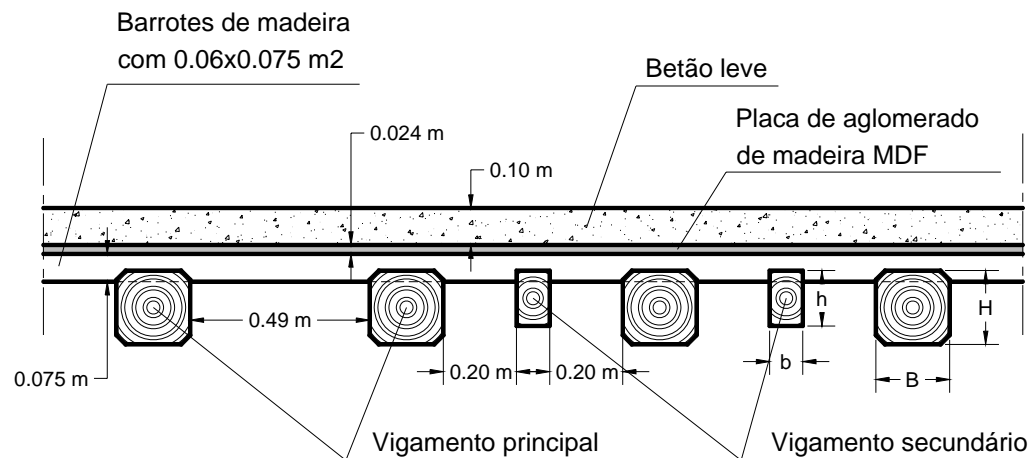
- ❑ Trabalhos efectuados nas estruturas de madeira:
 - Limpeza
 - Aplicação de biocidas e de produtos preservativos
 - Consolidação
 - Reforço
 - Substituição localizada



CASOS DE ESTUDO: Câmara Municipal, Arcos de Valdevez

□ Descrição:

- Pavimento da sala de reuniões da Câmara Municipal de Arcos de Valdevez
- Vãos entre os 6 e os 7m, vigas principais de $225 \times 225 \text{mm}^2$, vigas secundárias de $65 \times 100 \text{mm}^2$ e Barrotes com $60 \times 75 \text{mm}^2$;
- Estrutura reforçada com painéis MDF de 24mm de espessura + camada de betão leve de 100mm de espessura.
- Esta solução **triplicou** o peso próprio do pavimento, pelo que foi pedido um parecer acerca da sua segurança estrutural



CASOS DE ESTUDO: Câmara Municipal, Arcos de Valdevez

❑ Condições de segurança:

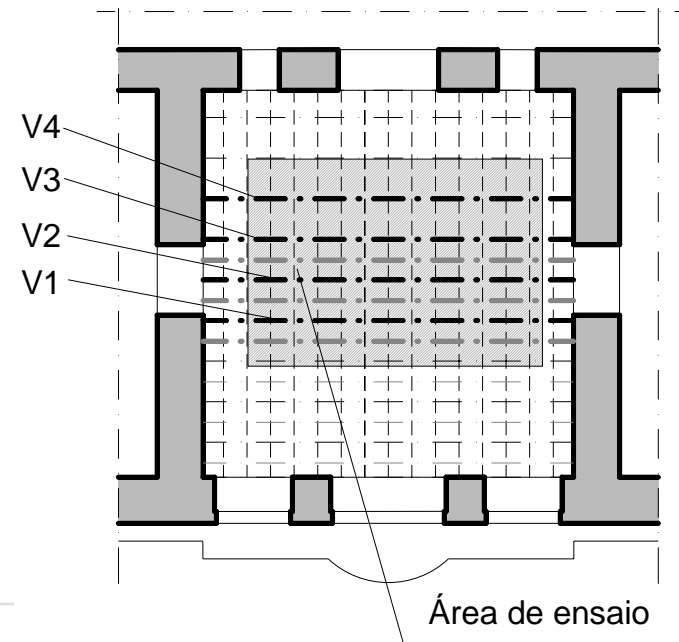
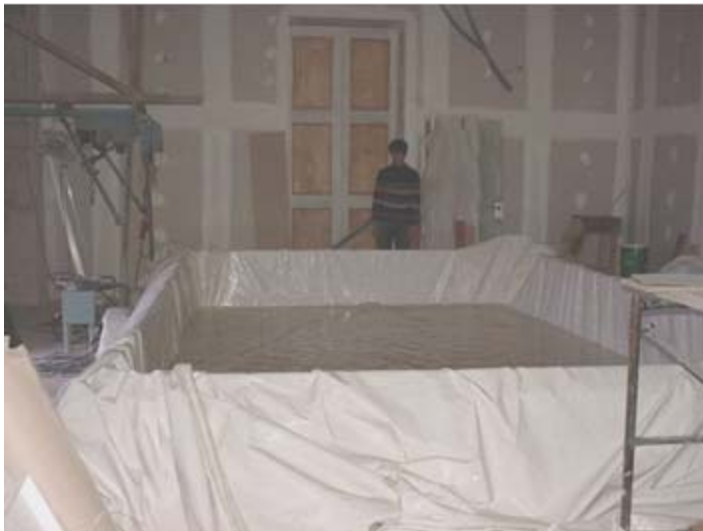
- Madeiramento de castanho de uma maneira geral em bom estado de conservação
- Uma verificação estrutural mostrou que a estrutura não se encontrava em condições de segurança sem as placas de MDF



CASOS DE ESTUDO: Câmara Municipal, Arcos de Valdevez

❑ Condições de segurança:

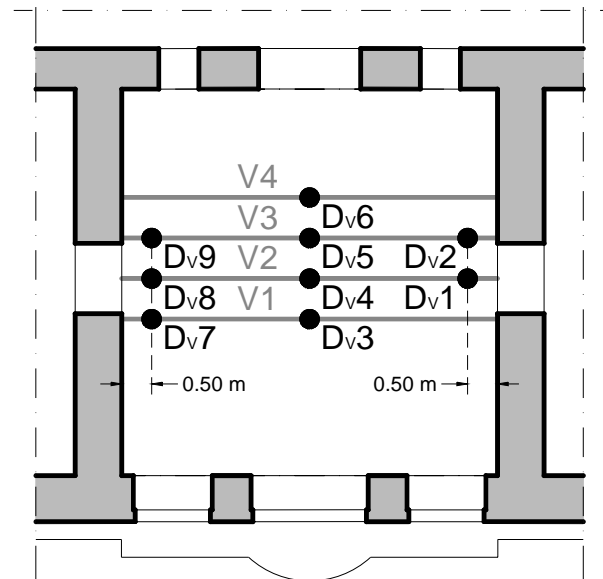
- Para avaliar a actual situação de segurança, procedeu-se a um **ensaio de carga**, de acordo com as recomendações da norma espanhola “*Pruebas de carga en Puentes de Carretera*”
- Utilizou-se um tanque de água para atingir uma sobrecarga de 3kN/m^2 e comparadores mecânicos para medir as deformações observadas



CASOS DE ESTUDO: Câmara Municipal, Arcos de Valdevez

□ Condições de segurança:

- Para avaliar a actual situação de segurança, procedeu-se a um **ensaio de carga**, de acordo com as recomendações da norma espanhola “*Pruebas de carga en Puentes de Carretera*”
- Utilizou-se um tanque de água para atingir uma sobrecarga de 3kN/m^2 e comparadores mecânicos para medir as deformações observadas

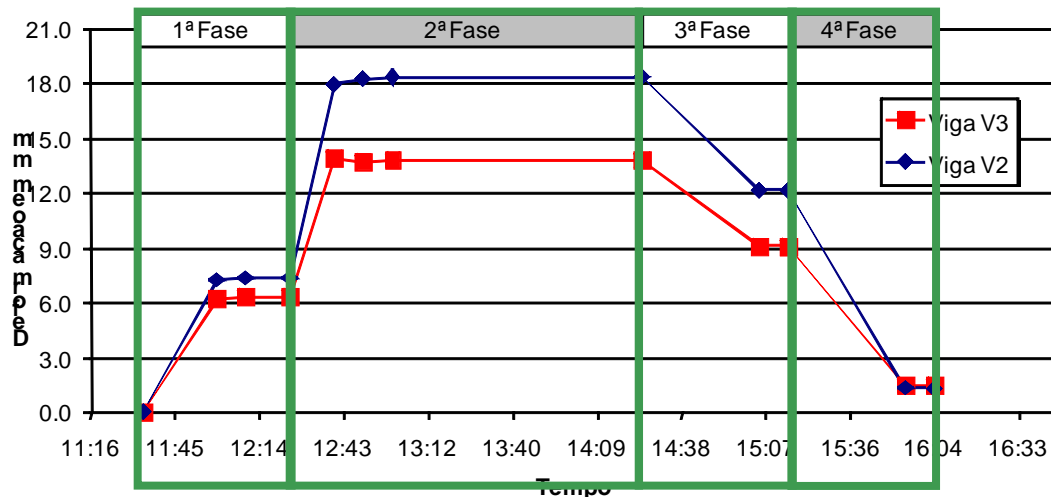


CASOS DE ESTUDO: Câmara Municipal, Arcos de Valdevez

☐ Resultados:

- Verificou-se um ajuste da estrutura do pavimento às paredes de alvenaria (~0.5mm)
- Deformações residuais reduzidas (< 10%) e deformações máximas a baixo das admissíveis
- Pavimento com capacidade para suportar as novas cargas de serviço

Variação da Deformação Elástica vs Tempo



50% da carga máxima Descarga De 50% da carga máxima

Quadro Resumo

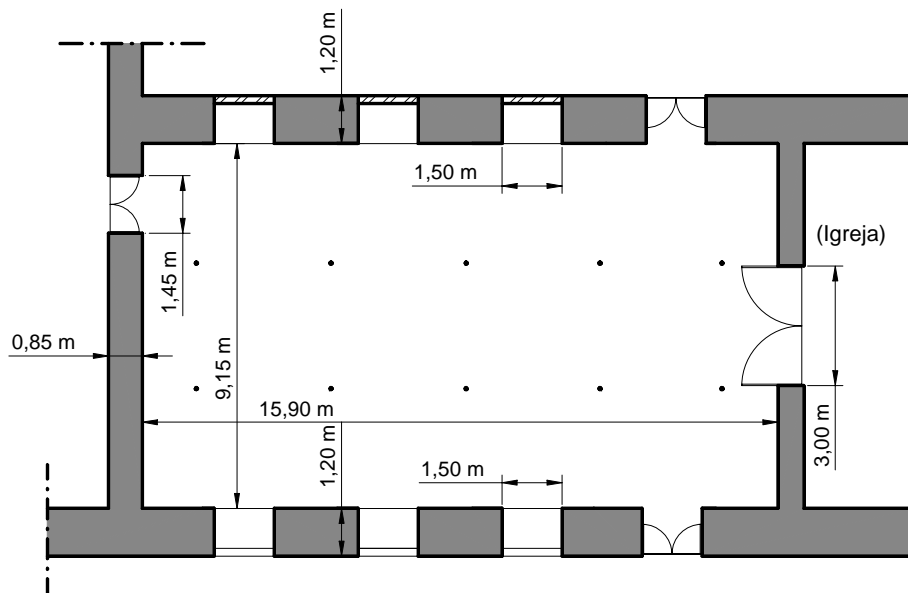
Viga	Desloc. máximo	Def. residual
V2	18.31 mm	7.15%
V3	13.93 mm	10.56%

L/300 = 21mm (EC5)

CASOS DE ESTUDO: Igreja da Conceição, Braga

❑ Descrição:

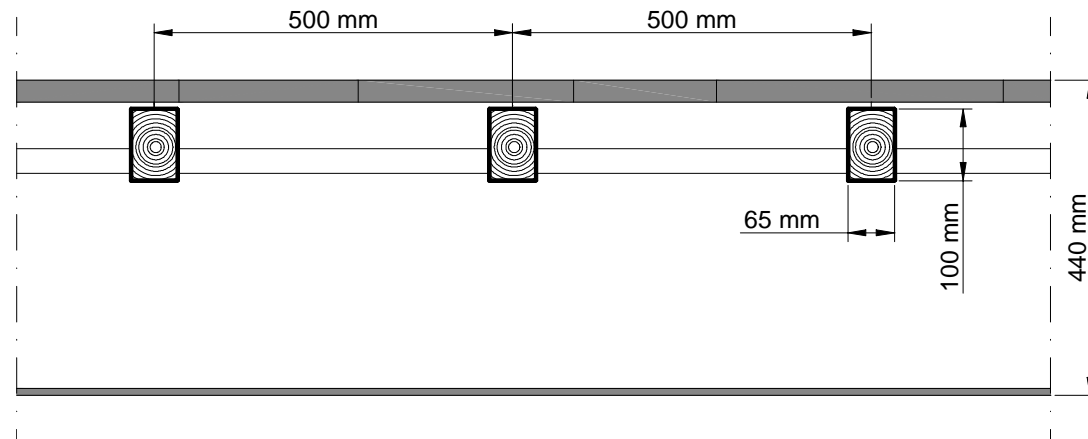
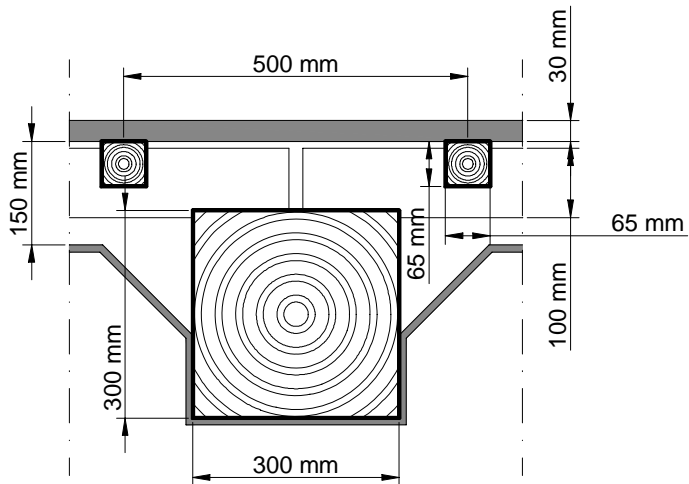
- A Igreja de Nossa Senhora da Conceição, em Braga, foi erguida em 1625
- O estudo efectuado visou determinar as condições de segurança de um pavimento de madeira que iria sofrer uma alteração à sua utilização, de coro não aberto ao público para um museu.
- O referido pavimento apresenta uma deformação permanente considerável (devido a fenómenos de fluência)



CASOS DE ESTUDO: Igreja da Conceição, Braga

❑ Características estruturais:

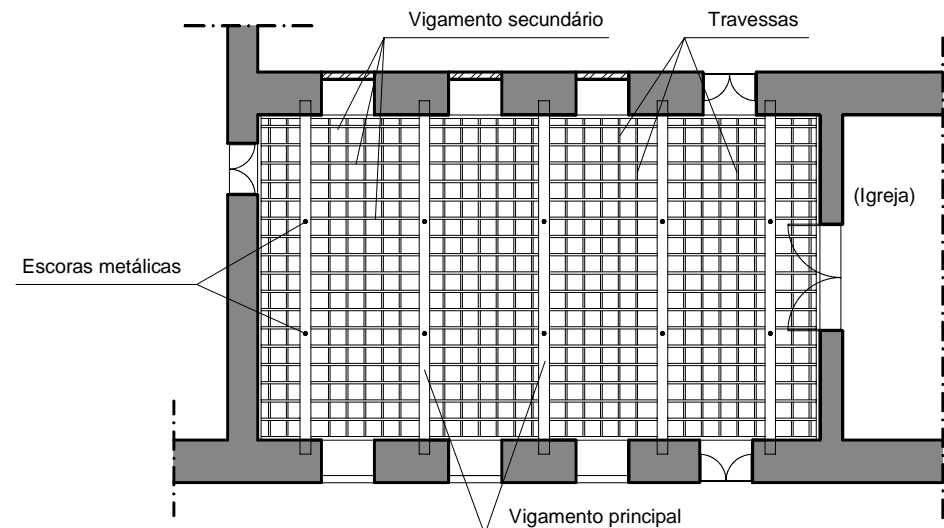
- Pavimento com um vão de 9.15m
- Vigas principais de 300x300mm²(castanho), vigas secundárias de 65x100mm²(castanho), barrotes com 65x65mm² (eucalipto)
- Soalho com pranchas de 30mm de espessura e entre 300 a 400mm de largura (pinho e castanho)
- Tecto do piso inferior policromado, em pinho com 10 mm de espessura
- Escoras metálicas tubulares com diâmetro exterior de 49mm, aos terços do vão das vigas principais



CASOS DE ESTUDO: Igreja da Conceição, Braga

❑ Características estruturais:

- Pavimento com um vão de 9.15m
- Vigas principais de $300 \times 300 \text{mm}^2$ (castanho), vigas secundárias de $65 \times 100 \text{mm}^2$ (castanho), barrotes com $65 \times 65 \text{mm}^2$ (eucalipto)
- Soalho com pranchas de 30mm de espessura e entre 300 a 400mm de largura (pinho e castanho)
- Tecto do piso inferior policromado, em pinho com 10 mm de espessura
- Escoras metálicas tubulares com diâmetro exterior de 49mm, aos terços do vão das vigas principais



CASOS DE ESTUDO: Igreja da Conceição, Braga

☐ Ensaio não-destrutivo:

- Inspeção visual
- Escarificação
- Precursão
- Resistograph®



CASOS DE ESTUDO: Igreja da Conceição, Braga

☐ Ensaios não-destrutivos:

- Inspeção visual
- Escarificação
- Precursão
- Resistograph®



CASOS DE ESTUDO: Igreja da Conceição, Braga

☐ Verificação da segurança estrutural

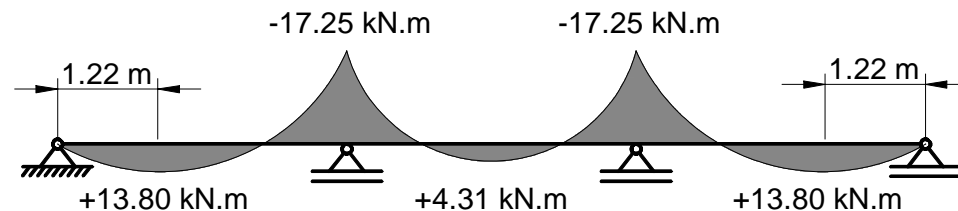
- Para os estados limites últimos e para os estados limites de actualização, a estrutura existente é insuficiente para satisfazer as exigências regulamentares (EC5)
- Para satisfazer as novas exigências estruturais, o pavimento necessitará de reforço

$$f_{m,k} = 30 \text{ MPa}$$

$$f_{v,k} = 2.7 \text{ MPa}$$

$$E_{0,m} = 12000 \text{ MPa}$$

$$X_d = \frac{k_{\text{mod}} \cdot X_k}{\gamma_w}$$



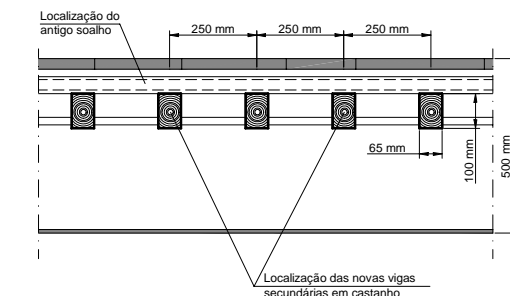
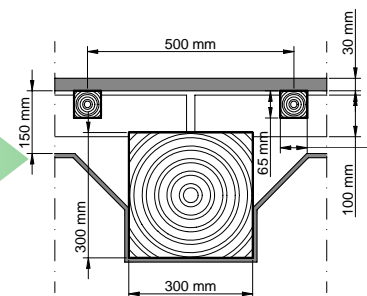
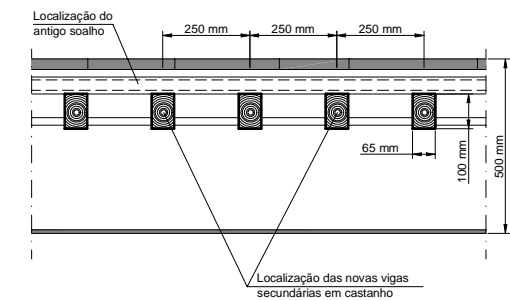
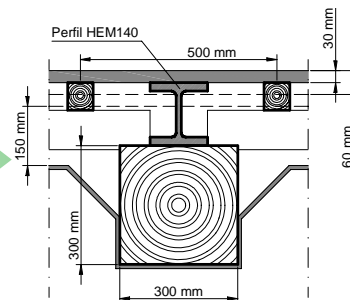
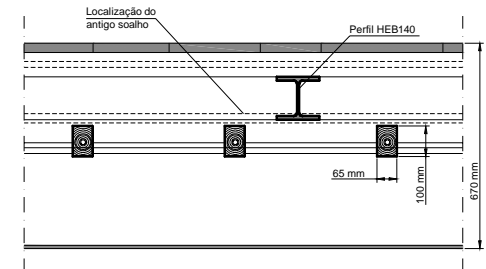
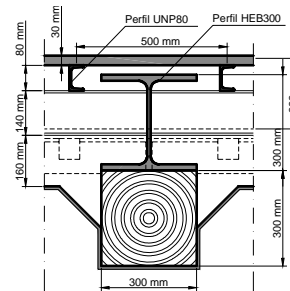
CASOS DE ESTUDO: Igreja da Conceição, Braga

❑ Propostas de reforço apresentadas:

Nova estrutura metálica que suportará as cargas variáveis e o peso próprio do pavimento

Reforço das vigas principais e secundárias com perfis metálicos

Reforço das vigas secundárias e substituição das escoras



CASOS DE ESTUDO: Igreja da Conceição, Braga

□ Propostas de reforço apresentadas:

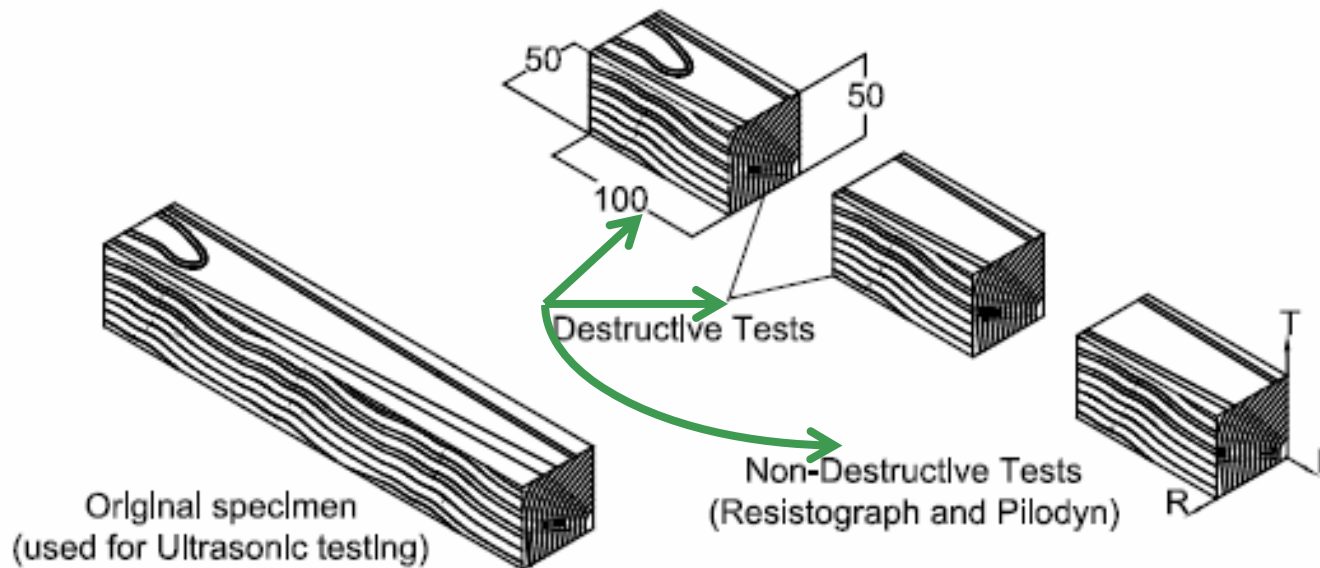
	Carga máxima	Custos Previstos	Vantagens	Desvantagens
A	500 kg/m ²	65.000 €	<ul style="list-style-type: none"> - O pavimento pode suportar 500 kg/m² de sobrecarga - Possibilidade de reversão para a estrutura original 	<ul style="list-style-type: none"> - Solução mais cara - Aumento da cota do pavimento em cerca de 20 a 30 cm - A solução mais invasiva
B	300 kg/m ²	22.500 €	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilidade de reversão para a estrutura original - Possibilidade de elevar o pavimento para a cota original 	<ul style="list-style-type: none"> - O pavimento pode suportar até 300 kg/m² de sobrecarga - Subida da cota do pavimento em 6 a 10 cm
C	300 kg/m ²	17.000 €	<ul style="list-style-type: none"> - Solução mais barata - Possibilidade de elevar o pavimento para a cota original - Possibilidade de manter a espessura de pavimento inalterada 	<ul style="list-style-type: none"> - O pavimento pode suportar até 300 kg/m² de sobrecarga - Impossibilidade de reversão para a estrutura original - Intervenção na arquitectura do piso inferior

INVESTIGAÇÃO: Propriedades mecânicas da madeira de castanho nova e antiga

- ❑ Feio preparou uma campanha de ensaios que permitiram estabelecer as propriedades mecânicas da madeira de castanho (*Castanea sativa* Mill.)
- ❑ Foram realizados diversos ensaios destrutivos e não-destrutivos em peças de castanho novo e antigo
- ❑ O castanho foi escolhido devido à sua vasta aplicação em estruturas antigas e madeira na região norte de Portugal e ao pouco conhecimento das propriedades mecânicas do castanho antigo
- ❑ O trabalho experimental englobou cerca de 370 ensaios destrutivos (compressão perpendicular ao fio, compressão paralela ao fio e tracção paralela ao fio), metade de peças de castanho novo e a outra metade de antigo

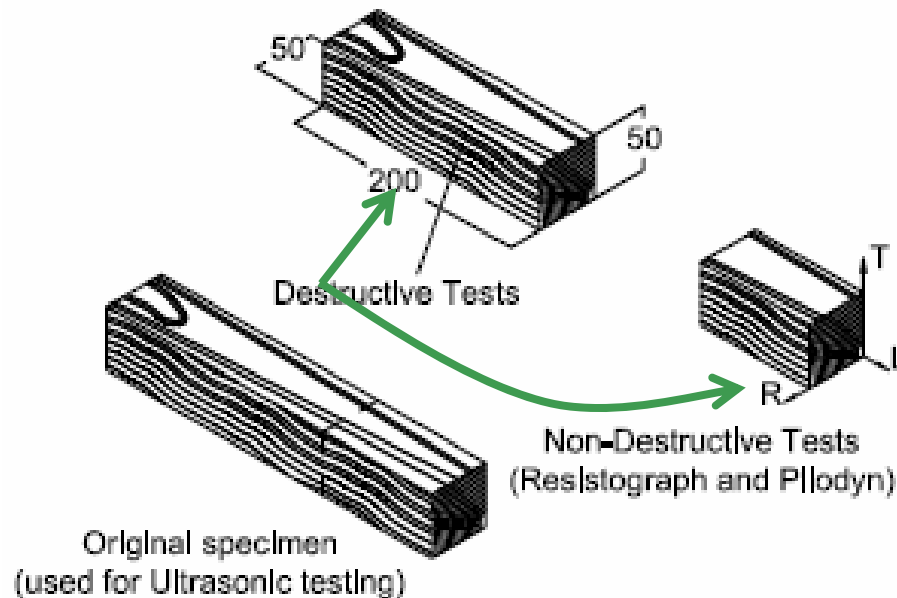
INVESTIGAÇÃO: Propriedades mecânicas da madeira de castanho nova e antiga

- Ensaios de compressão perpendicular ao fio:



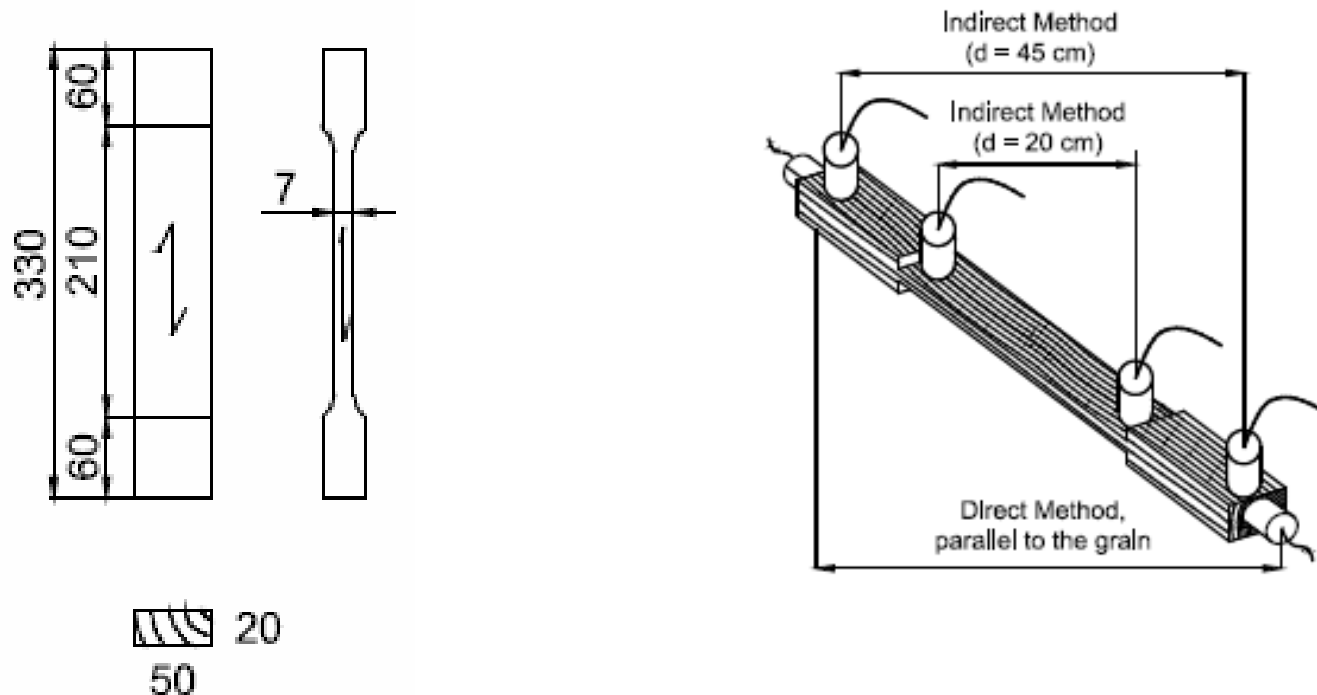
INVESTIGAÇÃO: Propriedades mecânicas da madeira de castanho nova e antiga

- Ensaios de compressão paralela ao fio:



INVESTIGAÇÃO: Propriedades mecânicas da madeira de castanho nova e antiga

- Ensaio de tracção paralela ao fio:



INVESTIGAÇÃO: Propriedades mecânicas da madeira de castanho nova e antiga

❑ Conclusões dos ensaios obtidos:

- A densidade tem uma influência significativa nas propriedades mecânicas da madeira de castanho, mas não consegue explicar a variabilidade observada
- O valor preconizado pela norma EN 384 para a compressão perpendicular ao fio, $f_{t,90}$, parece não estar do lado da segurança e não fornece uma indicação capaz da capacidade resistente:

		Characteristic compressive strength values (N/mm ²)								
		Radial		Diagonal		Tangential		Diffuse		
		NCW	OCW	NCW	OCW	NCW	OCW	NCW	OCW	
EN384	EN 384	$f_{c,90,k}$	7.49	8.34	7.79	7.88	7.59	8.32	8.35	7.96
Obtido	Exp.	$f_{c,90,05}$	4.70	4.21	4.10	4.75	5.10	6.28	5.21	4.43
	Tests	$f_{c,90,min}$	7.45	7.74	6.99	6.67	6.58	7.47	6.22	6.81

INVESTIGAÇÃO: Propriedades mecânicas da madeira de castanho nova e antiga

❑ Conclusões dos ensaios obtidos:

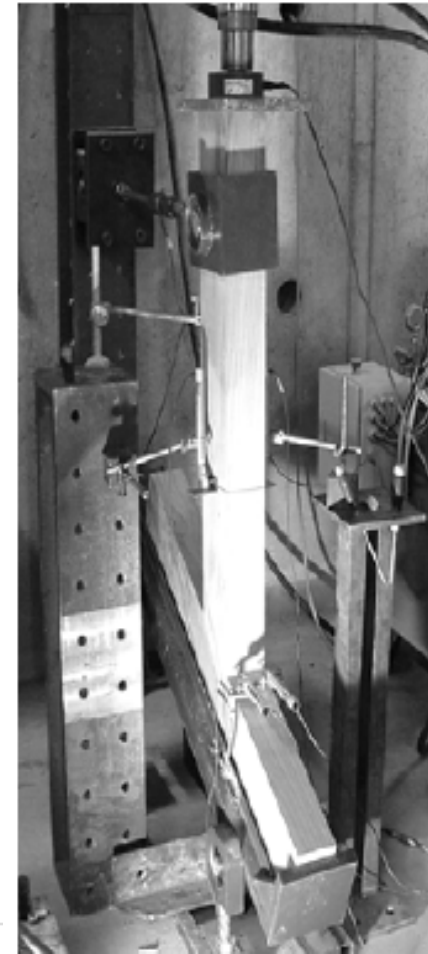
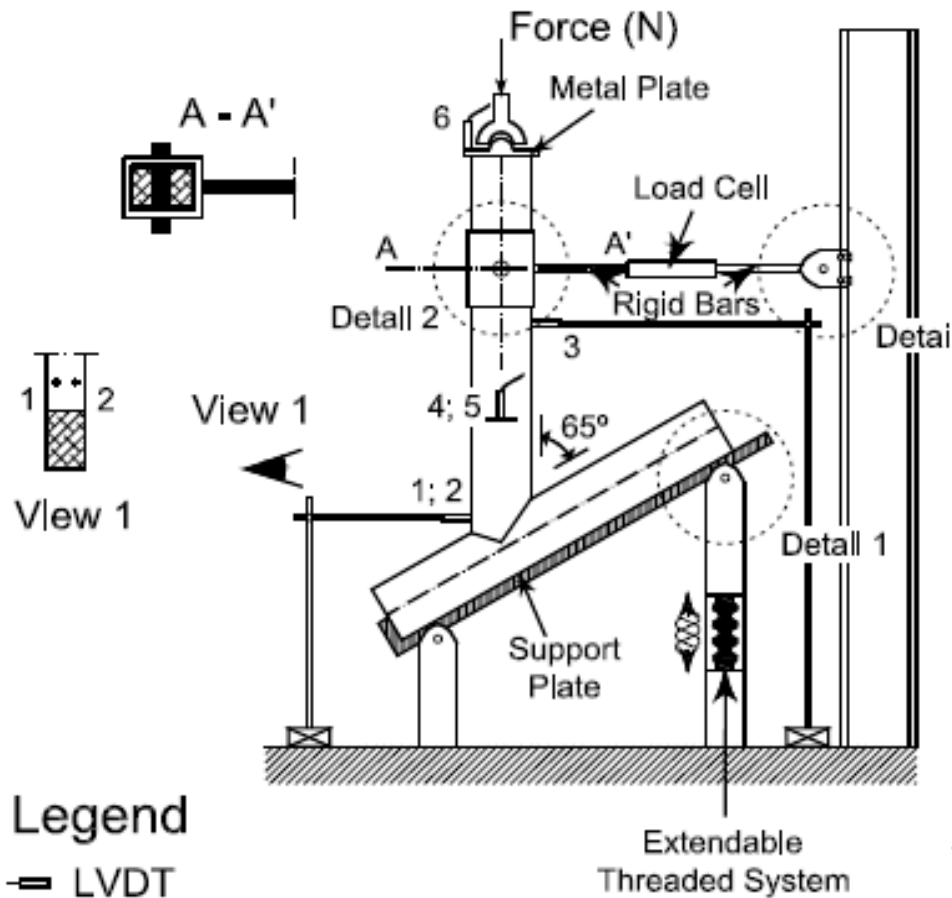
- As propriedades mecânicas da madeira de castanho antigo não são piores do que as do novo
- Assim sendo, a verificação da segurança de estruturas de castanho antigo pode ser realizado com base nas propriedades mecânicas do castanho novo pelo lado da segurança.

INVESTIGAÇÃO: Comportamento mecânico das ligações tradicionais sujeitas a cargas monotónicas

- ❑ Foi estudado o comportamento de ligações tradicionais de mecha e respiga sujeitas a cargas monotónicas de forma analítica e experimental
- ❑ Os ensaios experimentais efectuados permitiram um melhor conhecimento do comportamento mecânico desta ligação e discutir qual a influência dos defeitos da madeira no comportamento mecânico observado
- ❑ Os resultados experimentais mostram que é possível, no mínimo, uma avaliação das condições da ligação através de ensaios não-destrutivos.

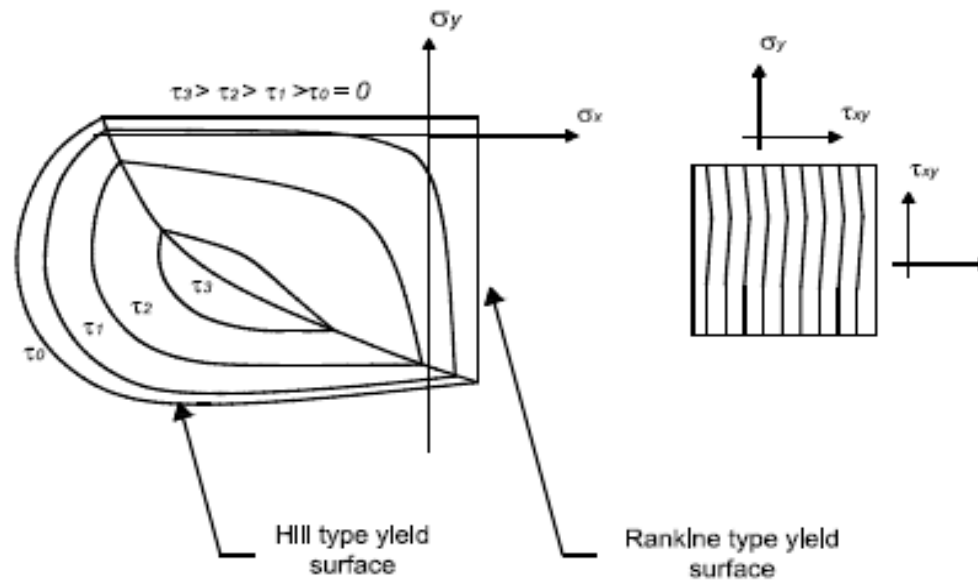
INVESTIGAÇÃO: Comportamento mecânico das ligações tradicionais sujeitas a cargas monotónicas

□ Aparato experimental:

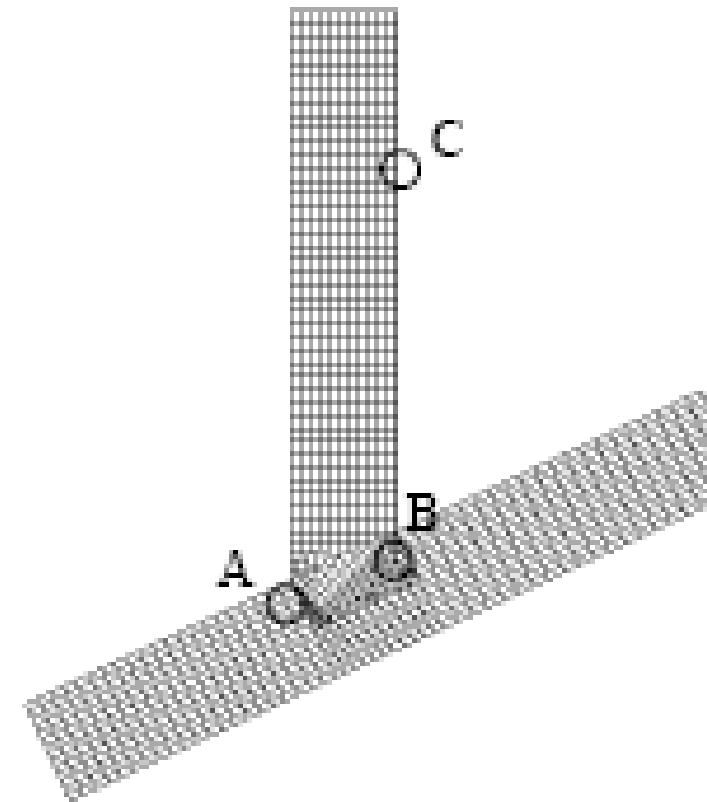


INVESTIGAÇÃO: Comportamento mecânico das ligações tradicionais sujeitas a cargas monotónicas

☐ Modelo numérico:



ANISOTROPIC RANKINE-HILL COMPOSITE YIELD CRITERION



FE MODEL

INVESTIGAÇÃO: Comportamento mecânico das ligações tradicionais sujeitas a cargas monotónicas

□ Principais conclusões:

- A sensibilidade do modelo aos vários parâmetros do material (tensão de corte e normal do interface, módulo de elasticidade e tensão de rotura à compressão) podem ser testados no modelo numérico;
- Os resultados obtidos mostram que a rigidez do interface entre as duas peças condiciona a resposta estrutural obtida;
- O modelo constitutivo proposto para o material em compressão melhoram as previsões do comportamento local e global da ligação
- O modelo mostrou-se eficaz na previsão das propriedades de resistência e rigidez dos modelos experimentais ensaiados.

INVESTIGAÇÃO: Propriedades mecânicas da madeira com base em microprovetes recolhidos *in situ*.

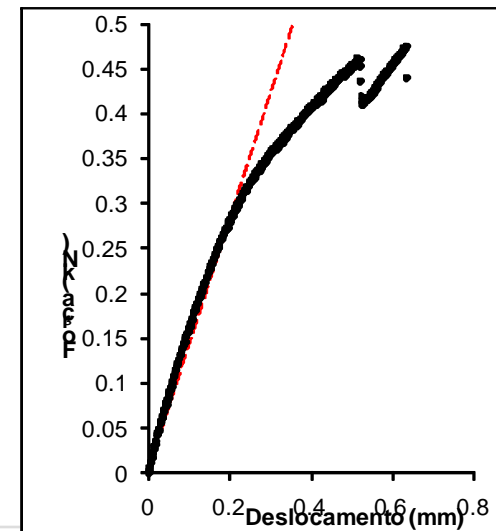
□ Enquadramento

- Um dos principais problemas enfrentados na definição do estado de segurança de estruturas de madeira existentes e o conhecimento das suas propriedades mecânicas
- O método normalmente utilizado baseia-se no conhecimento da espécie de madeira em causa e, a partir dos valores preconizados em documentos técnicos para cada espécie, estabelecem-se as propriedades mecânicas
- Estas propriedades são normalmente validadas através do cruzamento de relações empíricas que relacionam resultados de ensaios não-destrutivos com determinadas propriedades mecânicas da madeira;
- Contudo, os ensaios não-destrutivos apresentam normalmente coeficientes de correlação reduzidos, pelo que se torna difícil estabelecer propriedades mecânicas com base nesses resultados.

INVESTIGAÇÃO: Propriedades mecânicas da madeira com base em microprovetes recolhidos *in situ*.

□ Proposta:

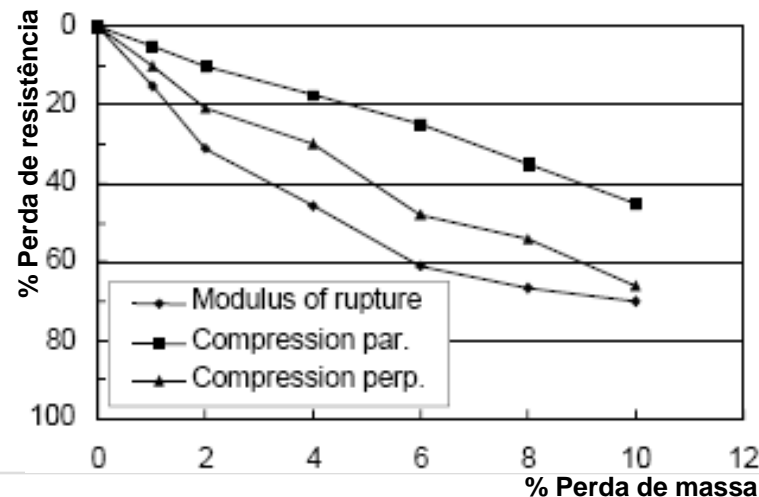
- O estudo em curso procurará a caracterização mecânica da madeira através do ensaio destrutivo de microprovetes retirados da peça;
- Os microprovetes serão ensaiados (à tracção paralela às fibras) e os resultados serão correlacionados com os obtidos em ensaios normalizados de tracção:



INVESTIGAÇÃO: Efeito da degradação biológica nas propriedades mecânicas da madeira

□ Enquadramento:

- Uma patologia bastante comum em estruturas antigas de madeira é a degradação biológica das zonas de entrega nas paredes de alvenaria
- Os métodos existentes de avaliação das propriedades mecânicas da madeira sujeita a ataques biológicos provocados por fungos mostra-se pouco apelativa para utilização em condições estruturais, pois relaciona a redução de resistência com a redução de massa da peça



Modelos Actuais

INVESTIGAÇÃO: Efeito da degradação biológica nas propriedades mecânicas da madeira

□ Proposta:

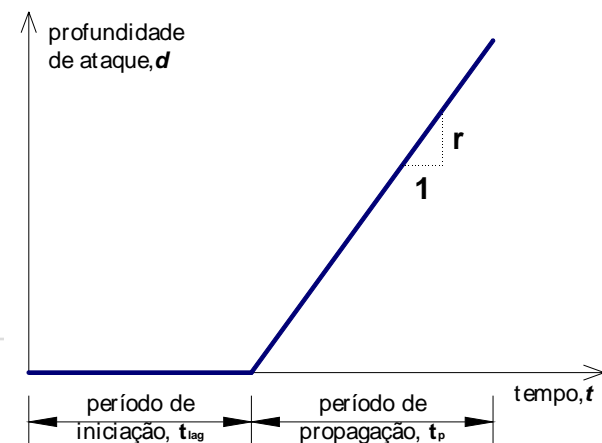
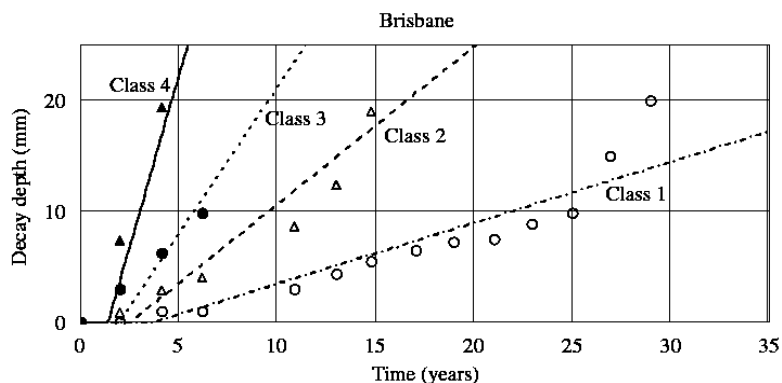
- Para colmatar as deficiências do método da perda de massa, estão e curso no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) ensaios de degradação de peças de madeira
- Nestes ensaios, serão estudadas peças de diferentes secções transversais e com diferentes períodos de exposição ao fungo



INVESTIGAÇÃO: Efeito da degradação biológica nas propriedades mecânicas da madeira

□ Proposta:

- O objectivo é relacionar a profundidade de ataque com o tempo de exposição ao fungo
- A delimitação das zonas sãs/degradadas será feita com recurso à tecnologia FTIR
- As peças serão ensaiadas à rotura (tracção e compressão) de acordo com as disposições regulamentares
- Os resultados obtidos serão ainda correlacionados com os mais populares ensaios não-destrutivos para estruturas de madeira (ultra-sons, Pilodyn® e Resistograph®)



INVESTIGAÇÃO: Avaliação probabilística da segurança de estruturas de madeira

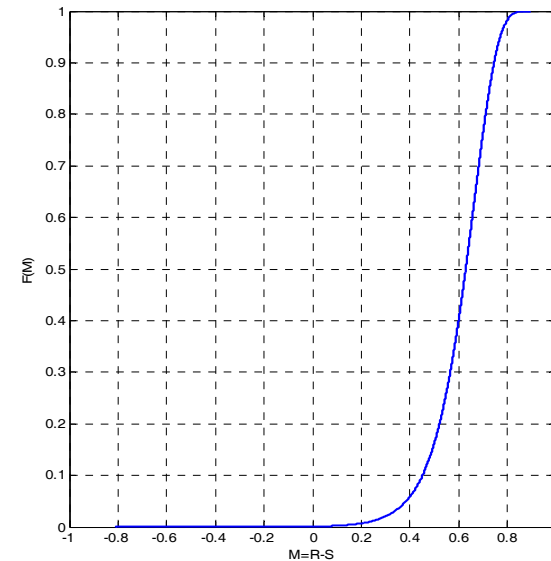
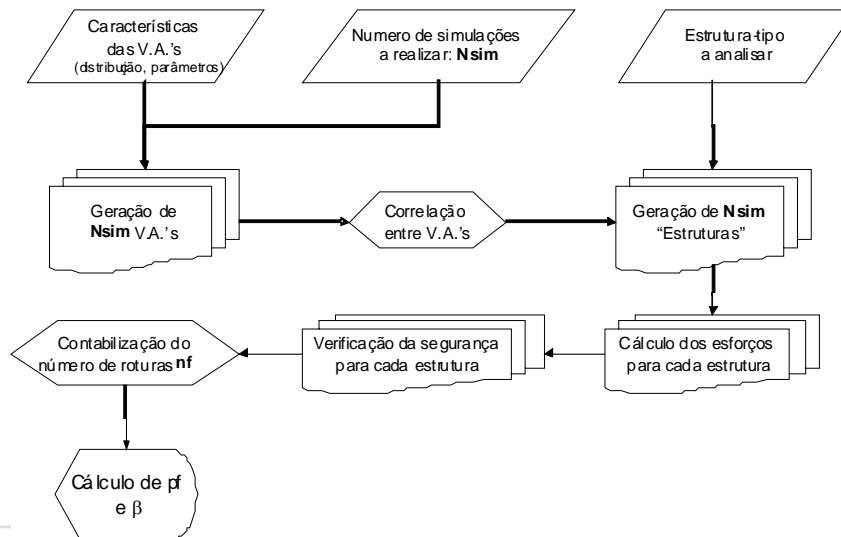
□ Enquadramento:

- A avaliação da segurança de estruturas existentes em geral e das estruturas de madeira em particular, realizada de acordo com a regulamentação existente para estruturas novas, mostra-se bastante penalizadora
- Tal fica-se a dever à variabilidade implícita das diversas grandezas intervenientes na avaliação da segurança, que podem ser determinadas com mais precisão aquando de uma verificação de uma estrutura existente (exemplos: peso próprio, solicitações variáveis, secções transversais, ...)
- Uma análise que entre em conta explicitamente com a variabilidade conduzirá a resultados mais exactos, embora à custa de um cálculo estrutural mais complexo

INVESTIGAÇÃO: Avaliação probabilística da segurança de estruturas de madeira

□ Proposta:

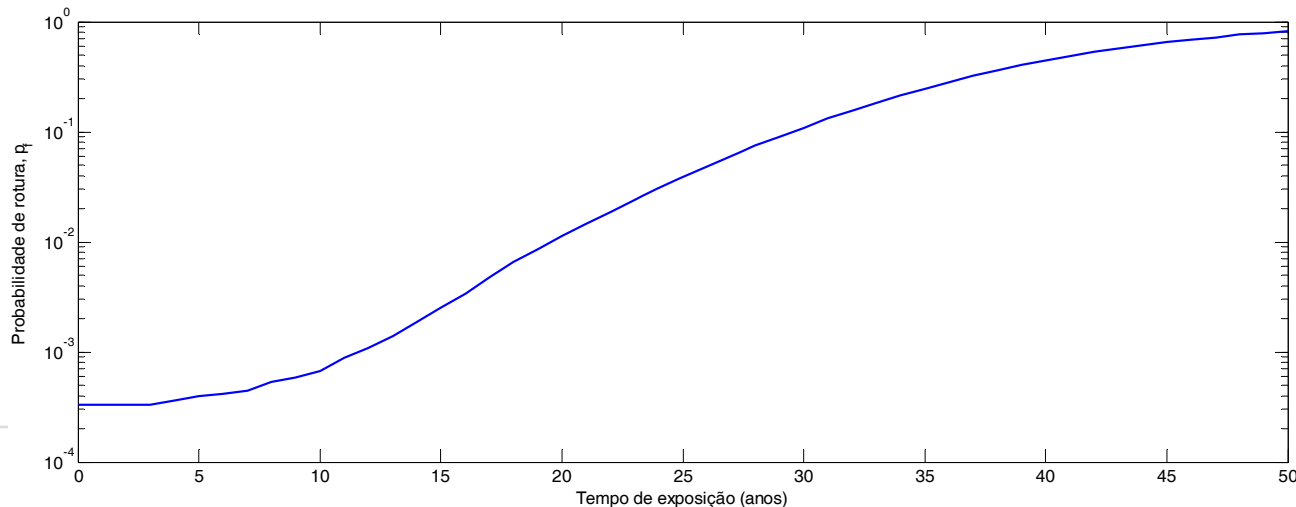
- Pretende-se implementar os princípios de avaliação probabilística definidos nas normas da especialidade (JCSS-PMC) para as estruturas de madeira, considerando com variáveis aleatórias as solicitações, as secções transversais e as propriedades mecânicas do material



INVESTIGAÇÃO: Avaliação probabilística da segurança de estruturas de madeira

□ Proposta:

- Numa segunda fase, proceder-se-á ao estudo da variação da segurança estrutural no tempo, entrando em conta com a influência da duração das acções e das propriedades mecânicas em função do tempo de ataque por fungo.
- Deste modo, será possível estabelecer o estado de segurança de estruturas sujeitas a degradação biológica e assim otimizar as intervenções de manutenção e reparação a realizar na estrutura



CONCLUSÕES

- ❑ Foram apresentados quatro casos de estudo onde a madeira (de castanho) era parte constituinte da estrutura resistente da estrutura do edifício
- ❑ Nessas estruturas, tentou-se proceder de acordo com as práticas internacionais de intervenção em estruturas antigas, como a reversibilidade, intervenção mínima, respeito pelo material e pela concepção original da estrutura
- ❑ Foi apresentada a investigação desenvolvida no passado recente e actualmente em curso na UMinho, nomeadamente:
 - Caracterização mecânica da madeira de castanho nova e antiga
 - Modelação numérica e experimental do comportamento de ligações tradicionais a cargas monotónicas
 - Avaliação das propriedades mecânicas de estruturas de madeira com base em microprovetes recolhidos *in situ*;
 - Influência da degradação biológica (fungos) nas propriedades resistentes da madeira
 - Avaliação probabilística da segurança estrutural de estruturas de madeira

OBRIGADO
pela vossa
atenção