



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Renato Miguel Nunes Augusto

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA E AVALIAÇÃO
EXPERIMENTAL DE SOLUÇÕES MISTAS
CLT-BETÃO**

Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Estruturas, orientada pelo Professor Doutor João Henrique Jorge de Oliveira Negrão e pelo Professor Doutor Carlos Eduardo de Jesus Martins apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Fevereiro de 2023

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Civil

Renato Miguel Nunes Augusto

Simulação Numérica e Avaliação Experimental de Soluções Mistas CLT-Betão

Numerical Simulation and Experimental Evaluation of Composite CLT-Concrete Solutions

Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Estruturas,
orientada pelo Professor Doutor João Henrique Jorge de Oliveira Negrão e pelo Professor Doutor Carlos Eduardo de Jesus Martins

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC
declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Fevereiro de 2023



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

AGRADECIMENTOS

Com esta dissertação termina um dos mais importantes e bonitos capítulos da minha vida. Na reta final do meu percurso académico, dedico os meus maiores agradecimentos a todos aqueles que, de algum modo, tornaram esta realização pessoal numa realidade. Em especial, gostaria de deixar um agradecimento:

Ao SerQ – Centro de Inovação e Competências da Floresta pela oportunidade e condições disponibilizadas na realização do presente trabalho, enquadrado no Projeto EGURALT (SOE4/P1/E1115);

Ao ISISE – Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering, unidade de investigação a quem agradeço o apoio concedido, nomeadamente através de licença do *software ABAQUS CAE*[®];

Aos orientadores, Professor Doutor João Negrão, pela orientação, partilha de conhecimentos e disponibilidade no esclarecimento de dúvidas e Professor Doutor Carlos Martins, pela orientação, pelo acompanhamento pessoal e profissional na iniciação à investigação científica e, acima de tudo, pela disponibilidade, ajuda e amizade, proporcionadas durante este percurso;

Aos colegas de investigação científica, Carlos Albino e Cláudio Ferreira, pelo auxílio prestado;

Aos Classic Boys e à BXD CBR, pela amizade, e pelos momentos que me proporcionaram;

À Carolina, pelo incansável apoio em todas as vertentes da minha vida e por estar sempre presente;

Ao meu irmão, aos meus avós, à minha tia Emília e a toda a minha família;

Aos meus pais, Carlos Augusto e Sandra Augusto, pela educação, amizade, motivação e experiências que me proporcionaram. Sem o vosso esforço e dedicação nada teria sido possível;

A Coimbra, a cidade da minha vida.

FINANCIAMENTO

A presente dissertação de mestrado foi desenvolvida no âmbito do Projeto EGURALT, com a referência SOE4/P1/E1115, cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do Programa INTERREG SUDOE, resultando na atribuição de uma Bolsa de Investigação de Licenciado ao autor do presente documento que compreendeu a realização dos trabalhos nas instalações do SerQ – Centro de Inovação e Competências da Floresta, na Sertã (Portugal).



RESUMO

A presente dissertação foi desenvolvida no âmbito do Projeto EGURALT a decorrer no SerQ. A investigação em curso visa a aplicação e divulgação de soluções inovadoras para a promoção e construção em altura com madeira, no espaço SUDOE, contribuindo para o desafio global de combate às alterações climáticas, ao promover a utilização de materiais provenientes de fontes sustentáveis e renováveis.

O objetivo deste documento é a avaliação experimental de cinco ligações com entalhe em provetes mistos de madeira-betão, com o intuito de caracterizar o seu comportamento mecânico e simultaneamente potenciar o uso da madeira proveniente do Pinho Bravo (*Pinus Pinaster Ait.*), uma espécie com grande abundância no território português, e a sua aplicação em soluções estruturais de madeira como o CLT (*Cross Laminated Timber* – Madeira Lamelada Colada Cruzada).

A caracterização mecânica das ligações foi realizada de acordo com a configuração experimental proposta na TS 19103 (CEN 2021), que prevê ensaios de corte simétrico para ligações mistas madeira-betão. Adicionalmente, foi adotado o procedimento de carregamento presente na EN 26891 (1991). A caracterização mecânica deste tipo de ligações consiste na determinação da sua capacidade de carga e do módulo de deslizamento. A configuração dos entalhes estudados permitiu avaliar a influência do comprimento, profundidade e inclinação do entalhe no comportamento mecânico da ligação.

Para além da caracterização experimental, foi desenvolvido um FEM – Modelo de Elementos Finitos, no programa *ABAQUS CAE*[®], com o intuito de simular o comportamento da ligação, permitindo a sua análise e previsão através de ferramentas computacionais.

Palavras-chave: Ligações mistas madeira-betão, Ligações com entalhe, CLT, Ensaio de corte estático, Modelo de Elementos Finitos.

ABSTRACT

This master's thesis was developed within the scope of the EGURALT Project taking place at SerQ. Ongoing research is aimed at the application and dissemination of innovative solutions for the promotion and construction of high-rise timber made buildings in the SUDOE area, contributing to the global challenge of climate change, through the promotion of materials from sustainable and renewable sources.

The main objective of this document is the experimental evaluation of five timber-concrete notched connections, aiming at characterizing their mechanical behaviour while simultaneously enhancing the use of local timber species, such as Maritime Pine (*Pinus Pinaster Ait.*), and its application in solutions such as CLT– *Cross Laminated Timber*.

The mechanical characterization of the connections was carried out according to the experimental configuration proposed in TS 19103 (CEN 2021), which foresees double shear tests for timber-concrete composite connections, and the experimental procedure present in EN 26891 (1991) was adopted. The mechanical characterization of this type of connections consists in determining their shear load capacity and stiffness. Studied notches allowed evaluating the influence of the length, depth and angle of the notch on the mechanical behaviour of the connection.

In addition to the experimental characterization, a FEM – Finite Element Model was developed with *ABAQUS CAE*[®] in order to simulate the behaviour of the connection and enhance its use and prediction through computational tools.

Key words: Timber-concrete connections, Notched connections, CLT, Shear tests; Finite Element Model.

ÍNDICE

Agradecimentos	i
Financiamento	ii
Resumo	iii
Abstract.....	iv
Índice	v
Índice de Figuras	vii
Índice de Quadros	ix
Simbologia.....	x
Abreviaturas.....	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento Geral	1
1.2. Âmbito do Projeto e Objetivos do Trabalho.....	2
1.3. Organização da Dissertação.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Enquadramento	4
2.2. Estruturas Mistas Madeira-Betão	4
2.3. Sistemas de Ligação Madeira-Betão	10
2.4. Caracterização Experimental de Ligações Mistas Madeira-Betão	12
2.5. Simulação Numérica de Ligações Mistas Madeira-Betão.....	20
3. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL.....	28
3.1. Enquadramento	28
3.2. Materiais	28
3.3. Configuração dos Provetes	29
3.4. Execução dos Trabalhos	32
3.4.1. Preparação do CLT	32
3.4.2. Betonagem	33
3.5. Ensaio de Corte Estático.....	34
3.5.1. Enquadramento	34
3.5.2. Configuração do ensaio	34
3.5.3. Protocolo experimental.....	35
3.6. Resultados Experimentais	39
3.6.1. Enquadramento.....	39

3.6.2.	Configuração MrP20	39
3.6.3.	Configuração MiP20	41
3.6.4.	Configuração MiI20	43
3.6.5.	Configuração MiP45	45
3.6.6.	Configuração MiI45	47
3.7.	Análise de Resultados.....	48
4.	SIMULAÇÃO NUMÉRICA	51
4.1.	Introdução.....	51
4.2.	Definição do Modelo	51
4.2.1.	Geometria do modelo e malha de Elementos Finitos	52
4.2.2.	Propriedades dos materiais	53
4.2.3.	Condições de apoio, interação entre materiais e carregamento.....	58
4.3.	Resultados.....	59
5.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	64
5.1.	Conclusões.....	64
5.2.	Trabalhos futuros	65
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Relação entre o peso próprio de uma laje (g) e o seu vão (l), para uma carga de serviço de $2,5 \text{ kN/m}^2$ para secções em madeira (a), madeira-betão (b) e betão-armado(c) (Ceccotti, 1995)	5
Figura 2.2 - Distribuição temporal da construção das pontes analisadas (Rodrigues, 2014)	7
Figura 2.3 - Distribuição geográfica das pontes analisadas (Rodrigues, 2014)	7
Figura 2.4 - a) TCC (Siddika <i>et al.</i> , 2021); b) CCC (Setragian e Kusuma, 2018)	8
Figura 2.5 - Viga simplesmente apoiada sob carregamento vertical: (a) ação compósita reduzida ou não existente; (b) ação compósita total (Adaptado de Rodrigues <i>et al.</i> , 2013)	9
Figura 2.6 - Exemplos de diferentes tipos de ligação madeira-betão: (a ₁) pregos; (a ₂) varões de aço de construção; (a _{3/4}) parafusos; (b _{1/2}) ligadores, anéis de ligação e placas dentadas, respetivamente; (b ₃) tubos de aço; (b ₄) placas de aço perfuradas; (c ₁) entalhes redondos na madeira e ligadores; (c ₂) entalhes quadrados e ligadores; (c ₃) entalhes em forma de copo e ligadores; (c ₄) plataforma de placas de madeira pregadas com placas de aço ao corte; (d ₁) treliça e aço colada na madeira; (d ₂) placa de aço colada na madeira (Ceccotti, 1995)	10
Figura 2.7 - Curva força vs deslizamento para diferentes tipos de ligações	11
Figura 2.8 - Possível configuração de ensaio para determinação da curva força vs deslizamento (Ceccotti, 1995)	12
Figura 2.9 - Gráfico resumo dos tipos de ensaio de corte estudados (Monteiro, 2009)	13
Figura 2.10 - Configuração do ensaio de corte estático: (1) betão; (2) madeira; (3) chapas de aço; (4) ligadores metálicos; (5) travamentos laterais; (6) dispositivos medidores de deslocamento (TS 19103, CEN 2021)	14
Figura 2.11 - Provetes ensaiados (Adaptado de Jiang e Crocetti, 2019)	17
Figura 2.12 - Espécime tipo; a) <i>heel length</i> ; b) profundidade do entalhe; c) comprimento do parafuso que fica embebido no betão; d) espessura da camada de betão (Thai <i>et al.</i> , 2020)	18
Figura 2.13 - Pormenorização dos espécimes ensaiados (Adaptado de Ouch <i>et al.</i> , 2021)	19
Figura 2.14 - Modelo tridimensional (Dias <i>et al.</i> , 2007)	21
Figura 2.15 - Curvas força vs deslizamento resultantes dos ensaios experimentais e do modelo numérico para a madeira de Pinho Bravo (Adaptado de Dias <i>et al.</i> , 2007)	21
Figura 2.16 - Modelo de Elementos Finitos (Monteiro <i>et al.</i> , 2013)	22
Figura 2.17 - Modelo de elementos Finitos (Adaptado de Bedon e Fragiaco, 2017)	24
Figura 2.18 - Distribuição de tensões para a máxima carga aplicada nos elementos do modelo (Adaptado de Jiang e Crocetti, 2019)	26

Figura 2.19 - Comparação dos resultados experimentais da curva força vs deslizamento com os resultados da simulação (Adaptado de Thai <i>et al.</i> , 2020)	27
Figura 3.1 - Vista geral dos meios provetes	31
Figura 3.2 - Provede de referência MrP20 (esquerda) e pormenores dos entalhes as demais configurações (direita)	31
Figura 3.3 - Preparação das tábuas	32
Figura 3.4 - Execução do entalhe	33
Figura 3.5 - Cofragem e betonagem	33
Figura 3.6 - Configuração do ensaio de corte estático simétrico	35
Figura 3.7 - Procedimento de carga - Ensaio de corte estático (EN 26891, 1991)	37
Figura 3.8 - Curva força vs deslizamento MrP20	39
Figura 3.9 – Modos de rotura do provede MrP20_2	41
Figura 3.10 - Curva força vs deslizamento MiP20	41
Figura 3.11 - Modos de rotura do provede MiP20_3	43
Figura 3.12 - Curva força vs deslizamento MiI20	43
Figura 3.13 - Modos de rotura do provede MiI20_1	44
Figura 3.14 - Curva força vs deslizamento MiP45	45
Figura 3.15 - Modos de rotura do provede MiP45_3	46
Figura 3.16 - Curva força vs deslizamento MiI45	47
Figura 3.17 - Curva força vs deslizamento para as várias configurações de entalhe	50
Figura 4.1 - Elementos do modelo – a), b) e c) correspondem ao CLT e d) ao betão	52
Figura 4.2 – Elemento de oito nós C3D8R	52
Figura 4.3 - Malha de Elementos Finitos (MiP20) – a) e b) vistas laterais; c) planta	53
Figura 4.4 - Modelo bilinear utilizado para definir o comportamento da madeira	55
Figura 4.5 - Relação tensão-extensão para o betão sujeito à tração	56
Figura 4.6 - Condições de apoio do FEM (exemplo para MiP45)	58
Figura 4.7 - Curva força vs deslizamento provetes MrP20	60
Figura 4.8 - Curva força vs deslizamento provetes MiP20	61
Figura 4.9 - Curva força vs deslizamento provetes MiP45	61
Figura 4.10 - Distribuição de tensões no modelo: a) MrP20; b) MiP20; c) MiP45	62
Figura 4.11 - Proposta de alteração das condições de apoio do FEM	63

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Propriedades da ligação (Adaptado de Dias, 2005)	14
Quadro 2.2 - Propriedades da ligação (Adaptado de Yeoh <i>et al.</i> , 2008)	15
Quadro 2.3 - Propriedades da ligação (Adaptado de Monteiro, 2009)	16
Quadro 2.4 - Propriedades da ligação (Adaptado de Jiang e Crocetti, 2019)	17
Quadro 2.5 - Propriedades da ligação (Adaptado de Thai <i>et al.</i> , 2020)	18
Quadro 2.6 - Propriedades da ligação (Adaptado de Ouch <i>et al.</i> , 2021)	19
Quadro 2.7 - Propriedades dos materiais (Adaptado de Monteiro <i>et al.</i> , 2013)	23
Quadro 3.1 - Resultados do ensaio de compressão no betão	29
Quadro 3.2 - Configuração dos provetes	30
Quadro 3.3 - Capacidade de carga estimada	37
Quadro 3.4 - Módulo de deslizamento estimado	38
Quadro 3.5 - Resultados MrP20	40
Quadro 3.6 - Resultados MiP20	42
Quadro 3.7 - Resultados MiI20	44
Quadro 3.8 - Resultados MiP45	46
Quadro 3.9 - Resultados MiI45	47
Quadro 3.10 - Resumo da capacidade de carga, módulo de deslizamento e modo de rotura para as tipologias estudadas	48
Quadro 4.1 - Propriedades da madeira consideradas na definição do FEM	54
Quadro 4.2 - Propriedades do betão consideradas na definição do FEM	56
Quadro 4.3 - Relação tensão-extensão (compressão)	57
Quadro 4.4 - Relação tensão-extensão (tração)	57
Quadro 4.5 - Interação madeira-betão	58
Quadro 4.6 - Comparação dos resultados	59
Quadro 4.7 - Precisão do modelo <i>vs</i> precisão de outros exemplos	63

SIMBOLOGIA

LETRAS LATINAS MAIÚSCULAS

- $E_{0,mean}$ - Valor médio do módulo de elasticidade paralelo ao fio
 $E_{90,mean}$ - Valor médio do módulo de elasticidade perpendicular ao fio
 E_{cm} - Módulo de elasticidade secante do betão
 E_{ij} - Módulo de elasticidade entre as direções i e j
 F_{apl} - Força aplicada no ensaio de corte estático
 F_{est} - Capacidade de carga estimada da ligação
 $F_{est,Carr}$ - Carga máxima utilizada no procedimento de cálculo da EN 26891 (1991)
 $F_{máx}$ - Capacidade de carga da ligação
 $F_{máx,\mu}$ - Capacidade de carga média da ligação
 G_{ij} - Módulo de distorção entre as direções i e j
 R_{ij} - Coeficiente potencial do critério de Hill

LETRAS LATINAS MINÚSCULAS

- b_n - Largura do entalhe
 d_c - Parâmetro de deterioração do betão à compressão
 d_t - Parâmetro de deterioração do betão à tração
 $f_{c,0,d}$ - Valor de cálculo da resistência à compressão paralela ao fio da madeira
 $f_{c,0,k}$ - Valor característico da resistência à compressão paralela ao fio da madeira
 $f_{c,d}$ - Valor de cálculo da resistência à compressão betão
 $f_{c,k}$ - Valor característico de resistência à compressão do betão
 f_{cm} - Valor médio da tensão de rotura à compressão do betão
 f_{ctm} - Valor médio da tensão de rotura à tração simples do betão
 $f_{v,c,d}$ - Valor de cálculo da resistência ao corte do betão
 $f_{v,t,d}$ - Valor de cálculo da resistência ao corte da madeira

h_c	- Espessura do betão sem a profundidade do entalhe
h_n	- Profundidade do entalhe;
k_{cr}	- <i>Crack factor</i>
$k_{s,est}$	- Módulo de deslizamento estimado
$k_{s,i}$	- Módulo de deslizamento do plano de corte i
$k_{s,\mu}$	- Módulo de deslizamento médio
k_{ser}	- Módulo de deslizamento para condições de serviço
l_{min}	- <i>Minimal shear length of timber</i>
l_n	- Comprimento do entalhe
l_s	- Distância entre entalhes
l_v	- Distância entre o entalhe e a extremidade do elemento de madeira

LETRAS GREGAS

ε_c	- Extensão do betão à compressão
ε_{cl}	- Extensão do betão à compressão correspondente à tensão máxima
$\varepsilon_c^{in,h}$	- Extensão inelástica do betão
Θ	- Ângulo das escoras de betão
μ	- Média aritmética
ν	- Fator de redução da capacidade de carga para o betão fissurado devido a forças de corte
ν_{01}	- Deslizamento medido para $0,1 F_{est}$
ν_{04}	- Deslizamento medido para $0,4 F_{est}$
$\nu_{i,mod}$	- Deslizamento inicial modificado
ν_{ij}	- Coeficiente de <i>Poisson</i> entre as direções i e j

ABREVIATURAS

C3D8	-	Elemento paralelepípedo linear tridimensional de 8 nós
C3D8R	-	Elemento paralelepípedo linear tridimensional de 8 nós (integração reduzida)
CC	-	<i>Crush of concrete</i>
CCC	-	<i>CLT-concrete composite</i>
CEN	-	Comité Europeu de Normalização
CLT	-	<i>Cross laminated timber</i> (Madeira Lamelada Colada Cruzada)
COV	-	Coefficiente de variação
CT	-	<i>Crush of timber</i>
DVW	-	<i>Densified veneer wood</i>
EC2	-	Eurocódigo 2
EC5	-	Eurocódigo 5
EN	-	<i>European Norm</i>
EWP	-	<i>Engineered wood product</i>
FEM	-	<i>Finite element model</i> (Modelo de Elementos Finitos)
GLT	-	<i>Glued laminated timber</i>
LVL	-	<i>Laminated veneer lumber</i>
MTG	-	<i>Mechanical timber grader</i>
RC	-	<i>Relative change</i>
SC	-	<i>Shear of concrete</i>
ST	-	<i>Shear of timber</i>
STEP	-	<i>Structural Timber Education Programme</i>
TCC	-	<i>Timber-concrete composite</i>
TS	-	<i>Technical specification</i>

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento Geral

Atualmente, é importante que os edifícios em que vivemos e trabalhamos não sejam apenas espaçosos, esteticamente agradáveis e confortáveis, mas também ambientalmente conscientes (Endesa Portugal, 2019). As alterações climáticas, o esgotamento dos recursos naturais e a necessidade de investir em fontes de energia renováveis são questões permanentes na nossa sociedade e que obrigam o setor da construção a adotar práticas mais sustentáveis – é aqui que surge o conceito de construção sustentável. A construção sustentável foca-se na resposta às necessidades dos indivíduos sem colocar em causa as gerações futuras e apresenta-se como uma nova abordagem para projetar, construir, manter e demolir edifícios através da tomada consciente de certas decisões como (Endesa Portugal, 2019):

- Otimização de recursos;
- Eficiência de processos;
- Análise dos impactos no meio ambiente, na comunidade e no mundo.

Deste modo, o setor da Construção Civil tem procurado alternativas à construção tradicional, procurando desenvolver soluções construtivas que utilizem matérias-primas mais ecológicas. Por definição, para um material ser considerado ecológico, necessita de seguir algumas diretivas gerais como, por exemplo: é composto por uma matéria-prima renovável ou reciclável, biodegradável ou conversível em carbono; a sua extração e produção deve ocorrer localmente, evitando grandes operações de transporte; deve ter um período de vida extenso, manutenção simples e permitir a sua reutilização (Arch Daily, 2022).

Na construção de um edifício erguido e gerido sob uma lógica sustentável, a madeira deve ser tida em conta como um material construtivo de grande importância. A valorização da madeira como material de construção torna-se uma alavanca económica para a gestão da floresta e dos seus recursos, com benefícios para o meio ambiente, nomeadamente a diminuição do efeito de estufa, consequente da fixação do CO₂ (Jorge, 2005). Adicionalmente, a transformação da

madeira em material de construção acarreta um consumo de combustíveis fósseis significativamente inferior ao do betão e do aço repercutindo-se novamente numa melhor prestação ambiental.

Do ponto de vista da sua utilização para fins estruturais, o desenvolvimento de novas técnicas que envolvam este material como por exemplo a sua combinação com o betão, constitui uma oportunidade para o aumento da sua aplicabilidade através da melhoria da sua eficiência estrutural. As estruturas mistas madeira-betão apresentam-se como uma técnica eficaz, aplicável a construções novas e existentes, apresentando diversas vantagens face às técnicas construtivas tradicionais. Este documento procura explorar as vantagens e desvantagens desta técnica construtiva, apresentando novas soluções para a sua aplicação, promovendo assim, o seu desenvolvimento.

1.2. Âmbito do Projeto e Objetivos do Trabalho

O sector da construção foi responsável por cerca de 40% das emissões de gases de efeito de estufa a nível mundial relacionadas a energia e processos em 2021 (ONU News, 2022). Tendo em vista o atingir das metas europeias ao nível da neutralidade carbónica em 2050, a União Europeia considera como ponto chave a utilização de materiais provenientes de fontes renováveis e sustentáveis. Nesse sentido, verifica-se uma mudança de paradigma na construção em altura, nomeadamente com a utilização da madeira e dos seus derivados, para fins estruturais.

O presente trabalho pretende avaliar o desempenho de ligações mistas CLT-betão, tendo em vista a sua aplicação estrutural em pavimentos. Através da combinação dos materiais, pretende-se potenciar a utilização de ambos, na sua complementaridade, sendo que a utilização do CLT assume igualmente funções estruturais e construtivas (de cofragem). O trabalho compreende uma análise experimental de cinco configurações de ligação entre CLT e betão com recurso a entalhe e ligador metálico. Os elementos de CLT foram produzidos com recurso a madeira de Pinho Bravo, tendo em vista a valorização de recursos endógenos. A análise do desempenho da ligação incide sob o seu comportamento mecânico, em particular na sua capacidade de carga e no módulo de deslizamento, seguindo os pressupostos da EN 26891 (1991). Adicionalmente, foram caracterizados, a título individual e sempre que possível, todos os materiais que compõem as ligações a estudar. Como complemento à avaliação experimental, foi desenvolvido um Modelo de Elementos Finitos, com o intuito de prever o comportamento da ligação.

1.3. Organização da Dissertação

A presente dissertação está organizada em 5 capítulos, antecidos pelo *Índice Geral*, *Índice de Figuras*, *Índice de Quadros*, lista de *Abreviaturas* e *Simbologia*. Esta secção têm o intuito de apresentar, de forma sucinta, a organização e o conteúdo de cada um dos seguintes capítulos.

O capítulo primeiro introduz os temas a analisar na presente dissertação, através de um enquadramento geral e da apresentação dos objetivos do estudo.

O capítulo segundo apresenta a tecnologia de construção mista madeira-betão através de um enquadramento histórico e da exposição de diversos exemplos de aplicação. Este capítulo trata também os vários tipos ligações existentes para estas estruturas, apresentando diversos exemplos de determinação das suas propriedades mecânicas, quer através de ensaios experimentais, quer através de Modelos de Elementos Finitos.

O capítulo terceiro aborda a componente experimental da presente dissertação, apresentando os materiais utilizados, a configuração dos provetes estudados, os trabalhos executados e as normas e diretivas utilizadas na avaliação das propriedades mecânicas da ligação. Contém ainda a exposição dos resultados experimentais e a sua análise.

O capítulo quarto aborda a componente numérica da presente dissertação. Neste capítulo foi desenvolvido um FEM com o intuito de simular o comportamento experimental das configurações com entalhe perpendicular.

O capítulo quinto contém as conclusões da presente dissertação e apresenta algumas considerações e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Enquadramento

O uso combinado da madeira e do betão é uma técnica construtiva recente, quando comparada com as soluções construtivas tradicionais aplicadas a pavimentos, como a construção em madeira ou a construção em betão-armado. Esta área de estudo tem gerado bastante interesse na comunidade científica.

Neste capítulo é apresentado um enquadramento histórico e teórico às estruturas mistas madeira-betão, com principal foco nas propriedades mecânicas da ligação entre os dois materiais. Deste modo, é relevante perceber a influência da capacidade de carga e do módulo de deslizamento de uma ligação no comportamento mecânico da estrutura mista, tal como o modo como estas propriedades são determinadas. Adicionalmente serão abordados vários trabalhos científicos que se focam em cálculos semelhantes, contribuindo para o conhecimento sobre esta temática.

2.2. Estruturas Mistas Madeira-Betão

As estruturas mistas madeira-betão consistem no uso combinado da madeira e do betão, procurando tirar o máximo partido das propriedades mecânicas de cada um dos materiais. Este tipo de solução construtiva prevê a utilização de uma camada de betão na zona comprimida, combinada com uma camada de madeira na zona tracionada da secção, onde o uso de betão é ineficiente. De acordo com Yeoh *et al.* (2011), a eficiência deste tipo de solução construtiva depende da satisfação das seguintes condições: (1) o eixo neutro da secção mista deve estar localizado na proximidade da interface madeira-betão, de modo a garantir que o betão está predominantemente sujeito a tensões de compressão e a madeira a tensões de tração; (2) o sistema de ligação é dimensionado de modo a suportar a carga que se pretende transferir entre os dois materiais, garantindo a ação compósita da secção; (3) a parte de madeira que constitui a secção é capaz de resistir às tensões introduzidas pelos momentos flectores resultantes das cargas gravitacionais aplicadas na secção mista.

Deste modo é possível obter uma secção estruturalmente eficiente, simultaneamente rígida e leve. Este tipo de solução garante capacidade de carga duas a três vezes superior face à de uma laje tradicional em madeira, bem como módulo de deslizamento três a quatro vezes superior (Dias, 2006). A Figura 2.1 apresenta o peso próprio de um pavimento para uma dada carga de serviço e um determinado vão.

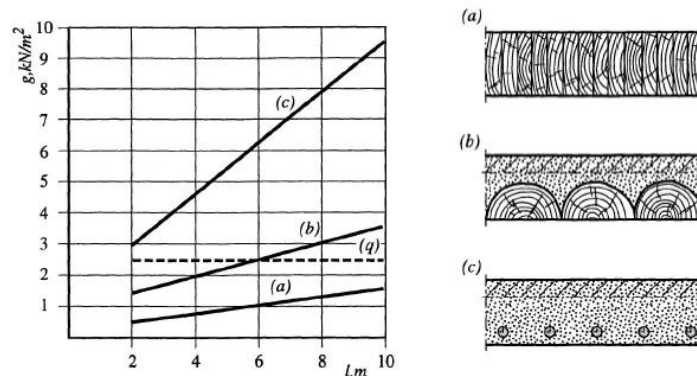


Figura 2.1 - Relação entre o peso próprio de uma laje (g) e o seu vão (l), para uma carga de serviço de $2,5 \text{ kN/m}^2$ para secções em madeira (a), madeira-betão (b) e betão-armado (c) (Ceccotti, 1995)

O desempenho da estrutura mista será tanto mais eficiente quanto melhor for o comportamento do conjunto, para o qual as características da ligação têm uma importância decisiva (Dias, 2006). O autor apresenta ainda a melhoria do desempenho acústico e da resistência ao fogo como outras vantagens deste tipo de solução.

Yeoh *et al.* (2011) referem, adicionalmente às vantagens apresentadas por Dias (2006), que a solução mista madeira-betão proporciona também um aumento da massa térmica da estrutura, fator importante na redução do consumo de energia necessário para aquecer ou arrefecer um edifício.

Os mesmos autores referem que a implementação de estruturas mistas madeira-betão é ainda, muito relevante na área da requalificação de estruturas. No processo de reabilitação, podem ser obtidas diversas vantagens através da adição de uma lâmina de betão sobre o pavimento de madeira existente, como por exemplo: (i) o aumento da rigidez à flexão e da capacidade de carga, (ii) a preservação de edifícios históricos para gerações futuras, (iii) a melhoria do comportamento sísmico. Os pavimentos mistos de madeira-betão são significativamente mais leves, quando comparados com as soluções tradicionais em betão-armado, promovendo uma menor alteração nas condições de carregamento da estrutura existente (paredes, pilares e fundações) (Yeoh *et al.*, 2011).

Apesar das vantagens associadas à construção mista em madeira-betão, este tipo de estruturas não está livre de inconvenientes. Tradicionalmente, a maior problemática associada a estas soluções está relacionada com a falta de informação relativa ao seu comportamento compósito, a longo prazo. Ceccotti (2002) referiu que as deformações em serviço, na madeira e nas ligações entre os dois materiais, são muito variáveis consoante as condições ambientais a que a estrutura está exposta. O autor concluiu que as deformações resultantes de um carregamento a longo prazo em condições de serviço podem corresponder ao dobro das deformações elásticas iniciais para condições de utilização em ambientes interiores e ao quadruplo para ambientes exteriores.

Recentemente, foi publicada a Especificação Técnica, TS 19103 (CEN, 2021), dedicada a estruturas mistas madeira-betão, que contém diretivas para o dimensionamento a longo prazo deste tipo de soluções construtivas. Este documento prevê a simulação do comportamento, dependente do tempo, através de uma carga vertical fictícia que traduz as tensões inelásticas originárias da variação de temperatura e da redução, ou aumento, do volume dos materiais.

O interesse em soluções mistas madeira-betão registou um aumento significativo nos últimos 50 anos e, atualmente, existem dois tipos de aplicações comuns: (1) tabuleiros de pontes; (2) pavimentos de edifícios (reabilitação e edificação nova) (Yeoh *et al.*, 2011). As primeiras aplicações deste segundo tipo correspondem a reabilitações de pavimentos em cidades europeias. Um dos principais exemplos de implementação deste sistema construtivo ocorreu na cidade de Leipzig, na Alemanha (Holschemacher *et al.*, 2003). Os edifícios históricos da cidade, construídos no final do século XIX e no início do século XX foram dimensionados de acordo com a experiência de carpinteiros, não satisfazendo as exigências estruturais e construtivas da atualidade. A intervenção nestes edifícios ocorreu através de soluções mistas, introduzindo uma lajeta de betão sobre as vigas existentes, de madeira, e conectando os dois materiais através de ligadores metálicos.

Na construção de tabuleiros de pontes, é possível identificar duas soluções distintas: (i) tabuleiros formados por vigas em T e (ii) tabuleiros em formados por uma laje estrutural (Rodrigues *et al.*, 2013). A aplicação de soluções mistas madeira-betão em pontes teve início nos Estados Unidos da América, através de um programa de investigação na Universidade de Washington que visava a combinação da madeira e do betão-armado para construir pontes (i) economicamente vantajosas quando comparadas com as pontes de betão-armado, (ii) mais duráveis que as pontes de madeira e (iii) cuja construção dispensasse equipamento mecânico especial (Rodrigues, 2014). O autor refere a ponte *Tampa-Clearwater Causeway* no estado da Flórida, como a primeira ponte a ser construída no âmbito deste projeto, em 1934. Esta é a primeira ponte deste género oficialmente documentada. A aplicação de soluções mistas madeira-betão em pontes teve um crescimento acentuado a partir da década de 90 como se pode

observar na Figura 2.2, impulsionada pelo programa “*Nordic Timber Bridge Project*”, um amplo projeto de investigação iniciado em 1994 com participação da Finlândia, Dinamarca e Noruega. Este programa expandiu a utilização deste tipo de pontes a toda a Europa. O autor desenvolveu uma base de dados onde analisou 78 pontes mistas madeira-betão dispersas por todo o mundo. A Figura 2.3 apresenta um resumo da localização de todas as pontes estudadas, apresentando uma boa estimativa para a sua distribuição a nível mundial. Para além dos países nórdicos, a Suíça também tem sido um dos principais impulsionadores deste tipo de soluções construtivas. O autor refere que na Suíça existem nove exemplos de construção de pontes mistas madeira-betão, construídas entre 1991 e 2007.

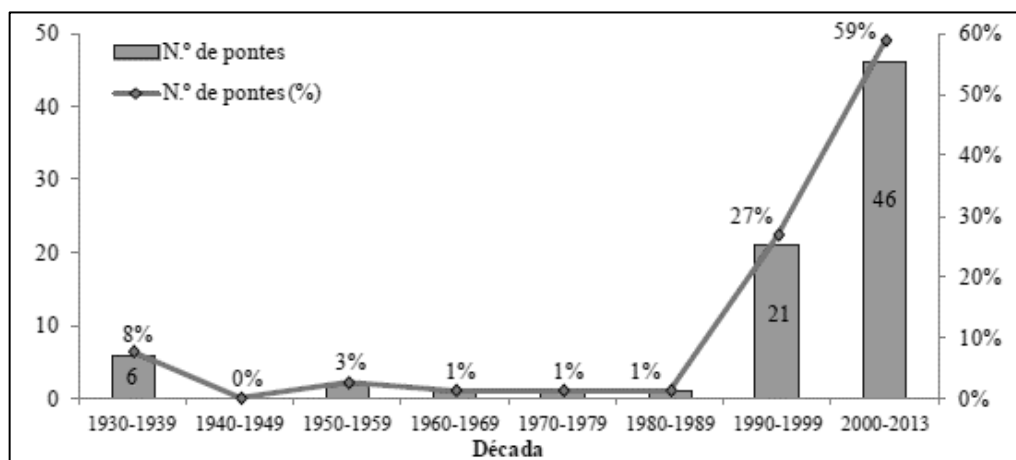


Figura 2.2 - Distribuição temporal da construção das pontes analisadas (Rodrigues, 2014)

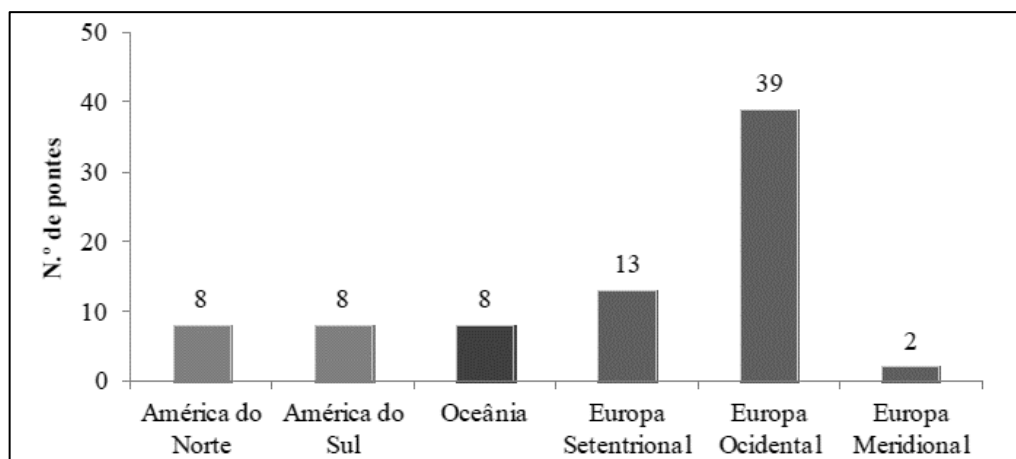


Figura 2.3 - Distribuição geográfica das pontes analisadas (Rodrigues, 2014)

Em Portugal, a única ponte mista madeira-betão é identificada por Rodrigues (2014). A *Ponte de Quiaios* (vão total de 13,9 m), localizada na localidade homónima, no concelho da Figueira da Foz, foi construída no ano de 2005 e estabelece a continuidade de uma estrada florestal situada perto da costa atlântica. O autor apresenta este exemplo, como uma solução positiva e destaca várias das suas qualidades como a estética, sustentabilidade ambiental e o custo reduzido.

Considerando todas as vantagens previamente apresentadas, a construção de estruturas mistas madeira-betão tem ganho especial atenção da parte da comunidade científica nos últimos anos. Siddika *et al.* (2021) apresentam os produtos compósitos de madeira-betão como uma das soluções de engenharia que mais interesse despertam para aplicações estruturais.

As primeiras aplicações deste sistema (TCC – *Timber-Concrete Composite*) ocorreram através da utilização da versão simples dos dois materiais. Porém, esta solução tem vindo a ser otimizada com base nos desenvolvimentos ocorridos no ramo da engenharia de madeiras. O desenvolvimento de materiais estruturais derivados da madeira, como a madeira lamelada colada (GLT – *glued-laminated timber*) e, mais recentemente, o CLT, levaram à sua utilização em estruturas mistas conseguindo deste modo otimizar o uso deste material. Siddika *et al.* (2021) garantem que as soluções mistas CLT-Betão apresentam capacidade de carga 3 a 5 vezes superior às das aplicações tradicionais de madeira-betão (TCC).

O CLT é um derivado estrutural da madeira (EWP – *engineered wood product*) resultante da sobreposição de múltiplas camadas de régua de madeira maciça, coladas perpendicularmente às camadas adjacentes de modo a formar um painel (Thai *et al.*, 2022) e foi desenvolvido nos anos 90, pelo que é considerado um produto recente. A combinação do CLT com o betão é internacionalmente denominada por CCC (CLT – *Concrete Composite*), e reúne em si todas as vantagens que as estruturas mistas tradicionais (TCC) apresentavam face à construção simples em madeira ou em betão (Thai *et al.*, 2022). Na Figura 2.4 é possível identificar duas soluções construtivas para pavimentos, uma em TCC e uma em CCC.

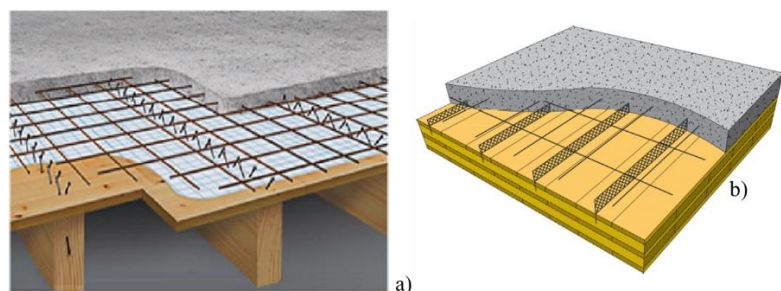


Figura 2.4 - a) TCC (Siddika *et al.*, 2021); b) CCC (Setragian e Kusuma, 2018)

Apesar do crescimento da sua aplicação, existem ainda bastantes aspetos a clarificar relativamente à influência das propriedades mecânicas da ligação no comportamento de uma estrutura mista madeira-betão. A ligação pode ser estabelecida através de ligadores metálicos como pregos, parafusos e cavilhas, ou através de entalhes, colagens, ou outras opções. A sua escolha está diretamente relacionada com o vão que se pretende dimensionar. Para a ligação ser considerada eficiente, os ligadores necessitam de ter a capacidade de transmitir as forças tangenciais que se formam na interface entre a madeira e o betão e é necessário que esta seja rígida o suficiente para limitar o deslizamento entre as duas camadas que constituem a secção transversal (Dias, 2005). Quanto maior a resistência e a rigidez do ligador, maior será a ação compósita entre os dois materiais.

A Figura 2.5 apresenta os dois casos possíveis para uma viga simplesmente apoiada: (a) ligação entre os dois materiais inexistente ou com grau de eficiência reduzido e (b) ligação perfeita entre as duas componentes. No caso (a), o deslizamento é livre, ou muito pouco restringido, na interface das camadas e as duas componentes resistem, independentemente, à carga transversal aplicada. Deste modo, a rigidez total da secção é dada pela soma da rigidez individual de cada componente. No caso (b), as duas componentes atuam de forma compósita, não existindo qualquer deslizamento na interface. Nesta situação, a rigidez global da secção corresponde à rigidez da secção mista, e é superior à do primeiro caso, resultando numa deformação inferior.

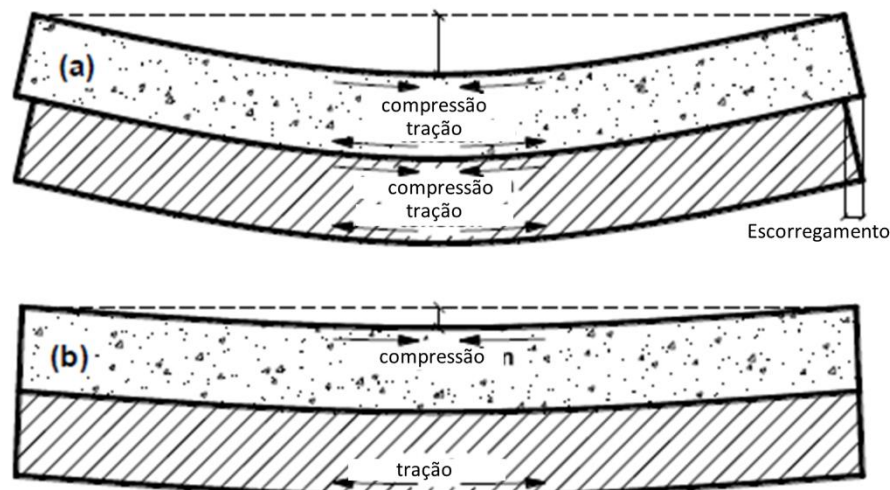


Figura 2.5 - Viga simplesmente apoiada sob carregamento vertical: (a) ação compósita reduzida ou não existente; (b) ação compósita total (Adaptado de Rodrigues *et al.*, 2013)

2.3. Sistemas de Ligação Madeira-Betão

Tal como referido anteriormente, as propriedades da ligação têm uma importância decisiva para o desempenho de uma estrutura mista (Dias, 2006). Deste modo, surge a necessidade de conhecer vários tipos de ligação. Na Figura 2.6, Ceccotti (1995) apresenta os tipos mais comuns de ligações para este tipo de estruturas, agrupados em quatro categorias consoante a sua rigidez. O autor apresenta as ligações coladas (d) como as mais rígidas e as pregadas/aparafusadas (a) como as de menor rigidez.

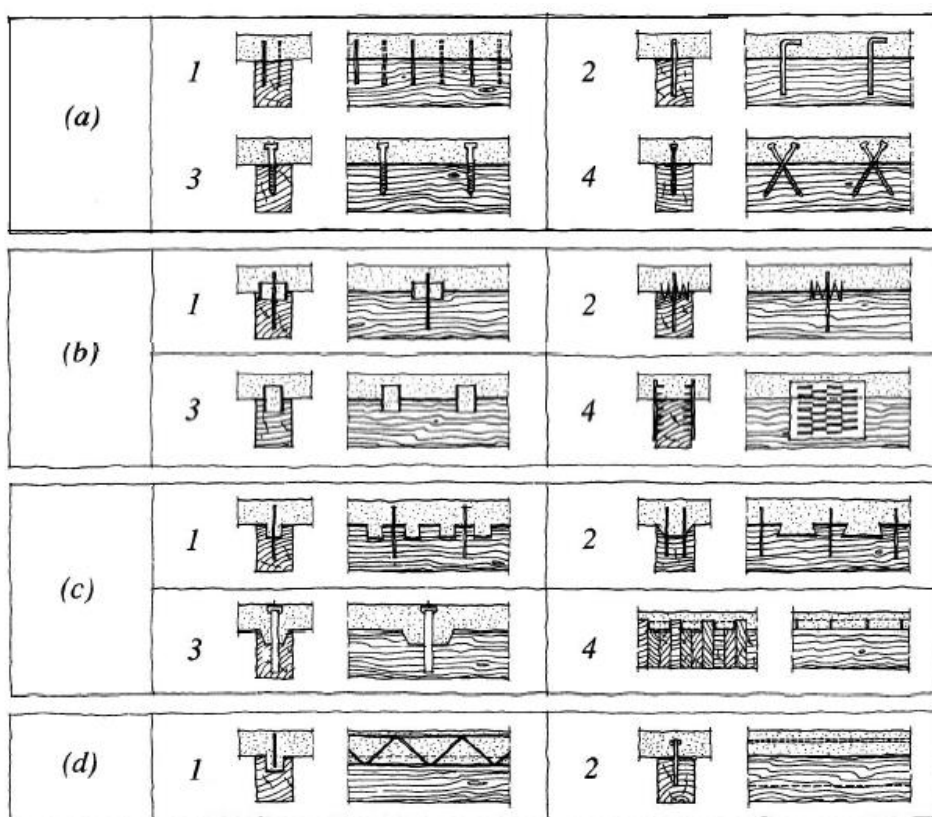


Figura 2.6 - Exemplos de diferentes tipos de ligação madeira-betão: (a₁) pregos; (a₂) varões de aço de construção; (a_{3/4}) parafusos; (b_{1/2}) ligadores, anéis de ligação e placas dentadas, respetivamente; (b₃) tubos de aço; (b₄) placas de aço perfuradas; (c₁) entalhes redondos na madeira e ligadores; (c₂) entalhes quadrados e ligadores; (c₃) entalhes em forma de copo e ligadores; (c₄) plataforma de placas de madeira pregadas com placas de aço ao corte; (d₁) treliça e aço colada na madeira; (d₂) placa de aço colada na madeira (Ceccotti, 1995)

A avaliação da capacidade de carga e do módulo de deslizamento da ligação, é realizada através de ensaios de corte estático, que fornecem a curva força vs deslizamento de uma ligação sujeita a um carregamento ao corte, de acordo com a EN 26891 (1991). A Figura 2.7 apresenta o comportamento típico de diversas soluções de ligação para madeira-betão.

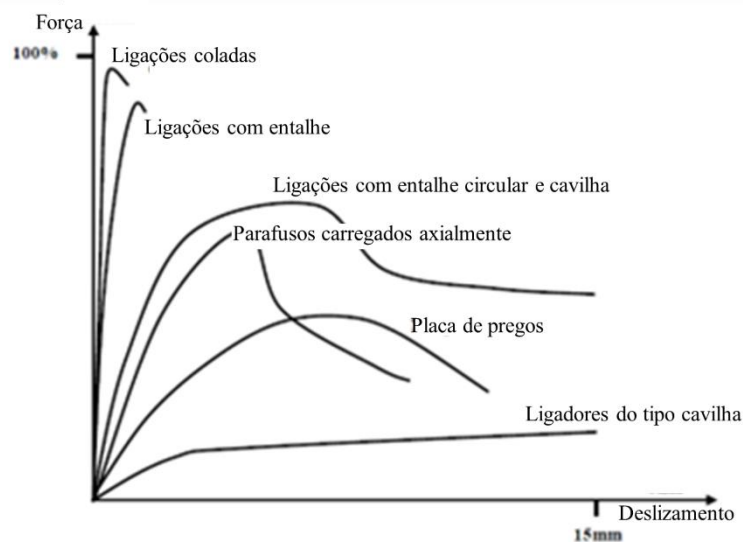


Figura 2.7 - Curva força vs deslizamento para diferentes tipos de ligações
(Adaptado de Dias, 2005)

O presente estudo centra-se em torno da análise do sistema de ligação com entalhe. Para este tipo de sistemas, a ligação entre o elemento de madeira e o elemento de betão é estabelecida através de entalhes na madeira, que podem ser perpendiculares ou inclinados, em relação à interface. Estes entalhes podem ser preenchidos com betão ou com algum material com propriedades semelhantes, como argamassa. Neste documento serão apresentados vários estudos realizados sobre este tipo de ligações.

Para além da metodologia experimental, é cada vez mais importante o desenvolvimento de modelos numéricos capazes de prever o comportamento mecânico de ligações para estruturas mistas. A principal dificuldade para a criação de um modelo numérico, capaz de descrever o comportamento real de uma ligação, é o estabelecimento dos seus parâmetros. Os parâmetros mais importantes a ter em conta são as propriedades dos materiais, as interações entre os mesmos, as condições de apoio existentes e a correta definição da malha de Elementos Finitos.

2.4. Caracterização Experimental de Ligações Mistas Madeira-Betão

Até à publicação da TS 19103 (CEN, 2021) eram utilizadas as indicações da EN 26891 (1991) para o ensaio de ligações mistas madeira-betão. Esta norma não continha indicações relativas à configuração de ensaio mais adequada para este tipo de estruturas mistas, o que originava uma diversidade de configurações que dificultava a comparação entre os vários estudos, limitando o desenvolvimento deste tipo de soluções construtivas.

Ceccotti (1995) sugeriu que a obtenção da curva força *vs* deslizamento para estruturas deste género, se fizesse com base em ensaios de corte estático simples (assimétricos), como é apresentado na Figura 2.8.

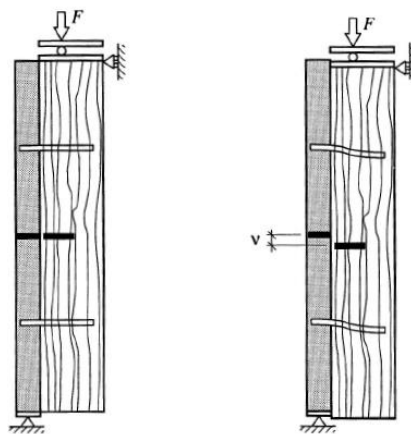


Figura 2.8 - Possível configuração de ensaio para determinação da curva força *vs* deslizamento (Ceccotti, 1995)

No seguimento da otimização deste tipo de ensaios, Monteiro (2009), refere que os resultados de ensaios de corte estático são relativamente sensíveis no caso de ligações coladas e entalhadas. Este tipo de ligações apresenta um comportamento frágil com deformações muito baixas na rotura e, como tal, são muito sensíveis aos diferentes aspetos que as influenciam (configuração do ensaio, imperfeições do provete, local de medição, etc.). A autora desenvolveu uma pesquisa alargada, com o material existente até à data, tendo recolhido informação de cerca de 50 referências, nas quais foram realizados mais de 1760 ensaios experimentais em ligações mistas madeira-betão. Foi possível identificar três configurações possíveis de ensaio: (1) ensaio de corte duplo (simétrico); (2) ensaio de corte assimétrico; (3) ensaio de corte puro. A autora observou que a maioria dos ensaios realizados correspondem a ensaios de corte duplo (simétrico), representando aproximadamente 53% da amostra analisada, correspondendo às 25 referências contabilizadas na Figura 2.9.

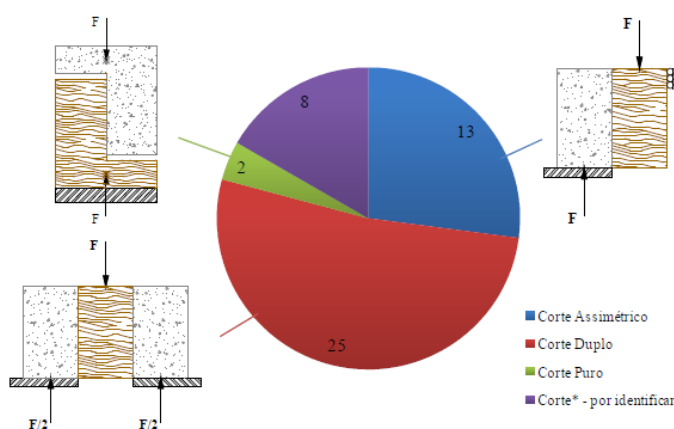


Figura 2.9 - Gráfico resumo dos tipos de ensaio de corte estudados (Monteiro, 2009)

Lukaszewska (2009) apresenta algumas vantagens dos ensaios de corte assimétricos face aos ensaios de corte duplo (simétrico). Os provetes utilizados nos ensaios assimétricos são mais leves, têm um custo reduzido, devido à menor quantidade de materiais utilizada, e são de execução mais rápida. A autora refere que os resultados obtidos neste tipo de ensaios para a capacidade de carga e módulo de deslizamento são 10% superiores aos valores reais. Esta diferença surge da excentricidade de aplicação da carga, que gera uma força de compressão na interface madeira-betão. Esta força origina atrito entre os dois materiais, o qual dificulta o deslizamento na interface, majorando as propriedades da ligação.

Relativamente à organização dos materiais em ensaio, Monteiro (2009) identificou os dois tipos possíveis: peça central de betão ladeada por dois elementos de madeira (36%) e peça central de madeira ladeada por dois elementos de betão (64%). Carvalho e Carrasco (2010) realizaram uma série de ensaios experimentais, nos quais estabeleceram uma comparação entre as duas configurações de ensaio. Os autores concluíram que a configuração betão-madeira-betão apresenta os valores mais fiáveis para a determinação das propriedades mecânicas da ligação. Deste modo, os autores sugerem que este tipo de configuração seja utilizada como referência para futuros ensaios de corte estático.

A TS 19103 (CEN, 2021) preconiza um *layout* para ensaios de corte estático, no qual sugere a adoção de um ensaio de corte duplo com uma peça central de madeira, ladeada por dois elementos de betão, segundo a disposição apresentada na Figura 2.10. É ainda sugerida a utilização de travamentos laterais para prevenção da separação entre a madeira e o betão, sem que estes introduzam um pré-esforço, e resultante atrito adicional, na interface madeira-betão. Relativamente ao procedimento de carregamento, a Especificação Técnica remete para o mesmo descrito na EN 26891 (1991).

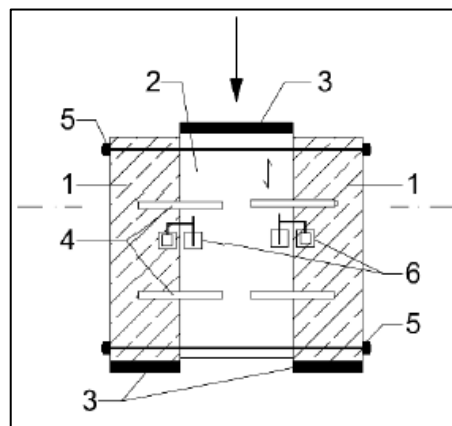


Figura 2.10 - Configuração do ensaio de corte estático: (1) betão; (2) madeira; (3) chapas de aço; (4) ligadores metálicos; (5) travamentos laterais; (6) dispositivos medidores de deslocamento (TS 19103, CEN 2021)

Na bibliografia existem diversos estudos de caracterização mecânica através de ensaios experimentais em ligações com entalhe. Dias (2005) realizou uma série de ensaios para analisar a capacidade de carga e o módulo de deslizamento de ligações entalhadas. O sistema de ligação testado consistiu na colagem de um elemento de contraplacado, com elevada densidade (*densified veneer plywood*), a um elemento de madeira lamelada colada de Espruce (*Picea Abies*). O ensaio foi realizado com um elemento central de betão e dois elementos exteriores de madeira e foi seguido o procedimento de carregamento da EN 26891 (1991). Ensaíram-se 8 provetes com entalhes quadrangulares de 100×100 mm, dos quais, quatro com 10 mm de profundidade e quatro com 15 mm de profundidade. Destes últimos, apenas foi considerado o resultado de três, uma vez que um deles apresenta resultados muito diferentes dos restantes, pelo que foi considerado como um *outlier*. Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Propriedades da ligação (Adaptado de Dias, 2005)

Nº de provetes	Comprimento [mm]	Largura [mm]	Profundidade [mm]	Ângulo do Entalhe [°]	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]	k_{ser} [kN/mm]
4	100	100	10	0	125	193
3	100	100	15	0	116	204

Informações:

$F_{m\acute{a}x}$ corresponde ao valor médio da capacidade de carga por plano de corte

Yeoh *et al.* (2008) desenvolveram um estudo no qual foram consideradas 15 configurações de ligações em LVL – *Laminated Veneer Lumber*, interessando, para o presente estudo, a análise das tipologias com entalhes perpendiculares e inclinados. O comportamento das diversas ligações foi avaliado através de ensaios de corte estático simétricos, em provetes de LVL-betão. A análise consistiu na variação do comprimento, profundidade e forma (inclinado, triangular e perpendicular) do entalhe. Adicionalmente, foi avaliada a influência da aplicação de ligadores no entalhe, com parafusos de 12 e 16 mm. Os autores também avaliaram a influência da profundidade de penetração do parafuso no LVL. Foram ensaiados dois provetes para cada tipo de ligação, segundo o procedimento de carregamento descrito na EN 26891 (1991). Os resultados experimentais encontram-se no Quadro 2.2, tendo sido retiradas as seguintes conclusões pelos autores:

- (1) O comprimento do entalhe (comparar $F_{m\acute{a}x}$ para A1 e A2) e a presença do ligador metálico (comparar $F_{m\acute{a}x}$ para A1 e B1) foram os fatores determinantes, aumentando a capacidade de carga da ligação;
- (2) A generalidade dos provetes entrou em rotura devido a corte no betão;
- (3) A profundidade de penetração do ligador metálico (comparar k_{ser} para A1 para 100 mm e C2 para 140 mm) na madeira aumentou significativamente o módulo de deslizamento da ligação.

Os autores concluíram que os sistemas mais promissores são o entalhe perpendicular (150 × 50 mm), o entalhe perpendicular (300 × 50 mm) e o entalhe triangular (150 × 50 mm) todos com um ligador metálico de 16 mm de diâmetro.

Quadro 2.2 - Propriedades da ligação (Adaptado de Yeoh *et al.*, 2008)

Nomenclatura	Nº de provetes	Comprimento [mm]	Largura [mm]	Profundidade [mm]	Ligador metálico	Ângulo do Entalhe [°]	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]	k_{ser} [kN/mm]
A1	2	150	63	50	Parafuso $\phi 16$	0	73	80
A2	2	50	63	50	Parafuso $\phi 16$	0	46	38
A3	2	150	63	65	Parafuso $\phi 16$	0	72	113
B1	2	150	63	50	-	0	48	105
C1	2	150	63	50	Parafuso $\phi 12$	0	66	78
C2	2	150	63	50	Parafuso $\phi 16$	0	84	211
E1	2	137	63	60	-	30	40	101
E2	2	137	63	60	Parafuso $\phi 16$	30	83	123
H1	2	150	126	50	Parafuso $\phi 16$	0	128	218

Informações:

$F_{m\acute{a}x}$ corresponde ao valor médio da capacidade de carga por plano de corte

Monteiro (2009) avaliou o comportamento experimental de 4 séries de ligações com entalhe. Os provetes desenvolvidos são constituídos por dois elementos de madeira lamelada colada de Espruce (*Picea Abies*), de classe resistente C18, e por um elemento central de betão, de classe resistente C25/30. Foram testadas três geometrias de entalhes, colados ao elemento estrutural de madeira, variando, adicionalmente, o material do entalhe (Pinho Bravo vs Carvalho Americano (*Quercus Rubra*)). Os resultados obtidos encontram-se no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 - Propriedades da ligação (Adaptado de Monteiro, 2009)

Nomenclatura	Nº de provetes	Comprimento [mm]	Largura [mm]	Profundidade [mm]	Ângulo do Entalhe [°]	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]	k_{ser} [kN/mm]
Pinho100*15	5	100	100	15	0	73	394
Pinho140*15	5	140	100	15	0	81	362
Pinho100*20	5	100	100	20	0	97	513
Carv100*15	5	100	100	15	0	128	306

Informações:

$F_{m\acute{a}x}$ corresponde ao valor médio da capacidade de carga por plano de corte

A autora concluiu que a maior capacidade de carga, referente aos provetes de Carvalho Americano, se deve à maior resistência ao corte deste tipo de madeira. O aumento da resistência ao corte da madeira originou a rotura pelo elemento de betão, devido a um acumular de tensões neste material. Relativamente à profundidade do entalhe, a autora observou que, para entalhes com maior espessura, a rotura frágil por corte na madeira é a predominante, não ocorrendo a formação de fendas visíveis no betão.

Jiang e Crocetti (2019) realizaram uma série de ensaios experimentais com o intuito de caracterizar o comportamento de duas configurações de ligação com entalhe. Para tal, desenvolveram 2 provetes para cada configuração, constituídos por uma peça central de CLT e dois elementos exteriores de betão de classe resistente C24 e C30/37, respetivamente. Ambas as configurações apresentam um entalhe semelhante, tendo a variação ocorrido na espessura das camadas de betão e de madeira. A primeira configuração apresenta uma camada de betão com espessura de 60 mm e uma peça de CLT com 3 camadas, com uma espessura total de 120 mm. Na segunda configuração, aumentou-se a espessura do betão para 80 mm e adicionaram-se 2 camadas à peça de CLT, perfazendo uma espessura total de 180 mm. Foram instalados dois parafusos de enroscar a meia altura do entalhe, e ainda uma malha eletrossoldada, de modo a reduzir o risco de rotura prematura dos elementos de betão. Os resultados experimentais obtidos encontram-se no Quadro 2.4.

Quadro 2.4 - Propriedades da ligação (Adaptado de Jiang e Crocetti, 2019)

Nomenclatura	Nº de provetes	Comprimento [mm]	Largura [mm]	Profundidade [mm]	Ângulo do Entalhe [°]	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]	k_{ser} [kN/mm]
N120	2	200	450	25	0	401	862
N180	2	200	450	25	0	447	1301

Informações:

$F_{m\acute{a}x}$ corresponde ao valor médio da capacidade de carga por plano de corte

Nestes ensaios, os autores observaram que a rotura da ligação ocorreu sempre devido ao surgimento de uma falha diagonal no elemento de betão, que se desenvolveu no canto do entalhe como evidenciado na Figura 2.11. Tendo em conta o padrão de fendilhação no betão, e a ductilidade apresentada nas curvas força vs deslizamento, concluiu-se que a malha eletrossoldada garantiu um aumento da capacidade de carga da ligação, retardando a formação das fissuras. Jiang e Crocetti (2019) concluíram que o aumento da espessura do elemento de CLT, não introduziu um aumento significativo na capacidade de carga da ligação.

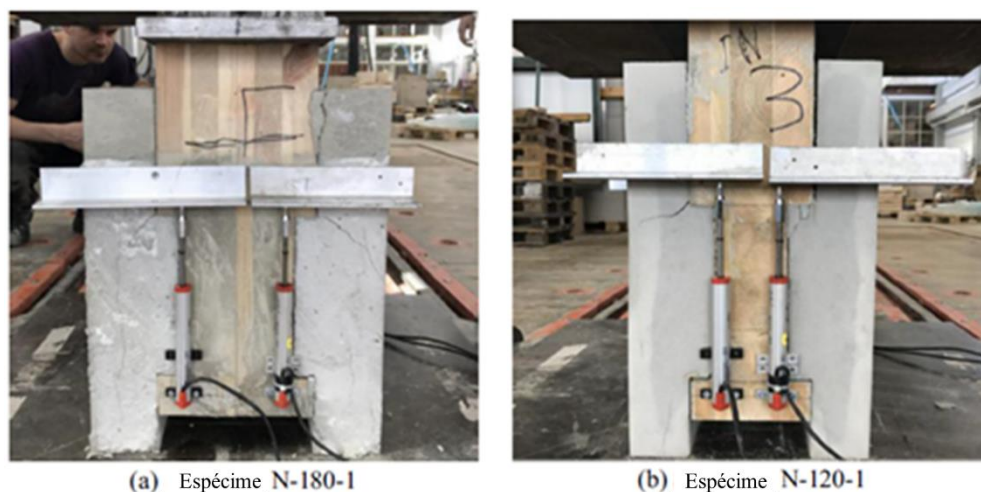


Figura 2.11 - Provetes ensaiados (Adaptado de Jiang e Crocetti, 2019)

Thai *et al.* (2020) procederam a uma série de ensaios sobre uma amostra de provetes constituídos por uma peça central com 5 camadas de CLT, ladeada por duas peças de betão. O principal objetivo desta análise foi a averiguação da influência de 4 variáveis geométricas na capacidade de carga e no módulo de deslizamento da ligação. A Figura 2.12 representa as 4 variáveis que foram avaliadas nesta análise experimental: a) *heel length* (menor comprimento entre o entalhe e a extremidade carregada); b) profundidade do entalhe; c) comprimento do

parafuso que fica embebido no betão; d) espessura da camada de betão. Os resultados experimentais encontram-se no Quadro 2.5.

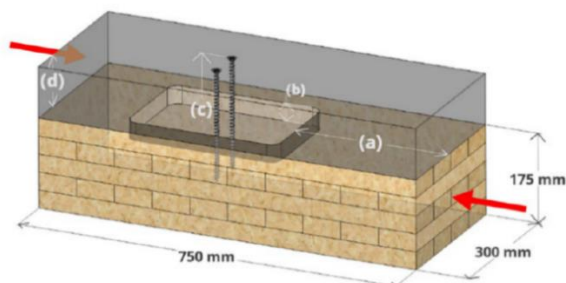


Figura 2.12 - Espécime tipo; a) *heel length*; b) profundidade do entalhe; c) comprimento do parafuso que fica embebido no betão; d) espessura da camada de betão (Thai *et al.*, 2020)

Quadro 2.5 - Propriedades da ligação (Adaptado de Thai *et al.*, 2020)

Nomenclatura	Nº de provetes	a) [mm]	b) [mm]	c) [mm]	d) [mm]	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]	k_{ser} [kN/mm]
A	5	400	20	160	80	127	224
B	5	400	20	220	100	140	213
C	5	400	35	160	100	221	248
D	5	400	35	220	80	221	238
E	5	300	20	160	100	140	199
F	5	300	20	220	80	151	202
G	5	300	35	160	80	211	208
H	5	300	35	220	100	217	195
I	6	400	25	220	80	177	242
J	3	300	25	220	80	169	208
K	3	350	20	220	80	158	202
L	3	350	35	220	80	238	205
M	5	350	25	220	80	175	212

Informações:

$F_{m\acute{a}x}$ corresponde ao valor médio da capacidade de carga por plano de corte

Após analisar os resultados experimentais, os autores concluíram que os fatores a), c) e d) não têm impacto relevante na capacidade de carga nem no módulo de deslizamento da ligação e ainda, que a profundidade do entalhe, b) não está diretamente relacionada com a o módulo de deslizamento da ligação.

Ouch *et al.* (2021) procederam a uma série de três ensaios de corte estático simétrico de modo a determinar a capacidade de carga, o módulo de deslizamento e os modos de rotura determinantes, para uma nova configuração de ligação proposta, constituída por entalhes inclinados. Foram fabricados três provetes (B1, B2 e B3) compostos por dois painéis centrais de CLT de classe resistente mínima C18, que foram colados entre si e ladeados por duas peças de betão de classe resistente C35/40. Cada peça de betão foi ligada ao elemento de CLT através de 2 entalhes inclinados como representado na Figura 2.13, e foi introduzida uma malha em forma de “U” no seu interior, de modo a evitar a fissuração precoce do betão. Os provetes B2 e B3 apresentam a mesma configuração.

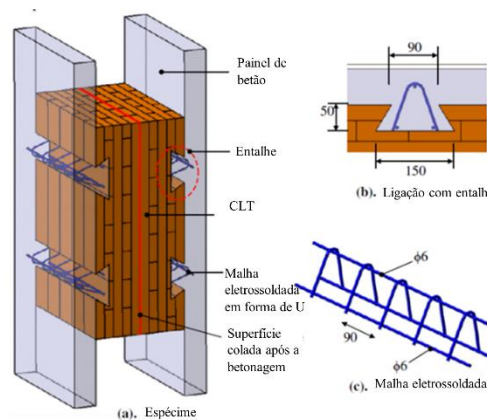


Figura 2.13 - Pormenorização dos espécimes ensaiados (Adaptado de Ouch *et al.*, 2021)

Os mesmos autores observaram que a rotura ocorreu sempre por corte numa das camadas transversais do elemento de CLT. O Quadro 2.6 apresenta os resultados obtidos.

Quadro 2.6 - Propriedades da ligação (Adaptado de Ouch *et al.*, 2021)

Nomenclatura	Nº de provetes	Comprimento [mm]	Largura [mm]	Profundidade [mm]	Ângulo do Entalhe [°]	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]	k_{ser} [kN/mm]
B1	1	90	500	50	31	210	905
B2	1	90	400	50	31	168	552
B3	1	90	400	50	31	184	516

Informações:

$F_{m\acute{a}x}$ corresponde ao valor médio da capacidade de carga por plano de corte

Adicionalmente, os autores concluíram que os provetes ensaiados demonstram elevada capacidade de carga e módulo de deslizamento, apresentando uma rotura frágil. Neste exemplo, a largura do entalhe demonstrou ter uma elevada influência nas propriedades da ligação, especialmente no módulo de deslizamento.

2.5. Simulação Numérica de Ligações Mistas Madeira-Betão

O desenvolvimento dos programas de simulação numérica revolucionou o modo como é analisado o comportamento estrutural de várias soluções construtivas. A comunidade científica tem trabalhado em prol de um objetivo comum, o estabelecimento de modelos para a previsão do comportamento deste tipo de ligações, com o objetivo de minimizar os custos de avaliação das suas propriedades mecânicas. Os primeiros Modelos de Elementos Finitos desenvolvidos eram bidimensionais (2D), com elementos do tipo viga a simular os ligadores metálicos, no entanto, com o aumento da capacidade de processamento, ocorreu a evolução para os modelos tridimensionais (3D) (Dias *et al.*, 2007).

Dias *et al.* (2007) desenvolveram um modelo tridimensional para a previsão do comportamento de uma ligação madeira-betão. Os autores apresentam um Modelo de Elementos Finitos que se provou capaz de descrever o comportamento mecânico de ligações com cavilhas, para madeiras de três espécies diferentes (Espruce, Pinho Bravo e Castanheiro). A simetria geométrica dos provetes testados apresenta diversas vantagens em contexto de laboratório, no entanto, a análise computacional permite a simplificação geométrica do modelo em apenas um plano de corte, reduzindo deste modo a carga computacional necessária para a sua análise. O modelo desenvolvido, apresentado na Figura 2.14, é constituído por elementos de aço, madeira e betão, representando os provetes que foram analisados experimentalmente. O comportamento do aço foi descrito através de uma curva tensão-extensão trilinear, correspondente à fase inicial elástica, fase de endurecimento e fase plástica. O betão foi tratado como um material isotrópico. A fissuração no betão foi considerada através da função que permite a diminuição da tensão no material para zero, uma vez atingido um patamar limite de extensão. Os autores afirmam que o material de mais difícil definição foi a madeira, devido à possibilidade de ocorrência de imperfeições naturais como desvios no fio ou nós. Foi realizada uma análise prévia que permitiu ter confiança num modelo ortotrópico para o material sem distinção entre as propriedades das direções radial e tangencial. A interação entre os materiais foi definida através elementos de contacto deformáveis, considerando os respetivos coeficientes de atrito entre os diferentes materiais. Os coeficientes de atrito utilizados foram 0,57 para a interação madeira-betão, 0,5 para a interação madeira-aço e 0,9 para a interação betão-aço.

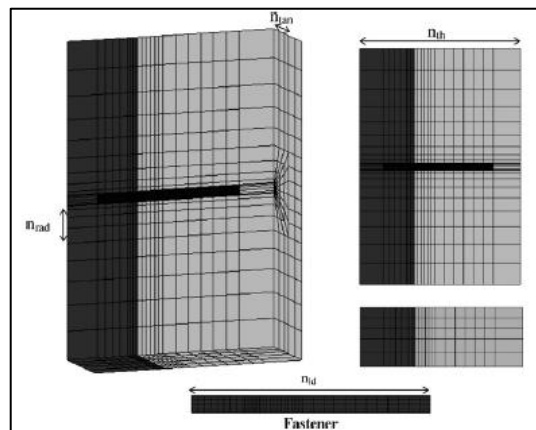


Figura 2.14 - Modelo tridimensional (Dias *et al.*, 2007)

Os modelos propostos apresentam resultados semelhantes aos ensaios experimentais até valores de deslizamento de 10 mm, na interface madeira-betão. A forma global dos diagramas força vs deslizamento obtidos numericamente, ajusta-se bem às curvas determinadas experimentalmente, como apresentado na Figura 2.15, mas a previsão numérica da capacidade de carga e do módulo de deslizamento da ligação apresenta valores superiores aos valores médios obtidos em laboratório.

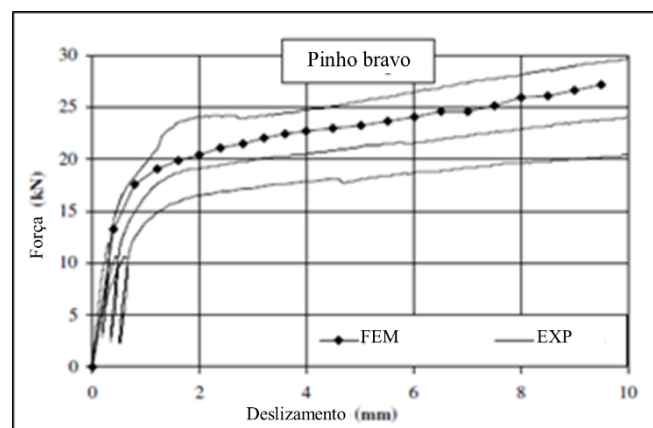


Figura 2.15 - Curvas força vs deslizamento resultantes dos ensaios experimentais e do modelo numérico para a madeira de Pinho Bravo (Adaptado de Dias *et al.*, 2007)

Mais tarde, Monteiro *et al.* (2013) desenvolveram um estudo sobre ligações entalhadas em madeira, com o intuito de perceber qual a influência do procedimento experimental nas propriedades mecânicas da ligação. Adicionalmente, usando o programa *ABAQUS CAE*[®] (2007) desenvolveram um modelo numérico de Elementos Finitos (Figura 2.16) capaz de prever o comportamento deste tipo de ligação. Para validar este modelo, foram utilizados os resultados de três conjuntos de provetes, testados experimentalmente, que diferiam no material do entalhe, na classe de betão e na geometria do provete.

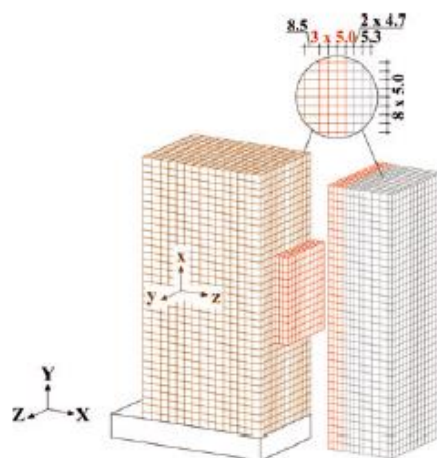


Figura 2.16 - Modelo de Elementos Finitos (Monteiro *et al.*, 2013)

O modelo numérico foi desenvolvido com a mesma configuração dos três conjuntos de ensaios experimentais em análise, representando ensaios de corte duplo com um elemento de betão ladeado por dois elementos de madeira. As duas primeiras configurações, desenvolvidas por Dias (2005) são constituídas por entalhes de DVW – *densified veneer wood*. O terceiro conjunto foi desenvolvido por Monteiro (2009), e conta com um entalhe em madeira de Pinho Bravo. Todos os provetes foram ensaiados de acordo com a EN 26891 (1991). Uma vez que os provetes apresentavam dois eixos de simetria, foi possível reduzir o modelo apenas a um quarto da sua geometria, uma vez que os problemas relacionados com erros no procedimento experimental não se colocam na simulação computacional. As condições de apoio definidas no modelo numérico vão ao encontro dos modelos experimentais. Foram restringidos os movimentos horizontais na base dos elementos de madeira, simulando o atrito entre a madeira e os seus apoios da situação experimental. Os restantes apoios foram definidos para traduzir a simetria da peça. Os materiais utilizados nos três conjuntos de ensaios encontram-se resumidos no Quadro 2.7. O elemento de madeira e a peça do entalhe foram definidos como materiais ortotrópicos e o betão foi definido como um material isotrópico. Os comportamentos do betão e do elemento do entalhe foram definidos através de uma curva bilinear de tensão-extensão

(comportamento elástico perfeitamente plástico), antevendo elevadas concentrações de tensão na região do entalhe que originam plastificação local. A malha de Elementos Finitos foi definida de modo a otimizar o processo de análise computacional, utilizando elementos de menor dimensão na região do entalhe. Deste modo, surgiram Elementos Finitos com aproximadamente 5 mm de largura no entalhe e 12 mm de largura nas regiões afastadas do mesmo. Os elementos utilizados foram do tipo C3D8R – elemento paralelepípedo linear tridimensional de 8 nós com integração reduzida. A interação entre os materiais foi definida através de duas componentes: normal e tangencial. A interação normal foi definida como “*Hard contact*” e a tangencial como “*Penalty*”, assumindo um coeficiente de atrito entre os materiais de $\mu=0,55$.

Quadro 2.7 - Propriedades dos materiais (Adaptado de Monteiro *et al.*, 2013)

Materiais			
Espécime	Classe da madeira	Resistência média à compressão do betão [MPa]	Entalhe
Conjunto 1	C18	50	DVW
Conjunto 2		47	DVW
Conjunto 3		33	Pinho

A validação do modelo ocorreu através da comparação entre o módulo de deslizamento do FEM e o obtido experimentalmente. As curvas força *vs* deslizamento obtidas no modelo numérico demonstraram uma tendência semelhante às obtidas experimentalmente, na fase inicial, para um comportamento elástico-linear. Foi estabelecida uma comparação entre os módulos de deslizamento médios obtidos experimentalmente com os da simulação numérica, diferindo em 7,3% para a primeira configuração, 13,6% para a segunda e 37,4% para a terceira.

Procurando exemplos com novas soluções para a definição do comportamento do entalhe, surge o modelo elaborado por Bedon e Fragiacomu (2017) no programa *ABAQUS CAE*[®]. Neste documento, os autores não se limitam a validar o modelo através da comparação das propriedades mecânicas da ligação, mas também procurando simular os modos de rotura comuns para este tipo de sistema. A validação do modelo foi feita tendo por base 15 tipologias de ligações entalhadas (30 provetes, 2 para cada tipologia), previamente caracterizadas através de ensaios de corte duplo de acordo com a EN 26891 (1991). O modelo desenvolvido representa metade do provete ensaiado, consequência da simetria existente, como representado na Figura 2.17. A carga foi aplicada através de uma pressão, distribuída na parte superior do elemento de madeira, tendo sido definidos apoios simples para os elementos de betão e apoios de simetria no plano de simetria do elemento de madeira. Foram utilizados Elementos Finitos do tipo C3D8R disponíveis na biblioteca do programa para definir todas as peças do modelo. A

geometria dos elementos foi perfeitamente simulada no modelo, com exceção para os ligadores metálicos, que foram reduzidos a elementos com uma forma cilíndrica simples.

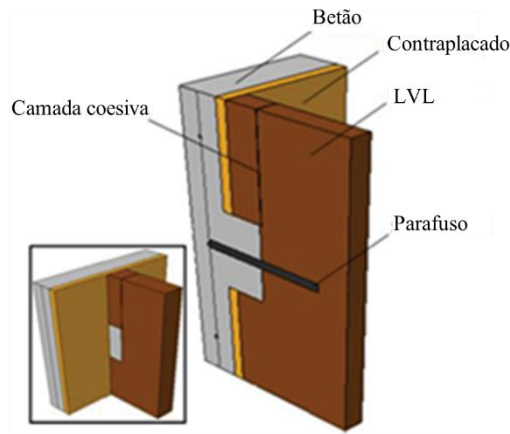


Figura 2.17 - Modelo de elementos Finitos (Adaptado de Bedon e Fragiacom, 2017)

As interações entre os materiais foram definidas através das componentes normal e tangencial. A componente normal da interação foi definida através da ferramenta “*hard contact*” para todas as interfaces de contacto, selecionando a opção que permite o destacamento de todas as superfícies após contacto. Os autores identificaram esta opção como um elemento fulcral para o correto funcionamento do modelo. A componente tangencial da interação foi definida através da ferramenta “*penalty*”. A definição das leis constitutivas dos materiais foi feita de acordo com resultados derivados de ensaios experimentais. Os autores seguiram uma abordagem semelhante à de outros autores para a definição das propriedades dos materiais, tendo-se destacado as seguintes opções:

- Definição de uma curva elasto-plástica para o elemento de madeira lamelada colada, de modo a descrever possíveis mecanismos de rotura plástica (como o esmagamento na direção paralela às fibras);
- Definição de uma *cohesive layer*, na parte superior ao entalhe do elemento de madeira, capaz de simular possíveis modos de rotura como o corte longitudinal ou rotura por tração perpendicular ao fio. A principal vantagem deste elemento é a simulação de mecanismos de início e propagação de fissuração na madeira, na zona do entalhe;
- Aplicação da ferramenta “*concrete damage plasticity*”, capaz de simular o comportamento à compressão e à tração do elemento de betão. Em compressão, o material é definido com um parâmetro de degradação adimensional, capaz de descrever o processo de fissuração e respetiva perda de capacidade de carga do betão. Em tração, surge o parâmetro da energia de fissuração, que tem um objetivo semelhante.

Como conclusão, os autores obtiveram uma boa correlação para a previsão da capacidade de carga das ligações entalhadas. Para algumas das ligações, o modelo forneceu um sobrestimativa, enquanto para outras forneceu valores abaixo dos resultados experimentais. De uma análise geral, conclui-se que os resultados experimentais e os resultados do modelo diferiram, em média, 4%.

Jiang e Crocetti (2019) também apresentam alguns avanços no ramo da simulação numérica. Os autores desenvolveram um modelo numérico não-linear capaz de reproduzir o comportamento de estruturas mistas CLT-betão, quer para a caracterização das propriedades mecânicas da ligação entalhada, quer para a previsão do comportamento das vigas. O modelo definido pelos autores, à semelhança dos vários exemplos já apresentados, também é simplificado pela simetria da peça. Neste exemplo, a malha foi definida através de elementos do tipo C3D8R, tendo os elementos de betão e de CLT sido discretizados em volumes de geometria regular, de modo a aplicar a técnica “*Structured mesh*”. Os Elementos Finitos do modelo apresentavam um tamanho de 10 mm, aproximadamente. Para além dos elementos de madeira e betão, o modelo conta ainda com uma malha de aço, posicionada no entalhe, que foi definida através de um elemento do tipo “*2-node beam element*”. A interação entre esta malha e o betão foi definida através da opção “*Embedded region*”. Adicionalmente, os espécimes sujeitos a ensaios de corte duplo continham um ligador metálico no entalhe. Após ser efetuado o cálculo da sua capacidade de carga ao corte e do seu módulo de deslizamento através da EN 1995-1-1 (2004) (EC5), conclui-se que estes valores eram muito inferiores aos do entalhe, devido ao seu reduzido diâmetro (7 mm), pelo que aquele foi ignorado no modelo final. Os autores também simularam o comportamento do betão através da técnica “*damage plasticity model*”. A madeira foi definida como um material ortotrópico com propriedades semelhantes para as direções radial e tangencial. Neste exemplo surge a definição das diferentes camadas do CLT, orientadas de acordo com a direção real das fibras das diversas camadas. Da experiência obtida nos ensaios experimentais, através da observação de grandes deformações da madeira na região do entalhe, o autor decidiu incorporar o comportamento plástico da madeira no modelo, caracterizado através do critério de Hill. Os seis parâmetros de entrada que definem este critério foram obtidos em Dias *et al.* (2007).

Os autores concluíram que o modelo prevê de forma correta a curva força *vs* deslizamento da ligação entalhada, especialmente em fase elástica. A capacidade de carga estimada pelo modelo é inferior à resultante dos ensaios experimentais, podendo este facto dever-se à definição de uma lei constitutiva simplificada para a madeira. Adicionalmente, foi possível concluir que o comportamento plástico da madeira em compressão é um fator crítico para traduzir a ductilidade da ligação, sendo assim extremamente relevante para a obtenção de resultados fidedignos. A Figura 2.18 apresenta a distribuição de tensões nos elementos do modelo, sendo

a zona da madeira superior ao entalhe e o canto superior do entalhe de betão as zonas mais críticas para ocorrência de plastificação, devido à elevada concentração de tensões.

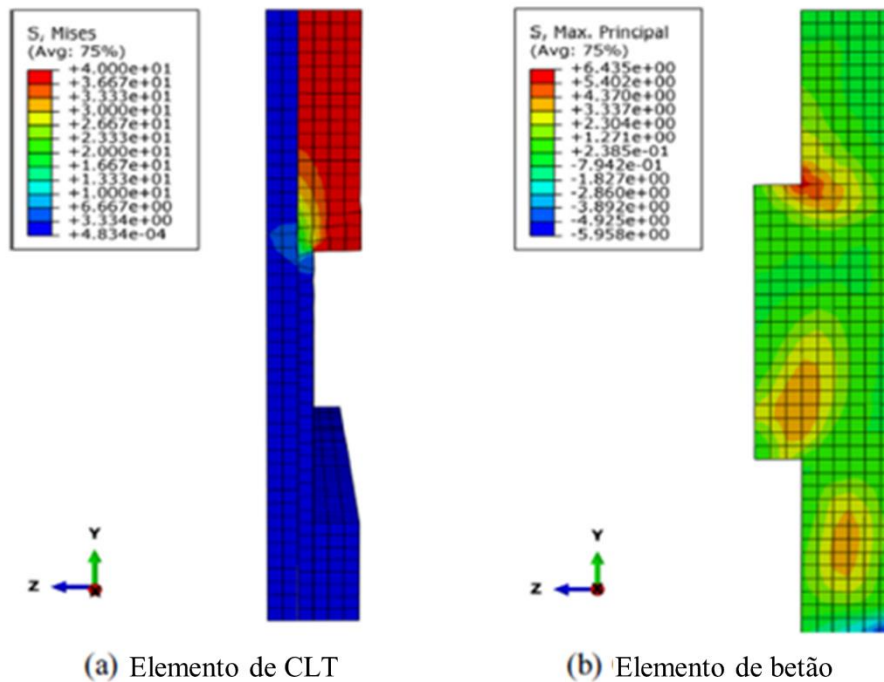


Figura 2.18 - Distribuição de tensões para a máxima carga aplicada nos elementos do modelo
(Adaptado de Jiang e Crocetti, 2019)

Recentemente, Thai *et al.* (2020) desenvolveram um estudo alargado em diversas tipologias de ligações mistas com entalhe e estabeleceram um modelo de Elementos Finitos no programa *ABAQUS CAE*[®] que foi validado através dos resultados experimentais obtidos de ensaios de corte estático simétrico. O modelo é constituído por um elemento de betão e um elemento de madeira, representando a geometria de metade dos provetes, dada a simetria existente. A madeira foi simulada como um material ortotrópico com comportamento elástico-perfeitamente-plástico e foi implementado o critério de Hill referido por Dias *et al.* (2007) para descrever os fenómenos de plasticidade. Ao contrário dos outros exemplos até aqui apresentados, neste caso o betão foi definido como um material isotrópico, apenas com comportamento elástico. Os autores concluíram, através de análise dos resultados da simulação, que o impacto da fase plástica do betão não era relevante para este exemplo. Com esta simplificação, o tempo de análise do modelo foi diminuído e aumentou a probabilidade de convergência. Algumas das considerações mais importantes a ter em conta foram:

- Imposição de restrições de deslocamentos entre as lamelas de CLT através da opção “*tie constraint – rigid contact*”, simulando o efeito da cola;
- Uso de Elementos Finitos do tipo C3D8R, com integração reduzida, diminuindo o tempo de processamento;
- Imposição de um deslocamento relativo de 10 mm entre os dois materiais, ao invés de uma carga;
- Omissão dos parafusos no modelo, dado o seu impacto mínimo no desempenho da ligação;

Os autores verificaram que o modelo converge para valores de deslocamento entre 0 e 4 mm, tendo, por vezes, o cálculo sido interrompido para valores de deslocamento superiores. Esta divergência pode derivar do deslocamento excessivo na superfície de aplicação do deslocamento, tal como apresentado pelos autores. Conclui-se que o modelo de Elementos Finitos conseguiu capturar a tendência do módulo de deslizamento e da capacidade de carga da ligação. Na Figura 2.19, o autor apresentou a comparação entre os resultados experimentais e os resultados da simulação numérica. As duas curvas FEM apresentam o resultado para os dois valores limite de tensão de cedência da madeira, obtidos experimentalmente. A curva superior corresponde a uma tensão de cedência de 37,5 MPa, enquanto a curva que apresenta menor capacidade de carga corresponde a uma tensão de cedência de 25,8 MPa. Pode concluir-se que a correta definição deste factor é extremamente relevante para o funcionamento do modelo.

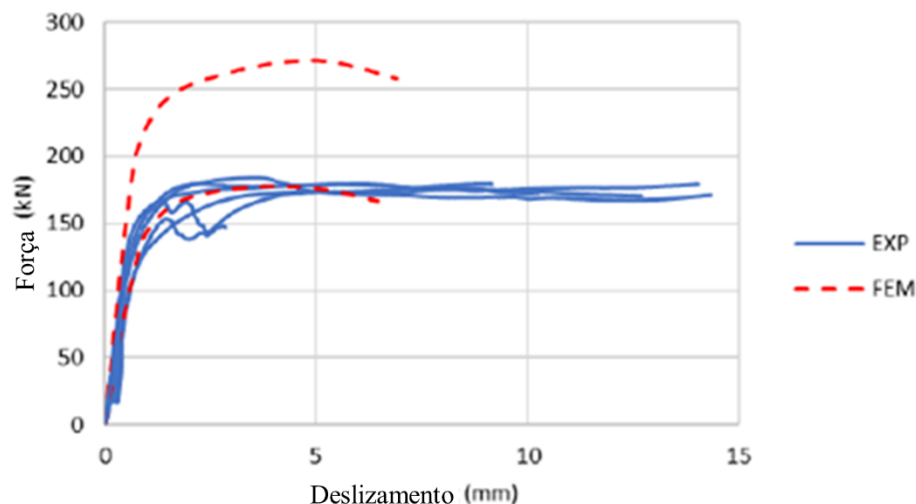


Figura 2.19 - Comparação dos resultados experimentais da curva força vs deslizamento com os resultados da simulação (Adaptado de Thai *et al.*, 2020)

3. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

3.1. Enquadramento

No presente capítulo é descrita a campanha experimental, tendo como sequência a descrição dos materiais utilizados, a dos processos de fabrico dos provetes e a dos ensaios, e concluindo com a apresentação dos resultados dos ensaios de corte simétrico realizados em cinco configurações, tendo por base a metodologia descrita no Anexo C da TS 19103 (CEN 2021).

3.2. Materiais

Madeira

Os elementos de CLT são constituídos por três camadas de madeira serrada de Pinho Bravo e foram produzidos no laboratório do SerQ. A madeira utilizada foi caracterizada, tendo sido registadas as suas dimensões e o seu teor em água. Foi ainda realizado um ensaio não destrutivo, recorrendo ao equipamento MTG (*Mechanical Timber Grader*) para obtenção da frequência de vibração natural e do módulo de elasticidade dinâmico, com o fim de se obter a classe de resistência de cada tábuas. Todas as tábuas de classe de resistência inferior a C18, segundo a EN 338, (2003), foram excluídas do processo de fabrico do CLT. As tábuas utilizadas (30 mm de espessura) apresentaram um valor médio de teor de água de $14 \pm 2\%$ e uma massa volúmica média de $600 \pm 50 \text{ kg/m}^3$.

Betão

As lajetas de betão que constituem os provetes madeira-betão foram betonadas *in-situ*, tendo-se solicitado o fornecimento de um betão pronto de classe C25/30 XC2 (P) CL0,20 D14 S2. Assim, a dimensão máxima de agregado (14 mm) foi a adequada para minimizar problemas de vibração e eventuais vazios. Posteriormente, foram realizados ensaios de compressão aos 28 dias de idade em três provetes cúbicos de 150 mm de aresta. No Quadro 3.1, são apresentados os valores da resistência à compressão do betão, obtidos ao fim de 28 dias.

Quadro 3.1 - Resultados do ensaio de compressão no betão

Idade [dias]	Força [kN]	Tensão [MPa]
28	1039	46,2
	1072	47,7
	1049	46,6

De acordo com os resultados, pode verificar-se que o betão fornecido corresponde à classe de resistência C35/45. Tendo em consideração a experiência prévia adquirida pela equipa de investigação e estudos que constam da bibliografia, foi decidido posicionar uma malha eletrossoldada quadrada (100 mm × 100 mm) de 5 mm de diâmetro (AQ50). Esta foi disposta a meia altura da espessura da lâmina de betão de modo a minimizar a eventual fissuração prematura, nomeadamente nas regiões sujeitas a níveis superiores de tração. A malha foi posicionada no betão recorrendo a distanciadores com 30 mm de altura.

Ligadores metálicos

Foram utilizados ligadores metálicos do tipo parafuso “SPAX HI.Force 8 × 120 mm”, instalados no centro do entalhe de acordo com as diretivas da TS 19103 (CEN 2021) para dimensionamento de ligações entalhadas. Estes ligadores pretendem conferir alguma resistência ao destacamento (*uplift*) entre a madeira e o betão. Nos provetes que apresentam um entalhe inclinado não foi posicionado ligador metálico, esperando-se que a face inclinada do entalhe possa substituir o desempenho do mesmo. Neste tipo de entalhes, foi posicionada uma malha eletrossoldada em forma de U, com o intuito de controlar a fendilhação do betão que preenche o entalhe.

3.3. Configuração dos Provetes

No presente estudo foram desenvolvidas 5 configurações de ligações com entalhe. Os tipos de entalhe estudados variaram no seu comprimento, profundidade e inclinação, permitindo estabelecer conclusões relativamente à influência destas características no seu comportamento mecânico. Relativamente ao comprimento do entalhe foi possível estabelecer a comparação entre entalhes com 150 mm e entalhes com 90 mm, por comparação entre os resultados das configurações MrP20 e MiP20. A profundidade do entalhe foi analisada através da comparação entre as configurações MiP20 vs MiP45 e MiI20 vs MiI45, comparando entalhes com 20 e 45 mm de profundidade. Relativamente à influência da inclinação do entalhe nas propriedades mecânicas da ligação, foi possível estabelecer a comparação entre as configurações MiP20 vs MiI20 e as configurações MiP45 e MiI45.

A nomenclatura atribuída aos vários provetes traduz a espécie de madeira que os constituem, a sua geometria e as dimensões do seu entalhe. O primeiro caractere, a letra “*M*”, refere-se à madeira utilizada, o Pinho Bravo (*Maritime Pine*). O segundo caractere refere-se ao comprimento do entalhe. Neste caso, o provete pode aparecer descrito com a letra “*r*” (150 mm) ou com a letra “*i*” (90 mm). A letra “*r*” descreve o entalhe de referência, com dimensões já estudadas propostas pela Especificação Técnica de madeira – betão. Os provetes com a letra “*i*” apresentam novas configurações de entalhe. O terceiro caractere pode apresentar a letra “*P*” ou “*I*”, referindo-se a letra “*P*” a entalhes perpendiculares e a letra “*I*” a entalhes inclinados. Por fim, o número apresentado pode tomar os valores **20** ou **45**, referindo-se à profundidade do entalhe (em mm). Para além dos provetes apresentados, existem ainda 3 provetes que foram desenvolvidos para ensaios preliminares, nos quais a nomenclatura foi precedida da letra “*p*”.

No Quadro 3.2 estão descritas as características das várias séries de provetes. De acordo com as indicações presentes na literatura e descritas no subcapítulo 2.4, optou-se pela execução de provetes com dois planos de corte, constituídos por um elemento central de madeira ladeada por duas lâminas de betão. Por motivos de execução e de modo a que a betonagem ocorresse em simultâneo, foram construídos meios provetes que posteriormente foram colados, obtendo assim a configuração final. A Figura 3.1 e a Figura 3.2 apresentam a configuração dos meios-provetes e os pormenores geométricos dos entalhes, respetivamente.

Quadro 3.2 - Configuração dos provetes

Proвете	Quantidade	CLT			Entalhe					Betão		
		Camadas [mm]	Largura [mm]	Comprimento [mm]	Madeira				Elemento metálico	Camada [mm]	Malha eletrossoldada	
					Largura [mm]	Comprimento TOP [mm]	Comprimento BOTTOM [mm]	Profundidade [mm]				
MrP20	3	30,30,30	200	500	200	90	150	150	20	S8*120	60	φ5//100
MiP20	4						90	S8*120				
MiI20	4						114	U-sRC				
MiP45	4						90	S8*120				
MiI45	3						144	U-sRC				

Observações:

S8*120: Parafuso SPAX HI.FORCE, 8×120 mm

U-sRC: Malha eletrossoldada em forma de U

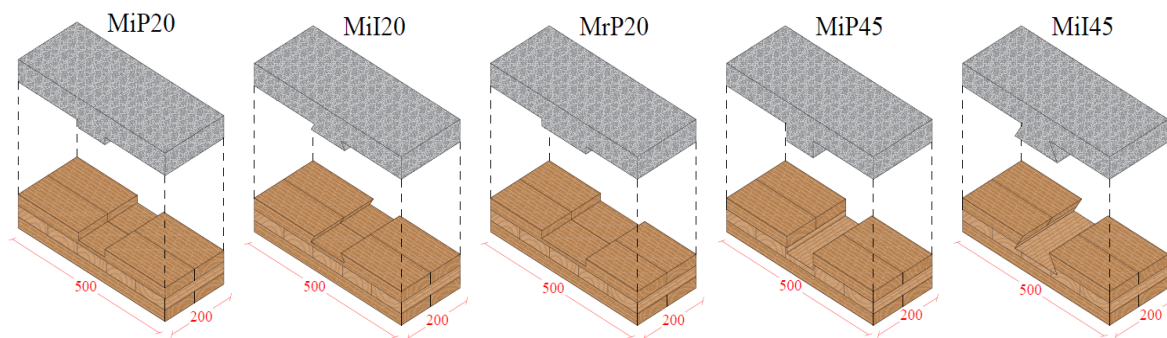


Figura 3.1 - Vista geral dos meios provetes

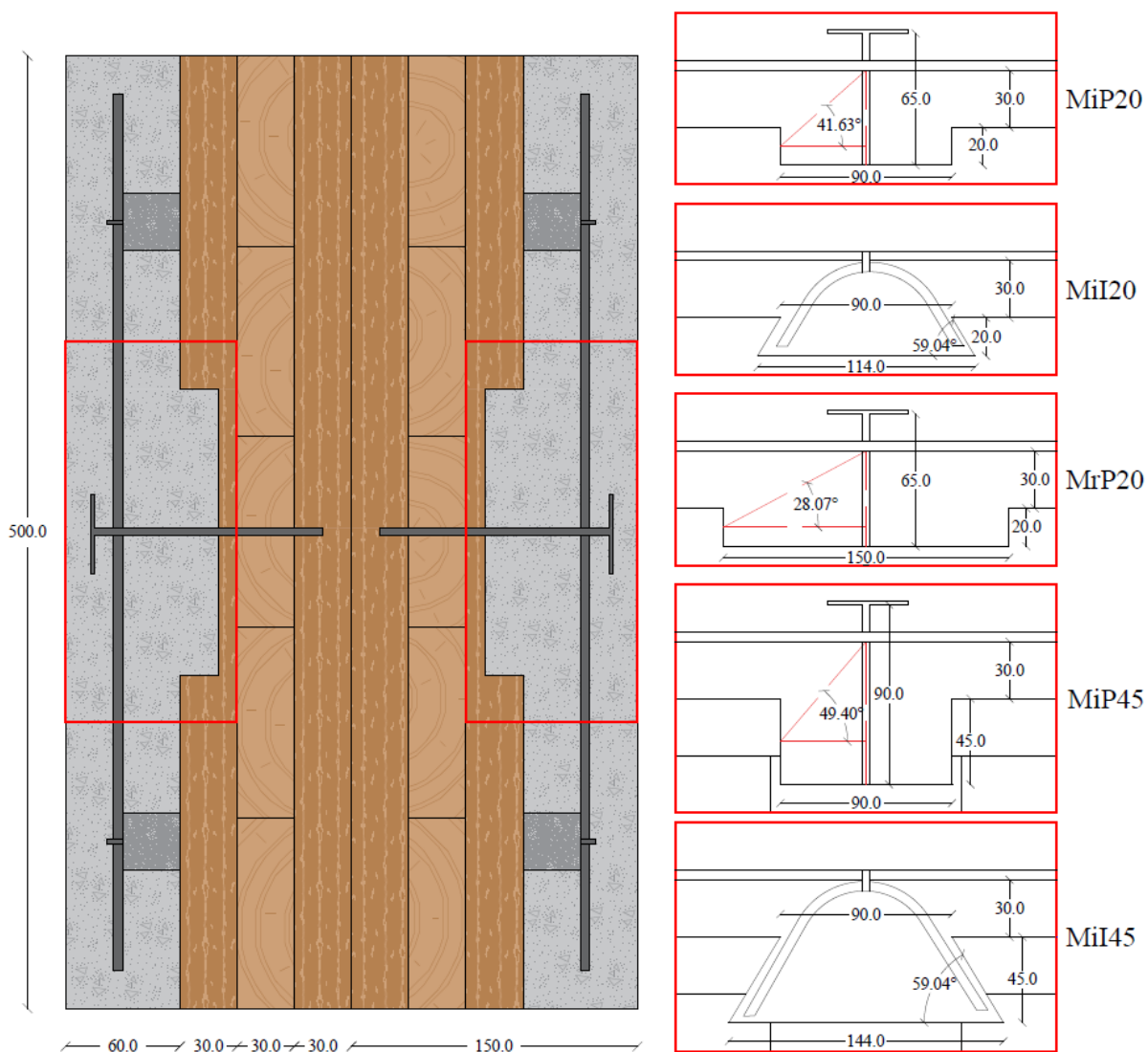


Figura 3.2 - Provete de referência MrP20 (esquerda) e pormenores dos entalhes as demais configurações (direita)

3.4. Execução dos Trabalhos

Os trabalhos experimentais decorreram nas instalações do SerQ – Centro de Inovação e Competências da Floresta. A preparação experimental dividiu-se essencialmente em duas fases, a preparação dos elementos de CLT e a betonagem dos provetes.

3.4.1. Preparação do CLT

A preparação dos elementos de CLT teve início com a caracterização e organização das diversas tábuas que viriam a constituir as suas camadas. As tábuas foram armazenadas em sala climatizada (temperatura de 20 ± 2 °C e humidade relativa de $65 \pm 5\%$) e, de seguida, foram registadas as suas dimensões, a sua massa, e o teor em água. Por fim procedeu-se ao ensaio não destrutivo para obtenção do módulo de elasticidade dinâmico de cada tábua. Depois de caracterizadas as tábuas, iniciou-se o processo de arranjo das lamelas constituintes dos elementos de CLT. Foram consideradas as tábuas de classe de resistência igual ou superior a C18.

A preparação dos elementos de CLT começou pelo aparelhamento das tábuas selecionadas até atingirem uma superfície regular e uma espessura constante de 30 mm. Uma vez aparelhadas, as tábuas foram cortadas com as dimensões correspondentes às lamelas constituintes dos elementos de CLT, com recurso a uma serra de esquadria como ilustrado na Figura 3.3. Para as lamelas longitudinais, foram cortadas tábuas com 50 cm de comprimento e para as lamelas transversais foram cortados elementos com 20 cm de comprimento.



Figura 3.3 - Preparação das tábuas

Depois do corte, as lamelas foram organizadas naquela que seria a sua posição final na peça de CLT, de acordo com a sua massa volúmica. Considerando o material disponível, foram

posicionadas duas tábuas com massas volúmicas semelhantes nas camadas de contacto com o betão. Após a preparação e organização das lamelas, iniciou-se o seu processo de colagem. Para este efeito, foi utilizada uma cola resultante da mistura de uma resina *Aerodux 185* e de um endurecedor *HRP 150* e foi aplicada uma quantidade de 450 g/m^2 (proporção 100/20). A cola e a quantidade utilizadas tiveram em conta o desempenho observado em trabalhos anteriores realizados por Martins (2018) em madeira lamelada colada. A posterior execução dos entalhes ocorreu com recurso a uma serra de mesa, como ilustra a Figura 3.4.



Figura 3.4 - Execução do entalhe

3.4.2. Betonagem

O processo de betonagem iniciou-se com a construção de uma cofragem para os elementos de CLT. Foram cortadas tábuas de aglomerado de madeira com as dimensões exteriores da peça, de modo a criar um molde que permitisse a colocação do betão. Pronta a cofragem, foi aplicado o ligador metálico e disposta a malha eletrossoldada através de distanciadores, como apresentado na Figura 3.5.



Figura 3.5 - Cofragem e betonagem

3.5. Ensaio de Corte Estático

3.5.1. Enquadramento

O dimensionamento de vigas compósitas através do procedimento de cálculo do Anexo B da EN 1995-1-1 (2004) (EC5), pressupõe o conhecimento das propriedades de ligação entre os materiais que formam a sua secção transversal. Assim sendo, surge a necessidade de avaliar o módulo de deslizamento da ligação, k_{ser} , e a sua capacidade de carga, $F_{máx}$.

Os provetes desenvolvidos neste estudo representam, a uma escala de 1:1, a geometria dos elementos de ligação entre os materiais constituintes da viga mista, permitindo assim o cálculo das propriedades reais da ligação entre o elemento de CLT e o elemento de betão. As propriedades desta ligação com entalhe foram determinadas segundo a configuração prescrita no Anexo C da TS 19103 (CEN 2021). Esta especificação técnica estabelece o procedimento experimental para a determinação da capacidade de carga, $F_{máx}$, e do módulo de deslizamento, k_{ser} , de ligações madeira-betão.

3.5.2. Configuração do ensaio

A configuração do ensaio utilizada está representada na Figura 3.6, que contém o alçado frontal do ensaio, a), a planta b) e o alçado lateral c). Foi utilizado um atuador hidráulico com a capacidade de 500 kN (i^1), uma chapa metálica com dimensões $200 \times 175 \times 20$ mm (ii^1), um conjunto de quatro transdutores de deslocamento com curso máximo de 20 mm – dois por plano de corte (iii^1), duas chapas de suporte para as camadas de betão com dimensões $200 \times 200 \times 45$ mm (iv^1) e uma estrutura de contenção lateral (v^1).

A carga foi aplicada verticalmente e a sua distribuição no topo do elemento de CLT foi conseguida através da chapa metálica superior. A dimensão de 175 mm foi definida para que não ocorresse contacto entre a chapa metálica e o betão, evitando a transmissão de carga diretamente entre os dois elementos. A estrutura de contenção lateral foi posicionada com o intuito de evitar a separação entre a madeira e o betão, perpendicular ao plano de corte e para garantir a segurança em caso de rotura abrupta. Esta estrutura, desmontável e regulável, foi aplicada de modo que não fosse introduzido pré-esforço entre as camadas de madeira e betão. Os deslizamentos relativos entre a madeira e o betão foram medidos com auxílio ao posicionamento de dois transdutores de deslocamento em cada um dos planos de corte,

¹ Referente à Figura 3.6

permitindo uma análise individual do seu modo de rotura e do seu percurso de força vs deslizamento.

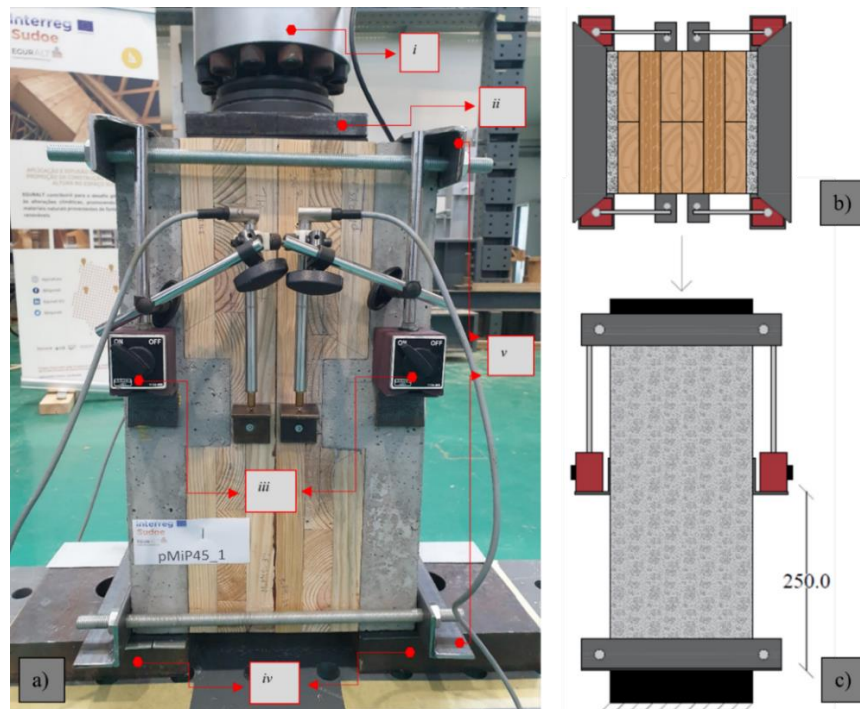


Figura 3.6 - Configuração do ensaio de corte estático simétrico

3.5.3. Protocolo experimental

O Anexo C da TS 19103 (CEN 2021) refere que deve ser seguido o procedimento de ensaio descrito na EN 26891 (1991), que foi originalmente definida para determinação das propriedades de ligações com ligadores mecânicos em estruturas de madeira. Esta norma descreve o procedimento de carga a utilizar no ensaio de corte estático, baseando-se numa previsão de carga máxima de rotura, F_{est} , que é definida de acordo com a experiência dos intervenientes no projeto, em cálculos com base em ensaios preliminares. A norma refere ainda que, caso a capacidade de carga da ligação obtida durante o procedimento experimental, $F_{máx}$, apresente desvios superiores a 20% relativamente a F_{est} , o valor da carga estimada deve ser ajustado para os ensaios seguintes.

O valor da carga estimada, F_{est} , foi obtido através da informação prescrita no capítulo 10 da TS 19103 (CEN 2021), onde surgem indicações para a determinação das propriedades mecânicas de vários tipos de ligações madeira-betão, incluindo o caso das ligações com entalhe.

A Especificação Técnica indica que a rotura da ligação ocorre através de um de quatro modos possíveis, sendo eles o corte no betão (3.1), o esmagamento do betão (3.2), o corte na madeira (3.3) e o esmagamento da madeira (3.4). A capacidade de carga estimada da ligação é dada pelo menor valor resultante das equações 3.1 a 3.4.

$$F_{est} = \min \begin{cases} f_{v,c,d} b_n l_n & (3.1) \\ f_{c,d} b_n h_n & (3.2) \\ k_{cr} f_{v,t,d} b_n l_{min} & (3.3) \\ f_{c,0,d} b_n h_n & (3.4) \end{cases}$$

com,

$$l_{min} = 8 h_n \quad (3.5)$$

$$f_{v,c,d} = \frac{\nu f_{c,d}}{(\cot \theta + \tan \theta)} \quad (3.6)$$

$$\nu = 0,6 \left(1 - \frac{f_{c,k}}{250} \right) \quad (3.7)$$

onde,

$f_{v,c,d}$	valor de cálculo da resistência ao corte do betão;
b_n	largura do entalhe;
l_n	comprimento do entalhe;
$f_{c,d}$	valor de cálculo da resistência à compressão do betão;
h_n	profundidade do entalhe;
k_{cr}	<i>crack factor</i> = 0,67, de acordo com a EN 1995-1-1 (2004) (EC5);
$f_{v,t,d}$	valor de cálculo da resistência ao corte da madeira;
l_{min}	comprimento mínimo de corte na madeira;
$f_{c,0,d}$	valor de cálculo da resistência à compressão paralela ao fio da madeira;
l_v	distância entre o entalhe e a extremidade do elemento de madeira;
l_s	distância entre entalhes;
ν	fator de redução de capacidade de carga para o betão fissurado devido a forças de corte;
θ	ângulo das escoras de betão cujo valor máximo é dado na NP EN 1992-1-1 (2010) (EC2) e o mínimo é dado pela equação:
	$\theta = \max \left\{ \arctan \frac{0,5(h_c + h_n)}{(l_n + l_s)} ; \arctan \frac{h_n}{l_n} \right\}$
$f_{c,k}$	valor característico de resistência à compressão do betão.

Deste modo, foram calculados os valores de capacidade de carga estimada, F_{est} , de cada configuração de entalhe e o respetivo modo de rotura. Para a previsão da capacidade de carga foram considerados madeira e betão de classe de resistência C24 e C35/45, respetivamente. Os

valores de capacidade de carga estimada são apresentados no Quadro 3.3, no qual é possível observar a previsão de uma rotura por esmagamento da madeira em todas as configurações, exceto na configuração MiP45, onde o modo de rotura corresponde ao corte no betão.

Quadro 3.3 - Capacidade de carga estimada

Provete	Capacidade de carga estimada	
	F_{est} [kN]	Modo de rotura
MrP20	150	corte no betão
	93	esmagamento do betão
	53	corte na madeira
	52	esmagamento da madeira
MiP20	108	corte no betão
	93	esmagamento do betão
	53	corte na madeira
	52	esmagamento da madeira
MiI20	122	corte no betão
	93	esmagamento do betão
	53	corte na madeira
	52	esmagamento da madeira
MiP45	107	corte no betão
	210	esmagamento do betão
	119	corte na madeira
	116	esmagamento da madeira
MiI45	139	corte no betão
	210	esmagamento do betão
	119	corte na madeira
	116	esmagamento da madeira

Informações:

F_{est} representa a capacidade de carga estimada por plano de corte.

Uma vez estimada a capacidade de carga da ligação, já se encontram definidas todas as quantidades necessárias para o procedimento de carga da EN 26891 (1991), representado pela Figura 3.7.

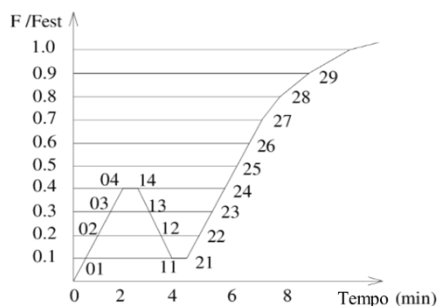


Figura 3.7 - Procedimento de carga - Ensaio de corte estático (EN 26891, 1991)

A TS 19103 (CEN 2021) sugere o seguinte valor teórico para o módulo de deslizamento de uma ligação com entalhe, por unidade de largura do entalhe:

$$k_{ser} = \begin{cases} 1000 \frac{N/mm}{mm} & \text{para } h_n = 20 \text{ mm} \\ 1500 \frac{N/mm}{mm} & \text{para } h_n \geq 30 \text{ mm} \end{cases} \quad (3.8)$$

onde,

h_n – profundidade do entalhe.

Para as configurações de entalhe em estudo vem que:

Quadro 3.4 - Módulo de deslizamento estimado

Provete	b_n [mm]	k_{ser} [kN/mm/mm]	$k_{s,est}$ [kN/mm]
MrP20	200	1,0	200
MiP20		1,0	200
MiI20		1,0	200
MiP45		1,5	300
MiI45		1,5	300

O módulo de deslizamento experimental da ligação, k_{ser} , é determinado através da equação 3.9, de acordo como a informação presente na EN 26891 (1991).

$$k_{ser} = 0,4 F_{est} / v_{i,mod} \quad (3.9)$$

$$v_{i,mod} = \frac{4}{3} (v_{04} - v_{01}) \quad (3.10)$$

onde,

k_{ser} – módulo de deslizamento da ligação entalhada;

F_{est} – capacidade de carga estimada;

$v_{i,mod}$ – deslizamento inicial modificado;

v_{01} – deslizamento medido para $0,1 F_{est}$;

v_{04} – deslizamento medido para $0,4 F_{est}$;

3.6. Resultados Experimentais

3.6.1. Enquadramento

No presente subcapítulo é realizada uma apresentação dos resultados experimentais obtidos. Para cada configuração de entalhe são apresentadas as propriedades mecânicas determinadas, a curva força vs deslizamento e também uma apresentação dos modos de rotura ocorridos.

A definição dos modos de rotura de cada plano de corte foi possível devido à captação de vídeos durante a totalidade do ensaio em ambos os lados do provete. Para isto, foram identificadas as variações acentuadas de deslocamentos relativos capturados com recurso aos transdutores de deslocamento com as imagens capturadas e definidos os modos de rotura.

3.6.2. Configuração MrP20

Os resultados obtidos para as curvas força vs deslizamento relativos aos provetes da configuração MrP20 estão dispostos na Figura 3.8. Uma vez que estamos na presença de um ensaio de corte estático simétrico, foi necessário dividir a carga aplicada no topo do provete por dois, de modo a obter o valor da capacidade de carga, por plano de corte, $F_{máx.}$

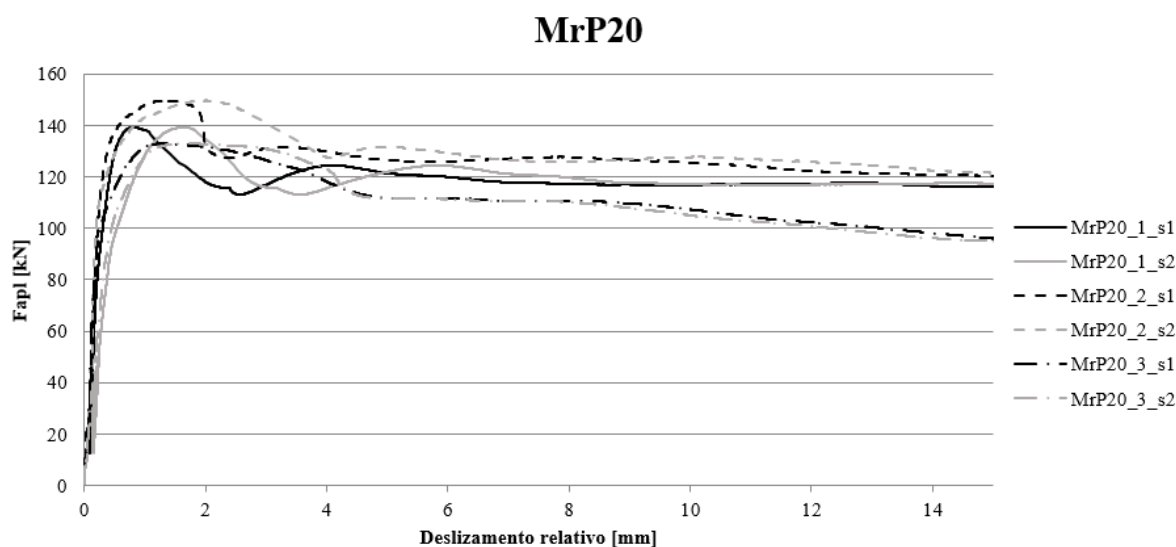


Figura 3.8 - Curva força vs deslizamento MrP20

O Quadro 3.5 apresenta as propriedades mecânicas obtidas para esta ligação. O módulo de deslizamento da ligação, k_{ser} , foi determinado pela equação 3.9 utilizando o deslizamento médio dos valores resultantes dos dois transdutores de deslocamento de cada plano de corte. O ensaio dos provetes MrP20 ocorreu após testagem dos provetes pMiP20. Esta avaliação prévia resultou numa capacidade superior a 20% da capacidade de carga estimada. Deste modo, e segundo as indicações da EN 26891 (1991), foi ajustado o valor da capacidade de carga estimada de acordo com a experiência obtida. A carga estimada foi ajustada para 125 kN.

Quadro 3.5 - Resultados MrP20

Provete	Capacidade de carga [kN]				Módulo de deslizamento [kN/mm]					
	$F_{est,Carr}$	$F_{máx}$	μ	COV	k_{s1}	Modo de rotura	k_{s2}	Modo de rotura	μ	COV
MrP20_1	125	139			345	ST	220	ST		
MrP20_2	125	150	141	5%	456	CT	531	ST	376	29%
MrP20_3	125	133			444	CT	261	CT		

Informações:

$F_{est,Carr}$ e $F_{máx}$ são relativos à capacidade de carga por plano de corte

Modos de rotura:

ST - corte na madeira (*Shear of Timber*)

CT - esmagamento da madeira (*Crush of Timber*)

Uma vez terminados os ensaios, foram analisados os modos de rotura presentes nas ligações. Os provetes com esta configuração de entalhe apresentaram dois modos de rotura, ambos correspondentes a rotura pela madeira. Foi verificada rotura por corte na madeira em 50% das ocasiões (3 de 6 planos de corte) e rotura por esmagamento na madeira nos restantes planos de corte. A Figura 3.9 apresenta o provete MrP20_2 após o ensaio. Neste caso, ocorreram simultaneamente os dois modos de rotura presentes nesta configuração de entalhe. No plano de corte da esquerda é evidente o esmagamento da madeira logo acima do entalhe, enquanto no plano da direita se pode identificar uma rotura por corte paralelo às fibras da lamela onde se insere o entalhe. É possível ainda evidenciar alguma fissuração no betão, que parece ter sido limitada devido à presença da malha eletrossoldada. Todos as ligações apresentaram comportamento dúctil.



Figura 3.9 – Modos de rotura do provete MrP20_2

3.6.3. Configuração MiP20

Os resultados obtidos para as curvas força vs deslizamento relativos aos provetes da configuração MiP20 estão dispostos na Figura 3.10. Os resultados apresentados na figura correspondem às medições registadas até à rotura do primeiro plano de corte. O mesmo se aplica para as restantes configurações. Adicionalmente, a figura apresenta o pormenor da região onde é determinando o módulo de deslizamento, o período 0,1 a 0,4 F_{est} .

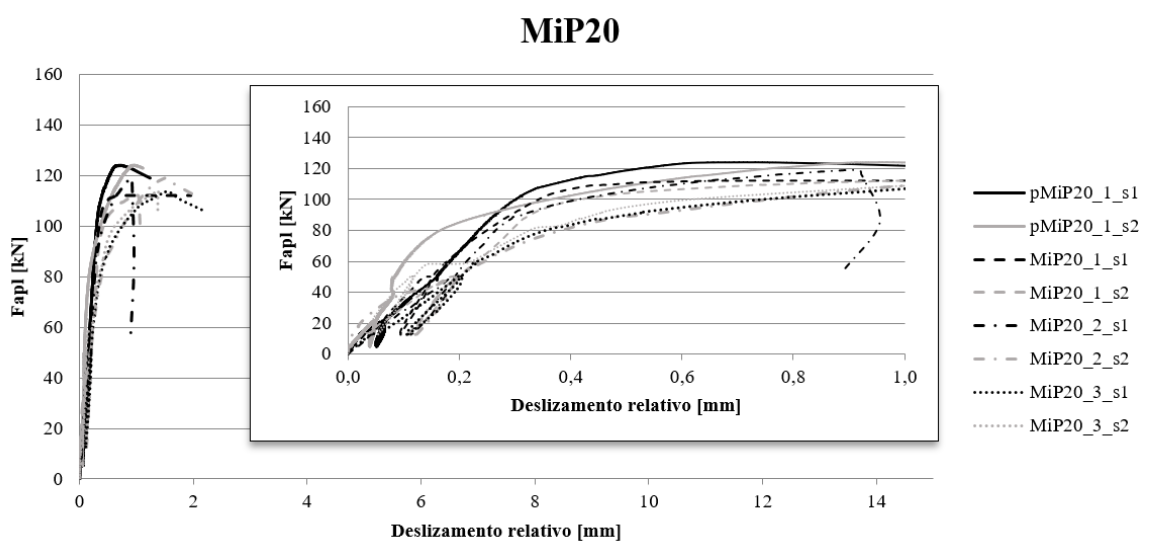


Figura 3.10 - Curva força vs deslizamento MiP20

O Quadro 3.6 apresenta as propriedades mecânicas obtidas para esta ligação. Neste caso, o provete pMiP20_1 foi ensaiado considerando a capacidade de carga prevista calculada no Quadro 3.3 e os restantes adaptados considerando os resultados obtidos. Ao contrário do que se tinha verificado na configuração anterior, a rotura dos elementos MiP20 ocorreu pelo betão. Nos provetes deste tipo registou-se rotura por corte no betão em todos os planos de corte, à exceção do plano 2 do provete MiP20_3, onde não ocorreu rotura.

Quadro 3.6 - Resultados MiP20

Provete	Capacidade de carga [kN]				Módulo de deslizamento [kN/mm]					
	F_{est_Carr}	$F_{máx}$	μ	COV	k_{s1}	Modo de rotura	k_{s2}	Modo de rotura	μ	COV
pMiP20_1	53	124			300	SC	398	SC		
MiP20_1	125	112	117	4%	388	SC	236	SC	303	26%
MiP20_2	125	119			240	SC	211	SC		
MiP20_3	125	114			238	SC	411	*		

Informações:

F_{est_Carr} e $F_{máx}$ são relativos à capacidade de carga por plano de corte

Modos de rotura:

SC - corte no betão (*Shear of Concrete*)

CC - esmagamento do betão (*Crush of Concrete*)

* - não ocorreu rotura do plano de corte

A Figura 3.11 apresenta o provete MiP20_3 após ser submetido a ensaio. É possível identificar rotura por corte do betão no plano da esquerda, o que fez com que o provete se tenha inclinado bruscamente nesta direção. Esta rotura ocorreu de forma frágil (Figura 3.10), o que provocou uma perda imediata da capacidade de carga da ligação. A análise dos deslocamentos medidos no plano da direita permitiu concluir que não ocorreu a rotura do mesmo, apesar de ser visível a iniciação do esmagamento do betão na parte superior do entalhe.



Figura 3.11 - Modos de rotura do provete MiP20_3

3.6.4. Configuração MiI20

Os resultados obtidos para as curvas força vs deslizamento relativos aos provetes da configuração MiI20 estão dispostos na Figura 3.12.

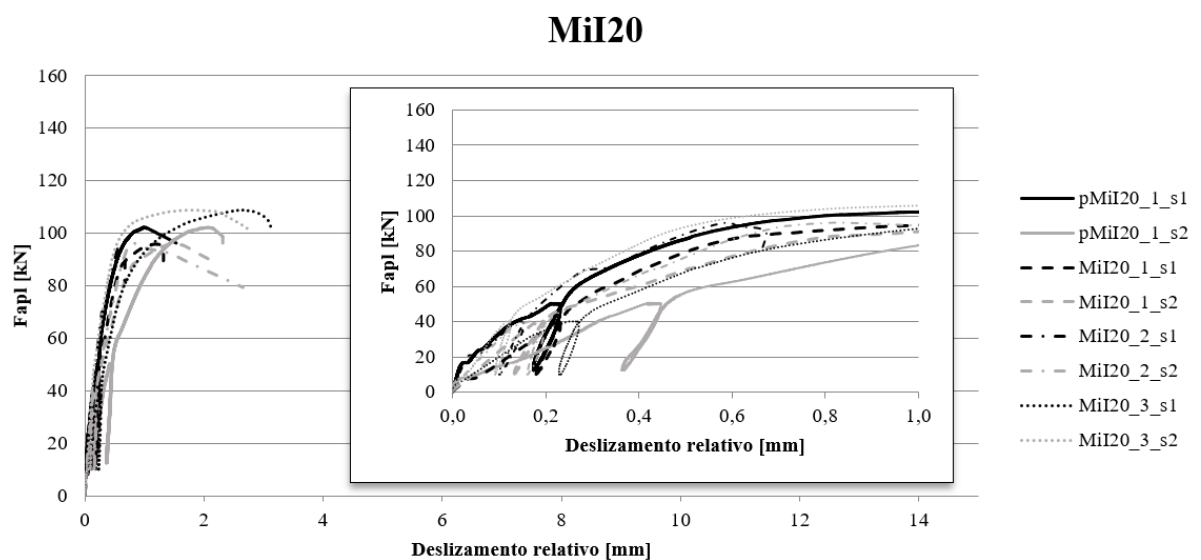


Figura 3.12 - Curva força vs deslizamento MiI20

O Quadro 3.7 apresenta as propriedades mecânicas obtidas para esta ligação. O provete pMiI20_1 foi testado consoante a carga prevista nos ensaios anteriores, no entanto, foi necessário alterar novamente a carga estimada para os restantes provetes.

Quadro 3.7 - Resultados MiI20

Provete	Capacidade de carga [kN]				Módulo de deslizamento [kN/mm]					
	F_{est_Carr}	$F_{máx}$	μ	COV	k_{s1}	Modo de rotura	k_{s2}	Modo de rotura	μ	COV
pMiI20_1	125	102			191	SC	111	SC		
MiI20_1	100	96	101	5%	192	*	214	SC	209	32%
MiI20_2	100	96			240	SC	219	SC		
MiI20_3	100	109			147	SC	355	SC		

Informações:

F_{est_Carr} e $F_{máx}$ são relativos à capacidade de carga por plano de corte

Modos de rotura:

SC - corte no betão (*Shear of Concrete*)

CC - esmagamento do betão (*Crush of Concrete*)

* - não ocorreu rotura do plano de corte

Tal como no caso de MiP20, a rotura ocorreu sempre no elemento de betão tendo sido registado o modo de rotura por corte no betão em 7 dos 8 planos de corte. A Figura 3.13 apresenta o provete MiI20_1, onde é possível observar que ocorreu rotura de apenas um dos planos de corte.



Figura 3.13 - Modos de rotura do provete MiI20_1

3.6.5. Configuração MiP45

Os resultados obtidos para as curvas força vs deslizamento relativos aos provetes da configuração MiP45 estão dispostos na Figura 3.14.

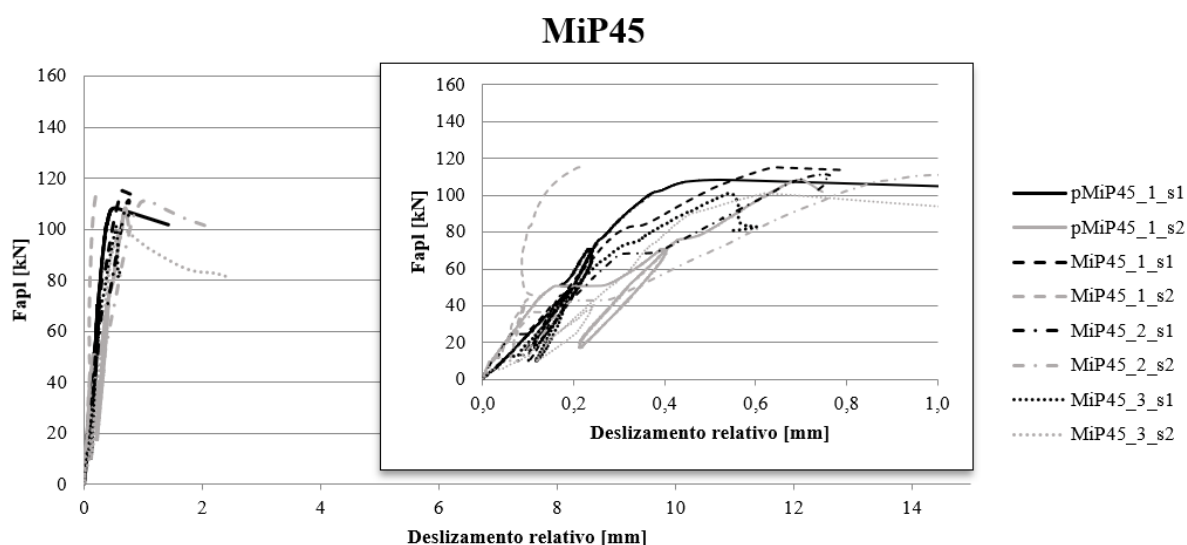


Figura 3.14 - Curva força vs deslizamento MiP45

O Quadro 3.8 apresenta as propriedades mecânicas obtidas para esta ligação. Os resultados apresentados no Quadro 3.3 previam uma capacidade de carga superior na configuração com entalhe perpendicular de 45 mm.. Deste modo, para o provete pMiP45_1 utilizou-se uma carga estimada de 175 kN, tendo sido posteriormente reduzida para 100 kN em função dos resultados obtidos.

Também nesta configuração foi registado o corte no betão como o modo de rotura dominante, ocorrendo em 7 de 8 planos de corte. A Figura 3.15 apresenta o provete MiP45_3, no qual foi atingida a rotura por corte nos dois planos de corte. A rotura verificada nestes provetes foi do tipo frágil.

Quadro 3.8 - Resultados MiP45

Provete	Capacidade de carga [kN]				Módulo de deslizamento [kN/mm]					
	F_{est_Carr}	$F_{máx}$	μ	COV	k_{s1}	Modo de rotura	k_{s2}	Modo de rotura	μ	COV
pMiP45_1	175	108			335	SC	151	SC		
MiP45_1	100	115	109	5%	233	SC	403	*	253	30%
MiP45_2	100	111			269	SC	205	SC		
MiP45_3	100	101			238	SC	187	SC		

Informações:

F_{est_Carr} e $F_{máx}$ são relativos à capacidade de carga por plano de corte

Modos de rotura:

SC - corte no betão (*Shear of Concrete*)

CC - esmagamento do betão (*Crush of Concrete*)

* - não ocorreu rotura do plano de corte



Figura 3.15 - Modos de rotura do provete MiP45_3

3.6.6. Configuração MiI45

Os resultados obtidos para as curvas força vs deslizamento relativos aos provetes da configuração MiI45 estão dispostos na Figura 3.16.

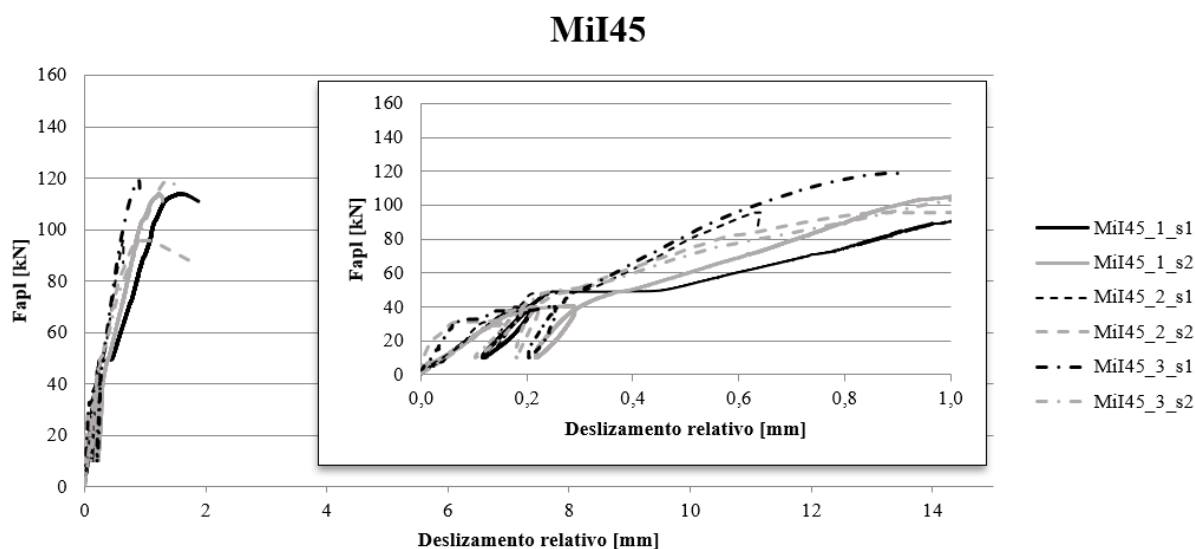


Figura 3.16 - Curva força vs deslizamento MiI45

O Quadro 3.9 apresenta as propriedades mecânicas obtidas para esta ligação. A carga estimada de 100 kN surgiu da experiência obtida na configuração MiP45. Nesta configuração, a rotura ocorreu de forma frágil e foi sempre condicionada pelo corte no betão.

Quadro 3.9 - Resultados MiI45

Proвете	Capacidade de carga [kN]				Módulo de deslizamento [kN/mm]					
	F_{est_Carr}	$F_{máx}$	μ	COV	k_{s1}	Modo de rotura	k_{s2}	Modo de rotura	μ	COV
MiI45_1	100	114			205	SC	140	SC		
MiI45_2	100	96	110	9%	226	*	148	SC	179	21%
MiI45_3	100	119			139	SC	218	SC		

Informações:

F_{est_Carr} e $F_{máx}$ são relativos à capacidade de carga por plano de corte

Modos de rotura:

SC - corte no betão (*Shear of Concrete*)

CC - esmagamento do betão (*Crush of Concrete*)

* - não ocorreu rotura do plano de corte

3.7. Análise de Resultados

O Quadro 3.10 apresenta o resumo dos resultados obtidos para todas as configurações analisadas e estabelece a comparação entre os valores obtidos experimentalmente e os valores previstos.

Quadro 3.10 - Resumo da capacidade de carga, módulo de deslizamento e modo de rotura para as tipologias estudadas

Provete	Capacidade de carga [kN]		Módulo de deslizamento [kN/mm]		Modo de rotura	
	F_{est}	$F_{máx_μ}$	$k_{s,est}$	$k_{s_μ}$	Previsto	Experimental
MrP20	52	141	200	376	CT	CC (50%) + ST (50%)
MiP20	52	117	200	303	CT	SC (87,5%) + * (12,5%)
MiI20	52	101	200	209	CT	SC (87,5%) + * (12,5%)
MiP45	107	109	300	253	SC	SC (87,5%) + * (12,5%)
MiI45	116	110	300	179	SC	SC (83%) + * (17%)

Relativamente à previsão da capacidade de carga da ligação, os valores obtidos através da Especificação Técnica provaram-se inferiores aos obtidos experimentalmente, exceto na configuração MiI45. Relativamente ao módulo de deslizamento, a Especificação Técnica pressupõe o seu aumento com o incremento da profundidade do entalhe e tal não se verificou na comparação entre os entalhes de 20 e 45 mm. Relativamente ao modo de rotura da ligação, apenas nas configurações MrP20 e MiP45 se registaram os modos de rotura previstos.

Para o presente estudo interessa avaliar a influência das propriedades geométricas do entalhe no seu comportamento mecânico. As configurações de entalhe definidas permitem a avaliação da influência de três fatores: *i*) comprimento do entalhe, *ii*) profundidade do entalhe e *iii*) inclinação do entalhe. Adicionalmente, surge ainda a possibilidade de relacionar os modos de rotura presentes em cada configuração com a geometria do entalhe.

Comprimento do entalhe: MrP20 vs MiP20

As configurações MrP20 e MiP20 apenas diferem no comprimento do entalhe, pelo que a comparação dos seus resultados permite retirar conclusões sobre a influência desta propriedade. Da análise dos resultados verifica-se uma redução de 17% e 19,4% na capacidade de carga e módulo de deslizamento, respetivamente, isto para uma redução de 40% no comprimento do entalhe (150 mm para 90 mm). Posto isto, é possível estabelecer algumas relações com as informações presentes na literatura. Comparando as configurações A1 e A2 do Quadro 2.2 (Yeoh *et al.*, 2008) concluíram que uma redução de 67% no comprimento do entalhe (150 mm

para 50 mm) ocorreu uma redução de 37,0% e 52,5% na capacidade de carga e módulo de deslizamento da ligação.

Profundidade do entalhe: MiP20 vs MiP45 e MiI20 vs MiI45

Nos entalhes perpendiculares, o aumento de 125% (20 mm para 45 mm) da profundidade do entalhe provocou uma redução de 6,8% e de 16,5%, na capacidade de carga e no módulo de deslizamento da ligação, respetivamente. Comparando os valores das configurações A1 e A3, do Quadro 2.2 (Yeoh *et al.*, 2008) os autores concluíram que um aumento do comprimento de entalhe de 30% (50 mm para 65 mm) provocou uma redução da capacidade de carga de 1% e, contrariamente aos resultados obtidos neste estudo, um aumento de 41,3% no módulo de deslizamento da ligação. Relativamente aos entalhes inclinados, o aumento de 125% profundidade provocou um aumento de 8,9% na capacidade de carga e uma redução de 14,4% no módulo de deslizamento da ligação.

Os resultados obtidos neste estudo e a sua comparação com outros documentos não permitem retirar conclusões relativas à influência da profundidade do entalhe na capacidade de carga e no módulo de deslizamento da ligação, uma vez que as duas comparações fornecem resultados diferentes. A presente análise não permitiu retirar conclusões relativas à influência do contacto do entalhe com a lamela ortogonal intermédia do CLT, uma vez que os provetes com 45 mm de profundidade apresentaram modos de rotura referentes à quebra do elemento de betão, não se tendo verificado esmagamento do elemento de madeira relevante, nesta região.

Inclinação do entalhe: MiP20 vs MiI20 e MiP45 vs MiI45

Nas configurações com entalhe de 20 mm de profundidade, o entalhe perpendicular garantiu à ligação uma capacidade de carga e módulo de deslizamento 14% e 31% superiores, respetivamente. Relativamente aos entalhes de 45 mm, ambas as configurações (MiP45 e MiI45) obtiveram valores semelhantes de capacidade de carga, no entanto a configuração perpendicular apresenta um valor médio de módulo de deslizamento 29% superior à configuração de entalhe inclinado. Os resultados obtidos não permitem retirar uma conclusão relativa à influência da inclinação do entalhe na capacidade de carga da ligação. Relativamente ao módulo de rigidez da ligação, os resultados indicam que as configurações perpendiculares apresentam valores superiores.

Através do Quadro 3.10 é possível verificar que os provetes com entalhes com 150 mm de comprimento apresentaram modos de rotura relacionados com a madeira, enquanto os provetes com entalhes de 90 mm apresentaram roturas relacionadas com a falha do elemento de betão.

Estes resultados sugerem que o comprimento do entalhe está diretamente relacionado com o modo de rotura existente. Os resultados obtidos indicam que a configuração com 150 mm de comprimento permitiu a dispersão das tensões no elemento de betão, reduzindo deste modo a sua concentração no entalhe, evitando a rotura pelo betão.

A Figura 3.17 apresenta as curvas força vs deslizamento representativas de cada uma das configurações de entalhe ensaiadas. É possível verificar que a configuração com um entalhe de 150 mm (MrP20) apresenta um patamar de incremento de deslizamento a carga constante após o início do esmagamento na madeira. Todas as outras configurações cederam de forma frágil para deslocamentos inferiores a 3 mm.

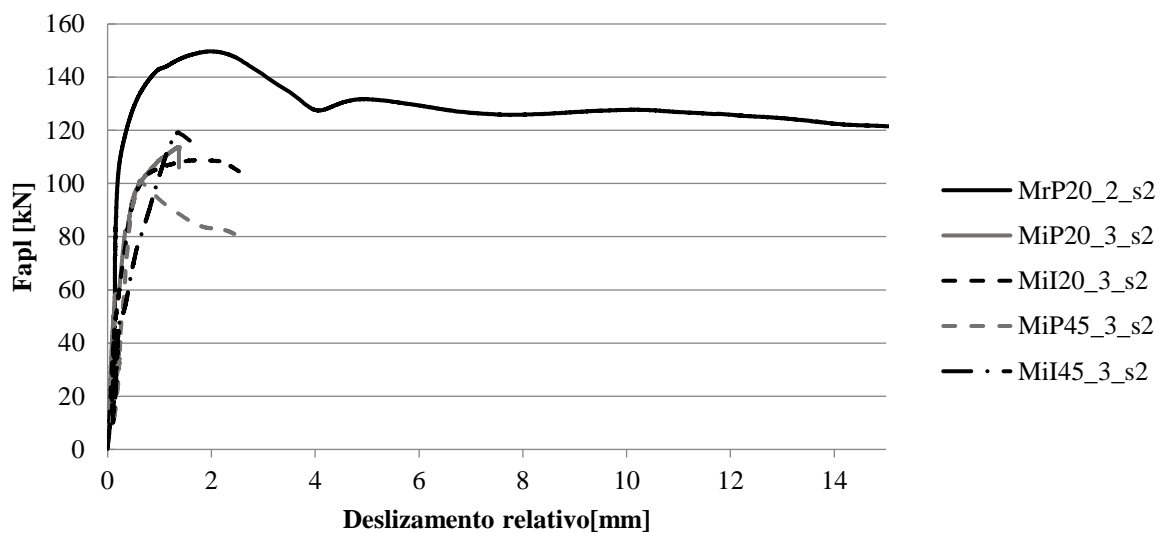


Figura 3.17 - Curva força vs deslizamento para as várias configurações de entalhe

4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

4.1. Introdução

Neste estudo, foi desenvolvido um modelo tridimensional de elementos finitos com recurso ao *software ABAQUS CAE*[®] que procura simular o ensaio de corte estático das ligações com entalhe em estudo e os resultados obtidos experimentalmente. Para a definição do modelo foram consideradas informações relativas ao comportamento linear e não-linear da madeira e do betão, as interações entre os materiais, as condições de apoio e o procedimento de carga aplicado nos ensaios experimentais. O principal resultado a extrair é a curva força *vs* deslizamento. As propriedades dos materiais foram definidas e analisadas em modelos simplificados, permitindo a sua validação no modelo final. Neste estudo, apenas foi possível estabelecer modelos para os elementos com o entalhe perpendicular, devido a dificuldades na definição da malha de Elementos Finitos dos entalhes inclinados.

4.2. Definição do Modelo

O modelo representa os provetes que foram submetidos a ensaios experimentais. Deste modo, o processo de simulação teve início na definição das propriedades geométricas das peças. Na definição do FEM optou-se por considerar metade do provete experimental, ou seja, uma parte de CLT (3 camadas) e 1 lajeta de betão (Figura 4.1). Esta simplificação, possibilita a redução do número de Elementos Finitos para metade, reduzindo assim a carga computacional necessária à simulação. O modelo foi estabelecido sem a presença de ligador metálico, com as respetivas propriedades de interação madeira - betão e condições de apoio, de acordo com as conclusões retiradas por Thai *et al.* (2020). O autor modelou 13 configurações com entalhe e afirma que o ligador metálico apresenta um impacto reduzido no comportamento da ligação.

4.2.1. Geometria do modelo e malha de Elementos Finitos

O modelo é constituído por 4 elementos, 3 de madeira (Figura 4.1 a, b e c) e 1 de betão (Figura 4.1 d), definidos com dimensão descrita no subcapítulo 3.3. O elemento a) e o elemento c) foram definidos com a orientação principal (direção das fibras) correspondente à sua maior dimensão. Por outro lado, a orientação principal do elemento b) foi definida na direção ortogonal à dos elementos a) e c). Cada elemento foi dividido em 3 partições, como é perceptível na Figura 4.1 para a configuração MiP20, de modo pormenorizar a análise do entalhe.

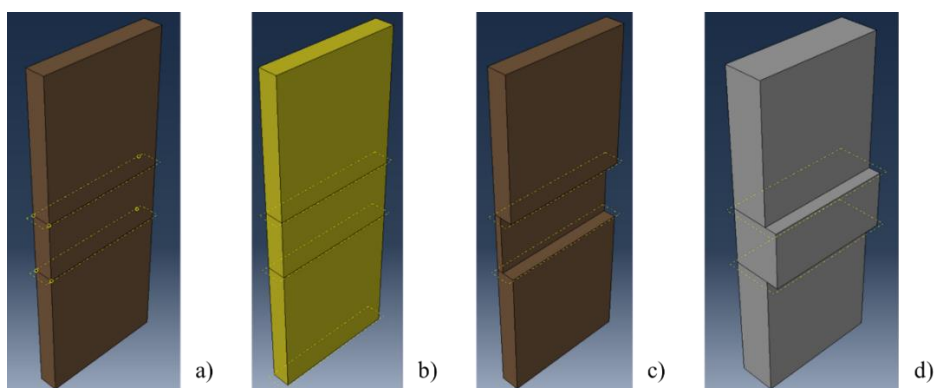


Figura 4.1 - Elementos do modelo – a), b) e c) correspondem ao CLT e d) ao betão (exemplo representativo do provete MiP20)

A definição das partições permitiu estabelecer uma malha de Elementos Finitos com maior densidade na região do entalhe, a região mais relevante para a análise. A malha, definida através de elementos do tipo C3D8R – elemento paralelepípedo linear tridimensional de 8 nós com integração reduzida (Figura 4.2) é apresentada na Figura 4.3 para a configuração MiP20. Na figura é possível observar as grandezas n_{10} e n_{15} , que representam o comprimento da aresta do elemento, 10 mm e 15 mm, respetivamente. Na imagem é possível observar os alçados laterais do modelo a) e b), e a planta, c).

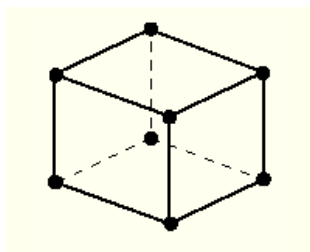


Figura 4.2 – Elemento de oito nós C3D8R

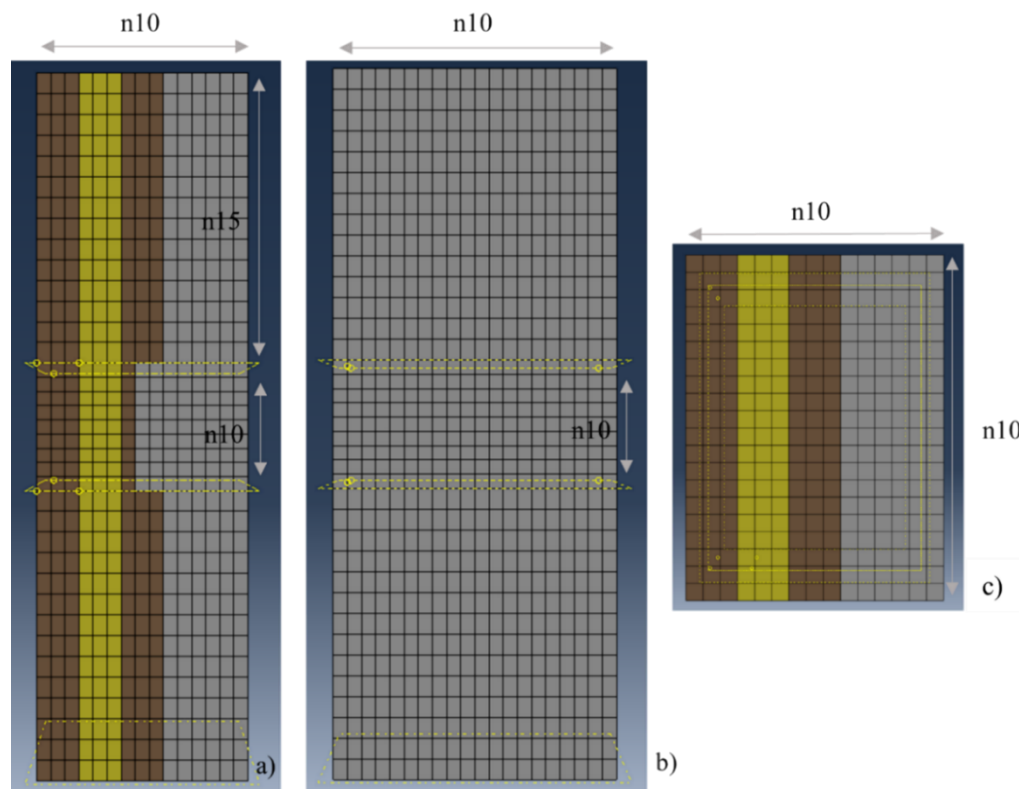


Figura 4.3 - Malha de Elementos Finitos (MiP20) – a) e b) vistas laterais; c) planta

4.2.2. Propriedades dos materiais

A madeira é um material natural, com imperfeições (desvios do fio, nós, etc.) que alteram o seu comportamento de elemento para elemento. Deste modo, a definição das suas propriedades através de uma simulação numérica é um processo extremamente complexo e com algum grau de erro associado. Segundo Dias *et al.* (2007) a madeira pode ser caracterizada por três planos ortogonais de simetria do material, o plano longitudinal (paralelo às fibras), o plano tangencial e o plano radial. Segundo os autores, o comportamento deste material pode ser definido através da lei constitutiva de um material ortotrópico. No entanto, devido à natureza do material, a definição destas propriedades apresenta uma grande variabilidade. Os autores garantem ainda, que quando se trata a madeira como material estrutural, é comum considerar que não existem diferenças entre as propriedades radiais e tangenciais. Assume-se então, que a madeira é um material ortotrópico sendo o eixo do xx representativo do eixo paralelo às fibras e os eixos yy e zz representantes das componentes radial e tangencial, iguais entre si. No modelo, foram definidas as várias lamelas do CLT e estabelecidas as respetivas direções principais de acordo com os provetes experimentais.

O comportamento elástico da madeira (classe resistente C24) foi determinado segundo as considerações presentes na EN 338 (2003) que definem as relações entre o módulo de elasticidade da madeira nas várias direções principais (equação 4.1) e entre o módulo de elasticidade e o módulo de distorção (equações 4.2 e 4.3). As restantes propriedades da madeira foram obtidas na literatura e estão apresentadas no Quadro 4.1.

$$E_{0,mean} = E_{xx} = 30E_{zz} = 30E_{yy} \quad [\text{MPa}] \quad (4.1)$$

$$G_{xy} = G_{zx} = \frac{E_{xx} + E_{yy}}{2} \times \frac{1}{16} \quad [\text{MPa}] \quad (4.2)$$

$$G_{yz} = \frac{E_{zz} + E_{yy}}{2} \times \frac{1}{16} \quad [\text{MPa}] \quad (4.3)$$

Para a definição do comportamento plástico da madeira é necessário estabelecer um critério que descreva a rotura do material. Foi adotado o critério de *Hill*, uma extensão do critério de Von Mises para materiais ortotrópicos. Dias *et al.* (2007) apresentam as expressões teóricas do critério de *Hill* e os 6 coeficientes potenciais delas resultantes, que permitem descrever o comportamento potencial plástico do material. Neste estudo, foram assumidos os mesmos valores para os coeficientes potenciais (Quadro 4.1). A curva tensão-extensão da madeira foi definida com um diagrama bilinear proposto por Dias *et al.* (2007) como é apresentado na Figura 4.4. A tensão de cedência do material corresponde à resistência de compressão paralela ao fio da madeira (esmagamento no entalhe). Em termos de plasticidade, a madeira foi definida como um material elástico perfeitamente-plástico.

Quadro 4.1 - Propriedades da madeira consideradas na definição do FEM

		Referência	Nomenclatura	ABAQUS CAE®	Valor
Propriedades elásticas - <i>Engineering constants</i>	Módulo de elasticidade paralelo ao fio [MPa]	EN 338	$E_{0,mean}$	E_1	11000
	Módulo de elasticidade perpendicular ao fio [MPa]	EN 338	$E_{90,mean}$	$E_2=E_3$	370
	Módulo de distorção [MPa]	EN 338	G_{mean}	$G_{12}=G_{13}$	690
	Rolling shear modulus [MPa]	Jiang e Crocetti, (2019)	$G_{r,mean}$	G_{23}	60
	Coefficiente de <i>Poisson</i> [-]	Thai <i>et al.</i> (2020)	ν_{12}	N_{12}	0,4
	Coefficiente de <i>Poisson</i> [-]	Thai <i>et al.</i> (2020)	$\nu_{13}=\nu_{23}$	$N_{13}=N_{23}$	0,3
	Tensão de cedência [MPa]	EN 338	$f_{c,0,k}$	σ	21
Propriedades plásticas - Critério de Hill	Coeficientes potenciais [-]	Dias <i>et al.</i> (2007)	R_{11}		1
			R_{22}		0,19
			R_{33}		0,19
			R_{12}		0,38
			R_{13}		0,38
			R_{23}		0,38

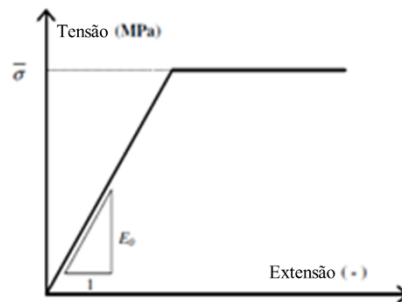


Figura 4.4 - Modelo bilinear utilizado para definir o comportamento da madeira
(Adaptado de Dias *et al.*, 2007)

O comportamento elástico do betão (classe resistente C35/45) foi definido de acordo com as indicações da NP EN 1992-1-1 (2010) (EC2), da qual é obtido o módulo de elasticidade, dado pela equação 4.4. O Quadro 4.2 apresenta as propriedades que definem o comportamento elástico do betão.

$$E_{cm} = 22[(f_{cm})/10]^{0,3} \quad [\text{MPa}] \quad (4.4)$$

As propriedades do betão foram definidas recorrendo à ferramenta “*damage plasticity model*”. Este modelo traduz a redução do módulo de elasticidade do betão à medida que as suas propriedades se deterioram, resultado da fissuração do material. As propriedades plásticas do material estão descritas no Quadro 4.2. Neste material, o comportamento à compressão é muito diferente do comportamento à tração. Surge a necessidade de definir o diagrama tensão-extensão para as duas situações. A relação tensão - extensão para o betão sujeito à compressão foi estabelecida com a equação 4.5, retirada da NP EN 1992-1-1 (2010) (EC2).

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta} \quad (4.5)$$

onde,

$$\eta = \varepsilon_c / \varepsilon_{c1}$$

ε_{c1} é dada pela NP EN 1992-1-1 (2010) (EC2)

$$k = 1,05E_{cm} \times |\varepsilon_{c1}| / f_{cm}$$

A relação tensão-extensão para o betão sujeito à tração foi obtida através do diagrama proposto por Allam *et al.* (2013). A Figura 4.5 apresenta os 5 pontos definidos para a curva. Os valores dele resultantes estão descritos no Quadro 4.4.

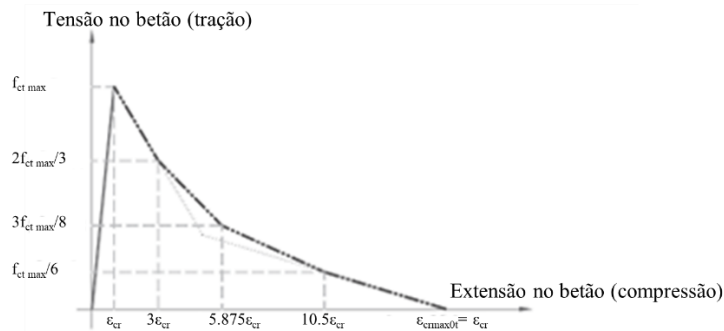


Figura 4.5 - Relação tensão-extensão para o betão sujeito à tração
(Adaptado de Allam *et al.*, 2013)

A perda das propriedades resistentes do betão resultantes da fissuração é representada através do parâmetro de deterioração para o betão sujeito à compressão (d_c) e à tração (d_t), determinado de acordo com Hafezolghorani *et al.* (2017) e é dado pelas equações 4.6 e 4.7. As propriedades σ_{cu} e σ_{t0} correspondem à tensão média de rotura à compressão (f_{cm}) e à tração (f_{ctm}) do betão, respetivamente, definidas de acordo com a NP EN 1992-1-1 (2010) (EC2).

$$\text{Compressão} \quad d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{cu}} \quad (4.6)$$

$$\text{Tração} \quad d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{\sigma_{t0}} \quad (4.7)$$

Quadro 4.2 - Propriedades do betão consideradas na definição do FEM

		Referência	Simbologia	Valor
Propriedades elásticas	Módulo de elasticidade [MPa]	NP EN 1992-1-1 (2010) (EC2)	E_{cm}	34077
	Tensão de rotura à compressão [MPa]		f_{cm}	43
	Tensão de rotura à tração [MPa]		f_{ctm}	3,2
	Coefficiente de <i>Poisson</i> [-]		ν	0,2
Propriedades plásticas - <i>Concrete damage plasticity</i>	Ângulo de dilatação [°]	Hafezolghorani <i>et al.</i> (2017)	-	31
	Excentricidade [-]		-	0,1
	fbo/fco [-]		-	1,16
	k [-]		-	0,667
	Parâmetro de viscosidade [-]		-	0,001

A ferramenta “*damage plasticity model*” requer a definição da extensão inelástica. Este conceito encontra-se descrito em Hafezolghorani *et al.* (2017). A extensão inelástica é dada pela equação 4.8. Na expressão, E_0 corresponde ao módulo de elasticidade secante do betão (E_{cm}), retirado da NP EN 1992-1-1 (2010) (EC2).

$$\varepsilon_c^{in,h} = \varepsilon_c - \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (4.8)$$

No Quadro 4.3 está descrito o diagrama tensão-extensão utilizado para o betão sujeito à compressão e no Quadro 4.4 está descrito o comportamento à tração do betão.

Quadro 4.3 - Relação tensão-extensão (compressão)

Relação tensão - extensão (compressão)							
ε_c [%]	σ_c [MPa]	Extensão inelástica ($\varepsilon_c^{in,h}$) [%]	Parâmetro de dano	ε_c [%]	σ_c [MPa]	Extensão inelástica ($\varepsilon_c^{in,h}$) [%]	Parâmetro de dano
0,000535	17,2	0,000000	0,00000	0,002235	43,0	0,000973	0,00000
0,000635	20,0	0,000048	0,00000	0,002335	42,9	0,001075	0,00165
0,000735	22,7	0,000070	0,00000	0,002435	42,7	0,001183	0,00784
0,000835	25,1	0,000097	0,00000	0,002535	42,2	0,001297	0,01874
0,000935	27,5	0,000128	0,00000	0,002635	41,5	0,001417	0,03443
0,001035	29,7	0,000164	0,00000	0,002735	40,6	0,001543	0,05500
0,001135	31,7	0,000204	0,00000	0,002835	39,5	0,001675	0,08057
0,001235	33,6	0,000249	0,00000	0,002935	38,2	0,001813	0,11122
0,001335	35,3	0,000299	0,00000	0,003035	36,7	0,001959	0,14706
0,001435	36,9	0,000353	0,00000	0,003135	34,9	0,002111	0,18821
0,001535	38,2	0,000413	0,00000	0,003235	32,9	0,002269	0,23477
0,001635	39,5	0,000477	0,00000	0,003335	30,7	0,002435	0,28685
0,001735	40,5	0,000546	0,00000	0,003435	28,2	0,002608	0,34457
0,001835	41,4	0,000621	0,00000	0,003535	25,5	0,002788	0,40806
0,001935	42,1	0,000701	0,00000	0,003635	22,5	0,002976	0,47744
0,002035	42,6	0,000786	0,00000	0,003735	19,2	0,003171	0,55282
0,002135	42,9	0,000877	0,00000	0,003835	15,7	0,003374	0,63436

Quadro 4.4 - Relação tensão-extensão (tração)

Tensão	Extensão total	Extensão de fissuração	Parâmetro de dano
3,200	9,39046E-05	0,000000	0,000000
2,133	0,000281714	0,000219	0,333333
1,200	0,000551689	0,000516	0,625000
0,533	0,000985998	0,000970	0,833333

4.2.3. Condições de apoio, interação entre materiais e carregamento

De modo a simular a configuração experimental, foram definidos dois tipos de condições de apoio: a) condições de apoio de simetria ($U_1=UR_2=UR_3=0$); b) condições de apoio ao exterior ($U_1=U_2=U_3=UR_1=UR_2=UR_3=0$). Na Figura 4.6 é possível identificar os planos que sofreram bloqueio exterior de translação, U , e rotação UR .

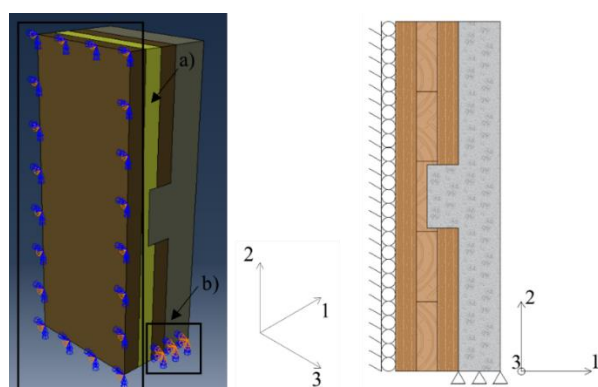


Figura 4.6 - Condições de apoio do FEM (exemplo para MiP45)

A interação entre a madeira e o betão foi definida para as componentes normal e tangencial através das ferramentas “*normal contact*” e “*tangential contact*”, respetivamente. O Quadro 4.5 resume as interações existentes. Foram definidos dois “*constraints*” do tipo “*tie*” e aplicados nas interfaces entre as lamelas, de modo a simular o efeito da cola.

Quadro 4.5 - Interação madeira-betão

Material 1	Material 2	Tipo	“ <i>Tangential behaviour</i> ”		“ <i>Normal behaviour</i> ”
			Tipo	Coefficiente de atrito	Tipo
Betão	Madeira	<i>Contact</i>	<i>Penalty</i>	0,57	<i>Hard Contact</i>

O procedimento de carga seguiu as indicações da EN 26891 (1991). Na primeira fase foi aplicada uma carga pontual na superfície superior do CLT, através da opção “*concentrated force*”. Esta carga, aplicada diretamente no centro desta superfície, foi distribuída para toda a área superior da madeira através de um “*constraint*” do tipo “*coupling*”, simulando o efeito da chapa utilizada no ensaio experimental com a mesma função. Uma vez atingida 70% da carga estimada, foi aplicado um deslocamento de 15 mm no mesmo ponto de aplicação da carga.

4.3. Resultados

O objetivo da simulação numérica é a aquisição de informação relativa à capacidade de carga, módulo de deslizamento da ligação e o respetivo gráfico força vs deslizamento.

O Quadro 4.6 apresenta os resultados obtidos para as propriedades mecânicas da ligação na componente analítica, experimental e numérica e estabelece a relação entre eles. Para tal, foram recolhidos os valores de deslizamento relativo entre a madeira e o betão a meia altura dos provetes, no ponto onde os transdutores de deslocamento estavam posicionados. A carga aplicada foi medida no seu ponto de aplicação, no centro geométrico da superfície superior do elemento de madeira.

Quadro 4.6 - Comparação dos resultados

Provete	Capacidade de carga [kN]			Módulo de deslizamento [kN/mm]		
	Valor experimental	Simulação numérica	Erro relativo (%) Exp/FE	Valor experimental	Simulação numérica	Erro relativo (%) Exp/FE
MrP20	141	151	7%	376	261	-31%
MiP20	117	136	16%	303	260	-14%
MiP45	109	162	49%	253	149	-41%

Capacidade de carga

Os resultados recolhidos do modelo relativamente à capacidade de carga apresentam uma sobrestimativa dos valores reais. O Quadro 4.6 apresenta o erro relativo dos resultados da simulação face aos resultados experimentais. Do modelo resultaram sempre valores de capacidade de carga superiores à real, sendo que a configuração MrP20, é a que apresenta resultados mais próximos da realidade.

Módulo de deslizamento

Relativamente ao módulo de deslizamento da ligação, o modelo apresentou sempre uma subestimativa dos resultados experimentais, apresentando os melhores resultados para a configuração MiP20. Para a validação deste modelo, é importante referir que esta é uma propriedade que apresenta elevada variabilidade experimental, pelo que o erro relativo é calculado relativamente a uma média de valores com grande dispersão.

A Figura 4.7, a Figura 4.8 e a Figura 4.9 apresentam a comparação entre as curvas força vs deslizamento resultantes dos resultados experimentais (EXP) e do Modelo de Elementos Finitos (FEM) para as configurações experimentais analisadas. A figura contém informação relativamente a todo o procedimento de carga e o pormenor do período onde é possível calcular o módulo de deslizamento.

Na Figura 4.7 é perceptível a semelhança entre a curva experimental e a curva resultante da simulação numérica para a configuração MrP20, no período 0 a 2 mm. A curva simula o comportamento dúctil da ligação, no entanto não sofre o decréscimo da capacidade entre os 2 e 4 mm, referente ao esmagamento da madeira, verificado experimentalmente. No FEM, este decréscimo de capacidade de carga ocorreu entre os 12 e os 14 mm, possivelmente devido à sobrestimativa das capacidades resistentes da madeira (no modelo foi considerada a tensão de cedência de uma madeira com classe de resistência C24, enquanto que na fase experimental foram utilizadas lamelas de classe de resistência igual ou superior a C18). Adicionalmente, a Figura 4.7 apresenta um pormenor da curva força vs deslizamento no período 0 a 0,3 mm, período onde foi determinado o módulo de deslizamento da ligação.

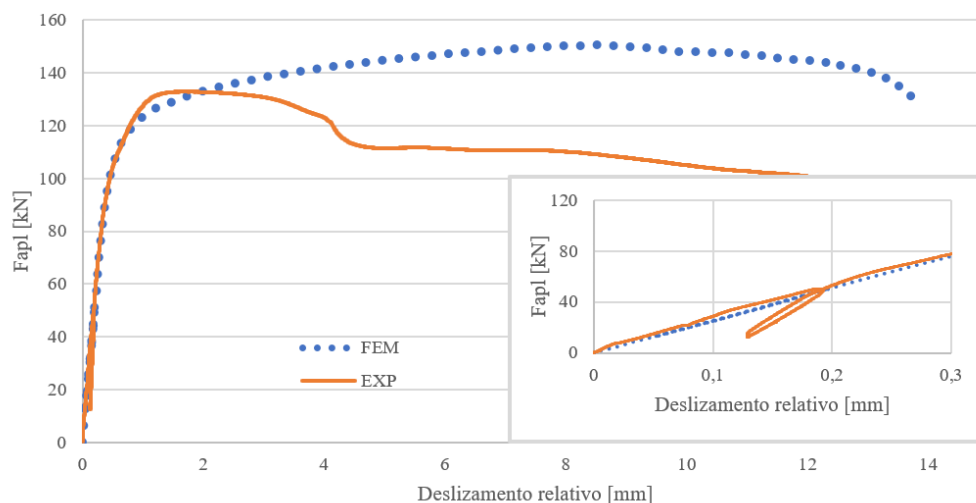


Figura 4.7 - Curva força vs deslizamento provetes MrP20

A curva força vs deslizamento, resultante do FEM, referente à série MiP20 (Figura 4.8) apresenta um comportamento semelhante ao comportamento experimental entre os 0 e 1 mm, onde ocorre a rotura do provete experimental. A partir desse ponto, as duas curvas tomam valores completamente distintos. Para esta configuração, a rotura experimental ocorreu no elemento de betão, devido ao corte na interface (rotura entre os 0 e 2 mm). Por outro lado, o FEM não detetou a rotura nesta fase, tendo apenas sido verificado o início da rotura por esmagamento na madeira entre os 8 e os 10 mm. Adicionalmente, a Figura 4.8 apresenta um

pormenor da curva força vs deslizamento no período 0 a 0,3 mm, período onde foi determinado o módulo de deslizamento da ligação. Para esta configuração, as duas curvas encontram-se praticamente sobrepostas.

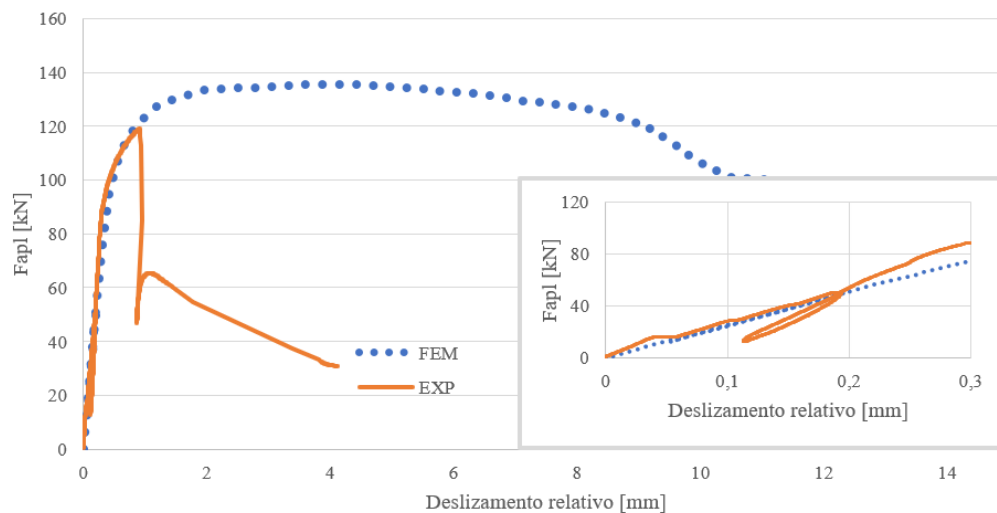


Figura 4.8 - Curva força vs deslizamento provetes MiP20

O modelo referente à série MiP45 apresenta uma boa aproximação da curva força vs deslizamento (Figura 4.9) até a um deslizamento relativo de aproximadamente 1 mm. Tal como na configuração MiP20, no FEM não ocorreu a rotura por corte no betão, tendo ocorrido rotura por esmagamento da madeira.

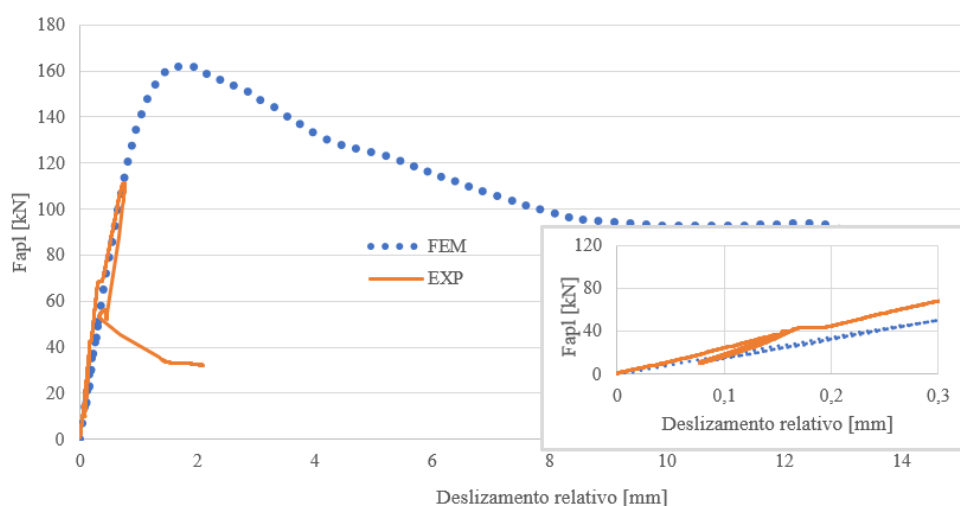


Figura 4.9 - Curva força vs deslizamento provetes MiP45

A Figura 4.10 apresenta a distribuição de tensões de compressão nos FEM, para as várias configurações. Em todos os casos, a tensão máxima na região do entalhe corresponde aproximadamente ao valor da resistência à compressão da madeira (Classe de resistência C24, 21 MPa), fazendo prever que nesta zona ocorreu a plastificação do elemento de madeira.

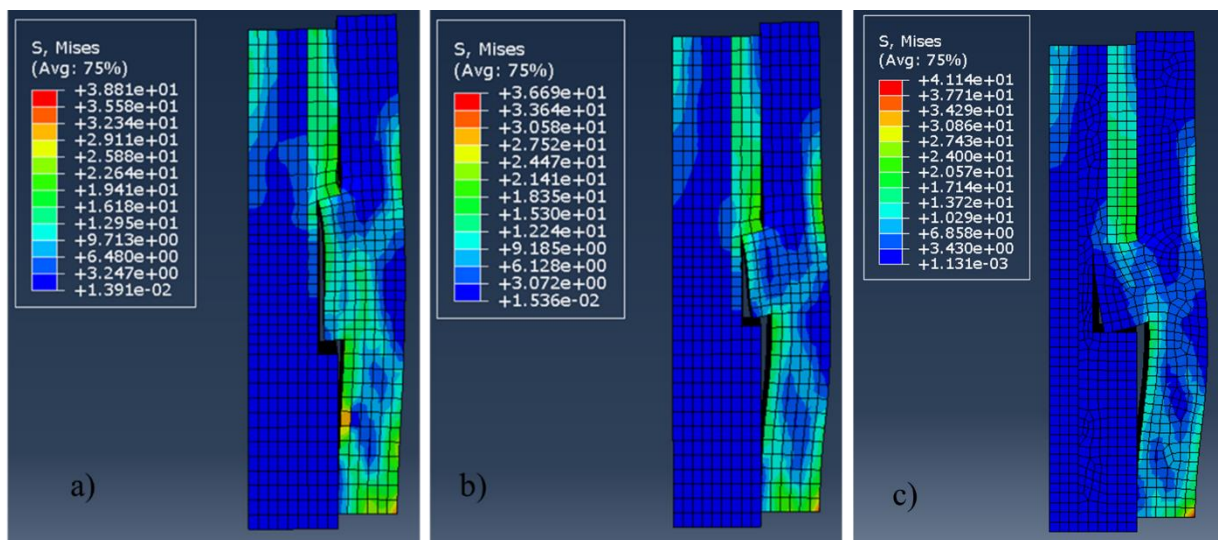


Figura 4.10 - Distribuição de tensões no modelo: a) MrP20; b) MiP20; c) MiP45

A distribuição de tensões no elemento de betão indica que não ocorreu plastificação do material na região do entalhe. Na figura é possível verificar que o elemento de betão sofreu um deslocamento ortogonal ao deslocamento imposto, na região do entalhe, o que não se verificou na fase experimental, devido à presença do ligador metálico. Este deslocamento pode ter provocado uma diminuição de tensões nesta região, retardando a rotura do material.

A simulação do ligador metálico poderá trazer vantagens ao invés do referido no início do presente capítulo. Adicionalmente, e como alternativa ao ligador metálico, poderia ter sido definida uma condição de apoio lateral no elemento de betão, com o intuito de bloquear o destacamento entre os materiais, simulando o corte, puro, na interface madeira-betão (Figura 4.11).

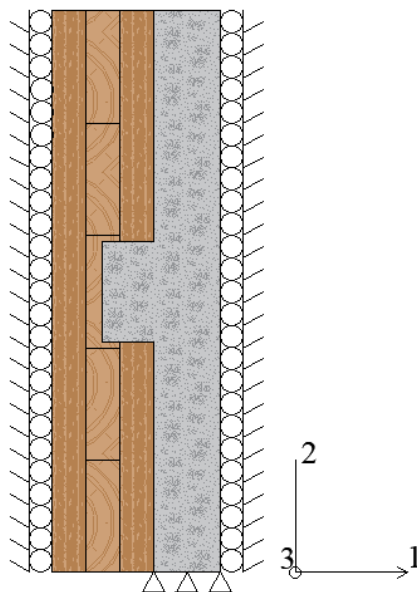


Figura 4.11 - Proposta de alteração das condições de apoio do FEM

Com base na informação disponibilizada por outros autores, recolhida no subcapítulo 2.5, foi estabelecida uma comparação entre o erro relativo do FEM desenvolvido e dos resultados presentes no respetivo subcapítulo. Apenas Monteiro *et al.* (2013) e Bedon e Fragiacomio (2017) disponibilizaram ambos os valores relativos aos resultados experimentais e numéricos, que permitiram estabelecer um erro relativo médio para cada um dos documentos. O Quadro 4.7 apresenta uma síntese do erro relativo obtido nas simulações analisadas. Relativamente à reduzida amostra disponível, o FEM desenvolvido nesta dissertação apresenta valores distantes da precisão obtida pelas restantes simulações, apresentando, no entanto, melhores valores relativos ao módulo de deslizamento do que Bedon e Fragiacomio (2017).

Quadro 4.7 - Precisão do modelo vs precisão de outros exemplos

Provete	Capacidade de carga [kN]	Módulo de deslizamento [kN/mm]
	Erro relativo (%) Exp/FE	Erro relativo (%) Exp/FE
MrP20	7%	-31%
MiP20	16%	-14%
MiP45	49%	-41%
(Monteiro <i>et al.</i> , 2013)	-	-5%
(Bedon & Fragiacomio, 2017)	-1%	114%

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusões

Esta dissertação teve como objetivo a avaliação do comportamento experimental e a simulação numérica de cinco configurações de ligações mistas madeira-betão com entalhe. Neste capítulo são estabelecidas conclusões relativas às condições de ensaio utilizadas, à precisão da previsão analítica da capacidade de carga e do módulo de deslizamento, segundo a TS 19103 (CEN 2021), às propriedades mecânicas de cada uma das configurações e respetiva eficiência estrutural e à validade do FEM desenvolvido.

A configuração de ensaio definida, ensaio de corte estático simétrico, apresenta algumas limitações na captação dos resultados experimentais. Nas configurações onde ocorreu rotura brusca devida ao corte do betão de um dos planos, surgiram excentricidades nos provetes que colocaram em causa a validade dos resultados captados, a partir desse momento, para o segundo plano de corte. Tal não se verificou para a configuração MrP20, devido ao seu comportamento dúctil.

Os valores analíticos determinados através da (TS 19103, CEN 2021) apresentaram valores inferiores aos obtidos experimentalmente para a capacidade de carga da ligação exceto para o provete MiI45. Relativamente ao módulo de deslizamento da ligação, a Especificação técnica obteve estimativas inferiores aos resultados experimentais para entalhes com 20 mm de profundidade e estimativas superiores aos resultados experimentais para entalhes com 45 mm de profundidade.

A configuração MrP20 foi a que apresentou melhor desempenho estrutural, apresentando maior capacidade de carga e maior módulo de deslizamento do que as restantes. Esta solução, com um entalhe de 150 mm de comprimento, provou ser a mais vantajosa, sendo adicionalmente a única que apresentou um comportamento dúctil na rotura, como desejável numa estrutura corrente. Nas configurações ensaiadas, para entalhes de 150 mm de comprimento ocorreu sempre a rotura no elemento de madeira enquanto nas de 90 mm a rotura ocorreu no elemento de betão. O comprimento do entalhe provou ser uma característica determinante para a capacidade de carga, módulo de deslizamento e modo de rotura da ligação. Ademais, o aumento

da profundidade do entalhe não provocou um aumento na capacidade de carga nem o módulo de deslizamento da ligação. Os entalhes inclinados, apesar de dispensarem o uso do ligador metálico, revelaram-se de mais demorada execução, não trazendo vantagens evidentes, relativas à capacidade estrutural da ligação.

A curva força vs deslizamento obtida da simulação numérico desenvolvida adaptou-se bem à configuração onde ocorre rotura no elemento de madeira, mas não captou a rotura do elemento de betão. Nesta dissertação foi proposta a definição de um modelo com ligador metálico ou com uma condição de apoio alternativa (apresentada no subcapítulo 4.3) que provocaria uma redistribuição das tensões no elemento de betão.

5.2. Trabalhos futuros

No seguimento do trabalho desenvolvido nesta dissertação, sugerem-se os seguintes trabalhos futuros:

- Estudo da influência do ligador metálico e da malha soldada nas propriedades mecânicas da ligação. Sugere-se o desenvolvimento de uma configuração com entalhe inclinado de 150 mm de comprimento;
- Avaliação do comportamento mecânico da configuração MrP20 utilizando betão pré-fabricado de modo a minimizar o tempo de aplicação da solução mista *in-situ* e maximizando assim, o controlo das propriedades do betão. A ligação entre o CLT e o betão é estabelecida *in-situ* através de argamassa/ *grout* colocada no entalhe;
- Melhoria do comportamento do FEM, de modo a captar o modo de rotura presente. Uma vez desenvolvido, proceder a um estudo paramétrico para avaliação do comportamento mecânico de entalhes com comprimentos intermédios entre 150 e 90 mm. Adicionalmente, avaliar a influência da presença de um ligador metálico e da configuração de apoio exterior alternativa proposta neste documento;
- Avaliação experimental e simulação numérica de elementos do tipo viga com as configurações analisadas, com foco na configuração MrP20.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allam, M., Shoukry, S., Rashad, E. e Hassan, S. (2013). “Evaluation of tension stiffening effect on the crack width calculation of flexural RC members”. Alexandria Engineering Journal, Vol. 52, Issue 2, pp. 163–173.
- Arch Daily. (2022). “Quais materiais da construção civil são ecológicos?”. <https://www.archdaily.com.br/br/981015/materiais-ecologicos> - Consultado em 06/02/2023.
- Bedon, C. e Fragiacom, M. (2017). “Three-dimensional modelling of notched connections for timber-concrete composite beams”. Structural Engineering International, Vol. 27, Issue 2, pp. 184–196.
- Carvalho, E. e Carrasco, E. (2010). “Influence of test specimen on experimental characterization of timber-concrete composite joints”. Construction and Building Materials, Vol. 24, Issue 8, pp. 1313–1322.
- Ceccotti, A. (1995). “Timber-concrete composite structures” – Timber engineering STEP 2: design - details and structural systems. Lecture 13. Centrum Hout.
- Ceccotti, A. (2002). “Composite concrete-timber structures”. Progress in Structural Engineering and Materials, Vol. 4, Issue 3, pp. 264–275.
- Comité Européen de Normalização (1991). “EN 26891 - Timber structures - Joints made with mechanical fasteners - General principles for the determination of strength and deformation characteristics”. European Committee for Standardization, Bruxelas.
- Comité Européen de Normalização (1992). “NP EN 1992-1-1: Eurocódigo 2: Projeto de estruturas de betão”. European Committee for Standardization, Bruxelas.
- Comité Européen de Normalização (2003). “EN 338 - Structural timber - Strength classes”. European Committee for Standardization, Bruxelas.
- Comité Européen de Normalização (2004). “EN 1995-1-1: Eurocode 5: Design of timber structures”. European Committee for Standardization, Bruxelas.

- Comité Européen de Normalização (2021). “TS 19103: Eurocode 5: Design of Timber Structures-Structural design of timber-concrete composite structures-Common rules and rules for buildings”. European Committee for Standardization, Bruxelas.
- Dias, A. (2005). “Mechanical behaviour of timber-concrete joints”. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Portugal e Delft University of Technology, Países Baixos, 1 vol..
- Dias, A. (2006). “Pavimentos Mistos Madeira-Betão”. Pedro & Cal, Vol. 29.
- Dias, A., Van de Kuilen, J., Lopes, S. e Cruz, H. (2007). “A non-linear 3D FEM model to simulate timber-concrete joints”. *Advances in Engineering Software*, Vol. 38, Issue 8, pp. 522–530.
- Endesa Portugal. (2019). “Construção sustentável: Ambiente e eficiência assumem dianteira”. <https://sincpods.pt/2021/12/19/construcao-sustentavel-ambiente-e-eficiencia-assumem-dianteira/> - Consultado em 06/02/2023.
- Hafezolzghorani, M., Hejazi, F., Vaghei, R., Jaafar, M. e Karimzade, K. (2017). “Simplified damage plasticity model for concrete”. *Structural Engineering International*, Vol. 27, Issue 1, pp. 68–78.
- Holschemacher, K., Klug, Y. e Weiße, D. (2003). “Application of steel fibre reinforced concrete for the revaluation of timber floors”. *System-based Vision for Strategic and Creative Design*.
- Jiang, Y. e Crocetti, R. (2019). “CLT-concrete composite floors with notched shear connectors”. *Construction and Building Materials*, Vol. 195, pp. 127–139.
- Jorge, L. (2005). “Estruturas mistas madeira-betão com a utilização de betões de agregados leves”. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Portugal, 1 vol..
- Lukaszewska, E. (2009). “Development of Prefabricated Timber-Concrete Composite Floors”. Tese de Doutoramento, Lulea University of Technology, Suécia, 1 vol..
- Martins, C. (2018). “Avaliação Estrutural de Elementos de Madeira Lamelada Colada”. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Portugal, 1 vol..
- Monteiro, S. (2009). “Avaliação Experimental e Numérica do Comportamento Mecânico de Ligações Madeira-Betão Entalhadas”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Portugal, 1 vol..

- Monteiro, S., Dias, A., e Negrão, J. (2013). “Assessment of timber-concrete connections made with glued notches: Test set-up and numerical modeling”. *Experimental Techniques*, Vol. 37, Issue 2, pp. 50–65.
- ONU News. (2022). “Emissões de CO2 na área de construção civil atingem novo recorde”. <https://news.un.org/pt/story/2022/11/1805122/> - Consultado em 06/02/2023.
- Ouch, V., Heng, P., Huy Nguyen, Q., Somja, H., Soquet, T. e Soquet, T. (2021). “A notched connection for CLT-concrete composite slabs resisting to uplift without metallic connectors: experimental investigation”.
- Rodrigues, J., Dias, A. e Providência, P. (2013). “Timber-concrete composite bridges: State-of-the-art Review”. *BioResources*, Vol. 8, Issue 4, pp. 6630–6649.
- Rodrigues, J. (2014). “Pontes com Estrutura Mista Madeira-Betão e seu Potencial de Aplicação”. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Portugal, 1 vol..
- Siddika, A., Mamun, M., Aslani, F., Zhuge, Y., Alyousef, R. e Hajimohammadi, A. (2021). “Cross-laminated timber–concrete composite structural floor system: A state-of-the-art Review”. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 130.
- Van Thai, M., Ménard, S., Elachachi, S. e Galimard, P. (2020). “Performance of Notched Connectors for CLT-Concrete Composite Floors”. *Buildings*, Vol. 10, Issue 7.
- Van Thai, M., Galimard, P., Elachachi, S. e Ménard, S. (2022). “Multi-objective optimization of cross laminated timber-concrete composite floor using NSGA-II”. *Journal of Building Engineering*, Vol. 52.
- Yeoh, D., Chuan, E., Fragiaco, M., Aldi, P., Mazzilli, M. e Kuhlmann, U. (2008). “Performance of Notched Coach Screw Connection for Timber-Concrete Composite Floor System”. *NZ Timber Design Journal*, Vol. 17, Issue 1.
- Yeoh, D., Fragiaco, M., De Franceschi, M. e Heng Boon, K. (2011). “State of the Art on Timber-Concrete Composite Structures: Literature Review”. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 137, Issue 10, pp. 1085–1095.