

Nós de betão armado para pórticos de estruturas de madeira – Estudo numérico e computacional

Reinforced concrete joints for timber frames structures –
Numerical and computational analysis

Aléxia Ribeiro
João Negrão
Alfredo Dias

Resumo

A utilização de betão armado para a realização dos nós resistentes a momentos em estruturas de madeira é uma solução com grande potencial de aplicação e surpreendentemente pouco explorada. Em trabalhos anteriores dos autores, foram produzidos e ensaiados protótipos deste tipo de ligação com resultados promissores. Presentemente, está em curso um estudo alargado, visando a caracterização mais sistemática deste tipo de ligação e a identificação das suas potencialidades e limitações. Numa primeira fase, são desenvolvidos modelos de elementos finitos, começa-se com um modelo bidimensional isotrópico linear e os modelos são sucessivamente aperfeiçoados pela introdução de alterações que os aproximam do comportamento real, como a consideração da ortotropia da madeira, análise geometricamente não-linear e tridimensional. Os resultados destinam-se a comparação com os proporcionados por modelos simples baseados nas habituais hipóteses da Resistência de Materiais e também com resultados experimentais que serão obtidos em campanhas de ensaios a realizar futuramente.

Abstract

The application of reinforced concrete for moment resistant connections in timber structures is a solution with great potential for application and surprisingly little explored. In previous works by the authors, prototypes of this type of connection were produced and tested with promising results. Currently, an extensive study is underway, aiming at the more systematic characterization of this type of connection and the identification of its potentialities and limitations. In the first phase, finite element models are developed, starting with a two-dimensional linear isotropic model and the models are successively improved by the introduction of changes that bring them closer to the real behavior, such as the consideration of wood orthotropy, geometrically non-linear analysis and three-dimensional model. The results are compared to those provided by simple models based on the usual hypotheses of the Strength of Materials and prepared to be compared with experimental results that will be obtained in test campaigns to be carried out in a near future.

Palavras-chave: Nós de pórtico / Madeira-betão armado / Varões colados / Análise em elementos finitos

Keywords: Frame joint / Timber-reinforced concrete / Glued in rod / Finite element analysis

Aléxia Ribeiro

Universidade de Coimbra
ISISE
Portugal
alexia.ribeiro@student.dec.uc.pt

João Negrão

Universidade de Coimbra
Portugal
jhnegrão@dec.uc.pt

Alfredo Dias

Universidade de Coimbra
ISISE
Portugal
alfgdias@dec.uc.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

RIBEIRO, A. [et al.] – Nós de betão armado para pórticos de estruturas de madeira – Estudo numérico e computacional. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III, n.º 13. ISSN 2183-8488. (julho 2020) 17-24.

1 Introdução

O dimensionamento das conexões entre os elementos estruturais nas estruturas de madeira é uma das principais preocupações dos projetistas [1]. A conexão de canto, nomeadamente a ligação viga-pilar, é especialmente problemática porque precisa de transmitir tensões de flexão. O método mais comum usado consiste em inserir um grupo de conetores num arranjo poligonal, no qual as forças exercidas pelos conetores contra a madeira circundante realizam o momento de continuidade. Esse tipo de conexão tem o grande inconveniente de ser caro devido a uma alta complexidade de execução que consome tempo e requer mão de obra especializada no local [2]. Além disso, essa complexidade tem o potencial de adicionar material a uma estrutura simplesmente para acomodar as conexões [1].

Negrão *et al.* (2016) [3] propuseram uma conexão híbrida usando uma prótese de betão reforçada com varões de aço (barras nervuradas) colados na coluna e na viga com cola epoxídica. A principal vantagem desse tipo de conexão é o baixo custo, porque os materiais envolvidos são comuns e geralmente estão disponíveis nos estaleiros de obras. Outra vantagem deste método é evitar a solicitação da madeira na direção perpendicular em ambos os membros da ligação.

No presente estudo, é apresentada uma análise geral do comportamento mecânico desse tipo de junta por meio da modelação em elementos finitos, utilizando o software comercial ABAQUS® [4].

2 Considerações iniciais

Os materiais componentes desta ligação são a madeira, o aço, o betão e a cola epoxídica, materiais estes disponíveis numa grande variedade com diferentes propriedades. Para esse estudo, procurou-se escolher os mais usuais e adequados para a aplicação no nó de canto.

Nesse sentido, considerou-se o aço A 400 NR, o betão da classe 80/95 [5] e uma madeira folhosa da classe resistente D40 [6], com as propriedades de rigidez, módulo de elasticidade média (E) e coeficiente de Poisson (ν), indicadas na Tabela 1.

Tabela 1 Propriedades dos materiais

	E (MPa)	ν
Aço	210 000,00	0,30
Madeira	13 000,00	0,40
Betão	42 000,00	0,18

Note-se que, neste primeiro momento, todos foram considerados como materiais isotrópicos, e que, no caso da madeira, esta foi apenas uma simplificação para os modelos iniciais, a alterar posteriormente nos mais complexos (Tabela 3).

A geometria do pórtico, e consequentemente da ligação (Figura 1), foi definida a partir da análise de secções transversais disponíveis

no mercado e que atendessem a um vão livre de cerca de 10 m. Definida a secção, a quantidade de aço, comprimento de ancoragem (300 mm) e espaçamentos (36 mm) foram definidos respeitando o articulado da norma [7] e de trabalhos desenvolvidos anteriormente [3,8] sobre o nó de betão armado.

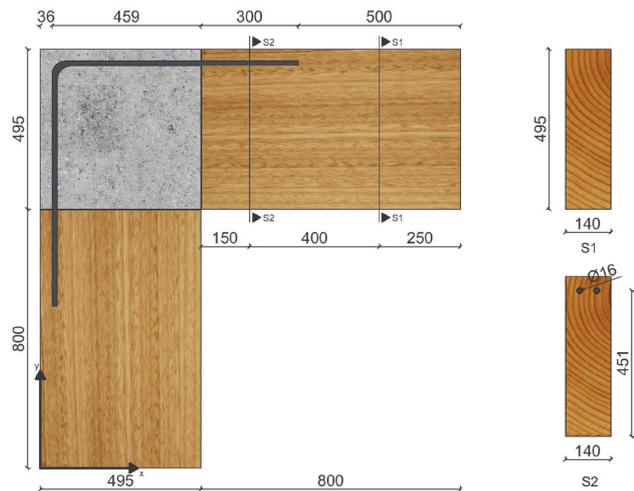


Figura 1 Geometria (dimensões em mm)

Com o objetivo de estudar o comportamento das tensões e deformações na condição mais importante para a ligação de um conjunto viga-pilar de madeira, o foco foi colocado na flexão. Adicionalmente, e para excluir, numa primeira fase, a interação momento-esforço transverso, o carregamento foi pensado de forma a produzir um estado de flexão pura. Considerou-se, então, um momento aplicado de 30 kN.m na extremidade da estrutura.

Esse tipo de carregamento, em especial, irá provocar um momento constante e puro ao longo dos dois elementos da estrutura, ou seja, com a ausência de força cortante e forças normais (Figura 2).

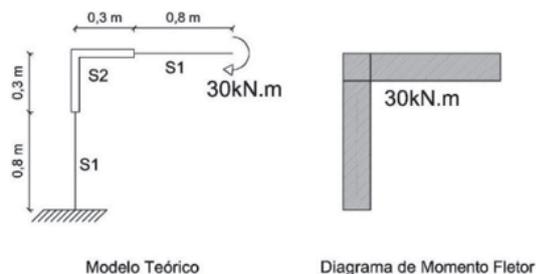


Figura 2 Modelo teórico e diagrama de esforços

Como base de comparação apresenta-se o estudo dos esforços e tensões de acordo com as hipóteses da Análise Linear e das Secções Planas.

Na Figura 2 são identificadas as secções e suas localizações, onde S1 é a secção transversal retangular puramente de madeira, e S2 é a secção composta de madeira e varões de aço. Para S2, utiliza-se o método das secções transformadas, também conhecido como teoria da homogeneização, transforma-se a área de aço em uma área de madeira equivalente e calcula-se o 2.º momento de área

da secção (momento de inércia) homogeneizada. Com tensão normal definida pela equação $\sigma = \frac{My}{I}$, chega-se às distribuições das tensões normais ao longo da secção transversal (Figura 3). Aqui considera-se a não contribuição da madeira na parte tracionada devido à descontinuidade (Figura 4).

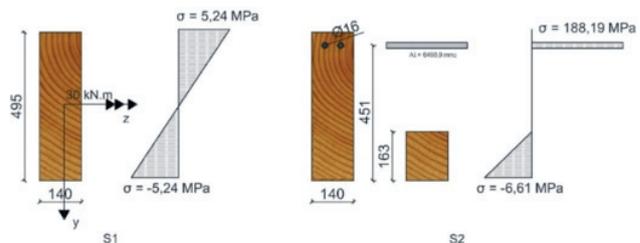


Figura 3 Distribuição de tensões na secção transversal S1 e S2

3 Modelação em elementos finitos

A modelação em elementos finitos foi realizada através do software comercial ABAQUS® [4], dividida em duas partes principais: um modelo 2D e um 3D, e tem o objetivo de analisar o comportamento mecânico da ligação e a adequação do modelo computacional ao comportamento teórico apresentado anteriormente.

Ao todo, foram analisados 8 modelos entre bidimensional e tridimensional, isotrópico e com consideração de ortotropia da madeira, linear e com consideração de não linearidade geométrica. As combinações dessas considerações e referência do modelo usado para cada uma delas encontra-se na Tabela 2. A seu tempo, deverão ainda ser analisados modelos com não-linearidade material, que é fundamental para a análise de estado limite último.

Tabela 2 Modelos em elementos finitos

Modelo	Dimensão	Descrição
1-1-1	Bidimensional	isotrópico, linear
1-1-2	Bidimensional	isotrópico, não linearidade geométrica (NLG)
1-2-1	Bidimensional	ortotropia na madeira, linear
1-2-2	Bidimensional	ortotropia na madeira, não linearidade geométrica (NLG)
2-1-1	Tridimensional	isotrópico, linear
2-1-2	Tridimensional	isotrópico, não linearidade geométrica (NLG)
2-2-1	Tridimensional	ortotropia na madeira, linear
2-2-2	Tridimensional	ortotropia na madeira, não linearidade geométrica (NLG)

Para os modelos, foi considerada uma malha de elementos finitos contínua, sem a utilização de elementos de contacto na interface dos

materiais. Este modelo corresponde à admissão de comportamento rígido e de uma espessura pequena do filme de cola, condições que correspondem aproximadamente às reais. A malha foi densificada nas regiões de maior concentração de tensões, como na interface varão-madeira e no vértice interior comprimido do nó, para tentar obter aproximações de boa qualidade da distribuição de tensões e seus valores máximos.

3.1 Ortotropia da madeira

Para modelar-se o comportamento ortotrópico, é necessário definir-se as restantes propriedades de rigidez (Tabela 3).

O módulo de elasticidade perpendicular às fibras (E_{90}) (equação 1) e o módulo de distorção (G_0) (equação 2) foram obtidos a partir das relações facultadas pela norma europeia [6].

$$E_{90,mean} = \frac{E_{0,mean}}{15} \quad \text{para hardwoods ou folhosas} \quad (1)$$

$$G_{mean} = \frac{E_{0,mean}}{16} \quad (2)$$

Tabela 3 Módulos elásticos ortotrópicos da madeira

E_0 (MPa) = E_1	E_{90} (MPa) = $E_2 = E_3$	G_0 (MPa) = $G_{12} = G_{13}$	G_{90} (MPa) = G_{23}	Poisson
13 000	860	800	80	0,4

Vale notar que para o caso de resinosas essa relação é muito diferente ($E_{90,mean} = \frac{E_{0,mean}}{30}$), o que significa dizer que são duas vezes menos rígidas na direção perpendicular em relação à direção paralela do que as folhosas.

Vale ainda salientar que essas constantes podem ser determinadas em laboratório e o modelo numérico posteriormente levará em consideração estas constantes específicas como forma de calibração do modelo.

3.2 Interface madeira-betão

Para simular a separação de materiais na interface madeira-betão e a consequente incapacidade de suportar trações normais, foi criada uma faixa de 2 mm de espessura com o material madeira nas interfaces de ambos os membros: coluna e viga. Utilizando-se um processo iterativo, fez-se a remoção progressiva dos elementos onde ocorre tração até o modelo convergir e restarem apenas elementos de interface sujeitos a compressão, representado na Figura 4, com muito exagero de escala. Após cinco iterações verificou-se que a linha neutra numérica é aproximadamente a mesma calculada pelo método das secções transformadas (Figura 3).



Figura 4 Remoção dos elementos tracionados na interface madeira-betão, sem escala

3.3 Carregamento

O carregamento foi aplicado, como uma distribuição linear e antissimétrica de pressões na secção extrema do elemento horizontal de madeira, de tração na metade superior e compressão na metade inferior da secção transversal (Figura 5), sendo a respetiva resultante um momento negativo de 30 kN.m.

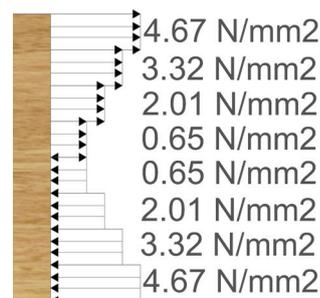


Figura 5 Carregamento

3.4 Correção do módulo de elasticidade – Modelo 2D

Primeiramente foi feita a modelação em 2D, para isso, considerou-se uma membrana plana em estado plano de tensão de 140 mm de espessura (matematicamente, esta dimensão não é reconhecida como espessa). Desta forma, foi necessário fazer a correção do módulo de elasticidade do reforço de modo a compensar a área em excesso considerada uma vez que, pela natureza do modelo, a armadura será igualmente representada como uma tira de espessura igual à da membrana (Figura 6). Assim, de forma a respeitar a relação $E_r A_r = E_m A_m$, onde os índices r e m se referem ao protótipo real e ao modelo, respetivamente, utilizou-se um módulo de elasticidade reduzido para o aço, igual a 37698 MPa. Pelo mesmo motivo, as tensões no aço, obtidas na análise para o modelo 2D, devem ser corrigidas, multiplicando-se por $E_r / E_m = 5,57$, para correta interpretação dos resultados. No modelo 3D o varão foi modelado como um elemento sólido e sua geometria circular considerada.

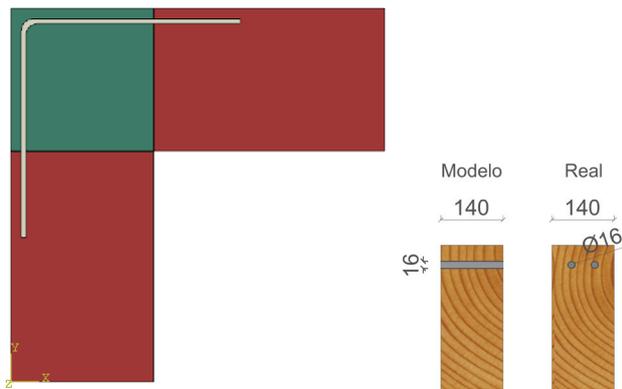


Figura 6 Modelo 2D e correção do módulo de elasticidade do aço

3.5 Malha, elementos e convergência

Para o controlo da geração da malha foi utilizado o método de partições (*partitions*) com definições de divisões menores em regiões de interesse (*seed edges*). Utilizaram-se aproximadamente 40 mil elementos em cada um dos modelos. Utilizaram-se para a análise 8 tipos de elementos disponíveis na biblioteca do ABAQUS, quatro elementos para o modelo 2D (CPS4, CPS4R, CPS8 e CPS8R) e quatro para o 3D (C3D8, C3D8R, C3D20 e C3D20R).

Para análise da convergência da malha, aplicou-se o método GCI (Grid Convergence Index), descrito em pormenor em [9]. Para tal, definiram-se 3 modelos, cada qual com uma malha 1,5 vezes mais refinada do que a anterior, em outras palavras, com razão de refinamento igual a 1,5. Como a incerteza calculada entre as malhas foi inferior a 5%, optou-se pela utilização da segunda malha para as análises.

No modelo 3D, para a discretização do varão utilizou-se o método apresentado na Figura 7, inspirado na malha utilizada por Dias (2005) [10].

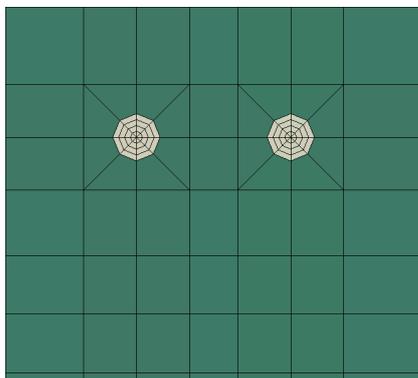


Figura 7 Malha da secção transversal no modelo 3D

A qualidade dos elementos foi verificada (rácio espessura/altura), havendo apenas 3 elementos na parte curva do varão que não cumprem o limite recomendado, mas esse pormenor foi considerado aceitável por não se tratar de uma região crítica para o estudo em questão.

4 Resultados

As Figuras 8 e 9 dão um panorama geral, a primeira da trajetória das tensões e a segunda das distribuições de tensões máximas e mínimas. Adicionalmente, diferenciam-se os resultados entre isotropia e ortotropia, linearidade e não-linearidade geométrica.

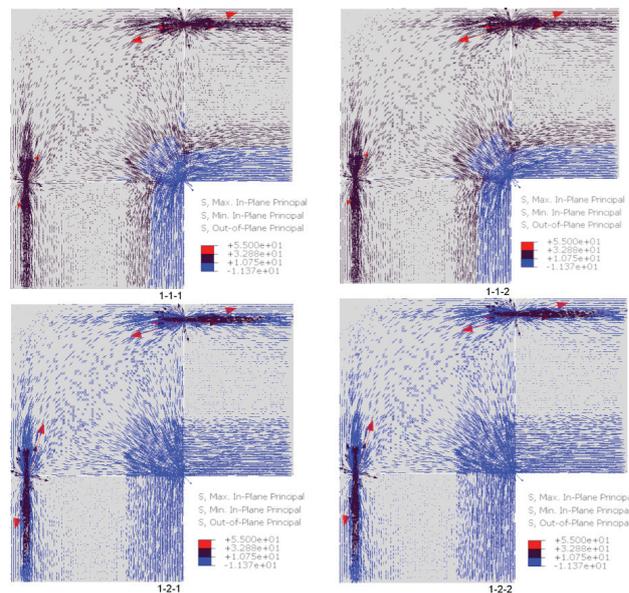


Figura 8 Isostáticas dos máximos principais para os modelos em 2D (1-1-1) isotrópico, linear, (1-1-2) isotrópico, NLG, (1-2-1) ortotrópico, linear e (1-2-2) ortotrópico, NLG

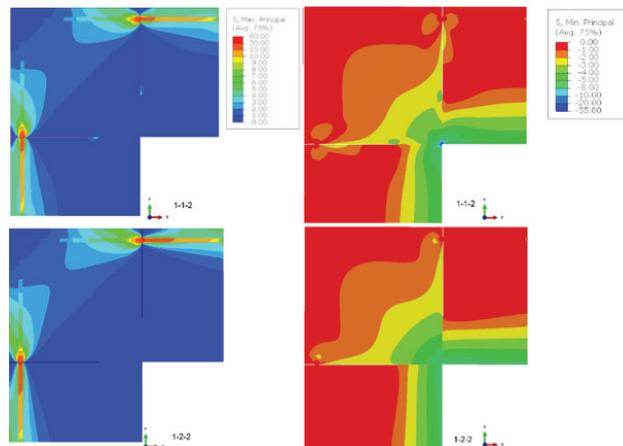


Figura 9 Distribuições de tensões máximas e mínimas (1-1-2) isotrópico, NLG; (1-2-2) ortotrópico, NLG

Pelas distribuições de tensões nota-se que há uma diferença no comportamento das tensões quando se considera a ortotropia da madeira (modelos 1-2-1 e modelo 1-2-2), fazendo com que, de maneira geral, haja menos compressão do que tração e com que as tensões críticas no reforço mudem da região localizada na viga para a região localizada na coluna. Entre os modelos linear e não

linear, não se nota a diferença no comportamento pois trata-se de deslocamentos muito pequenos. Mas no estado limite último já não será assim, tendo em conta os resultados de Negrão *et al.* (2016) [3]. Para trabalhos futuros pretende-se a introdução de leis constitutivas não lineares para os materiais envolvidos e de critérios de rotura para verificação do estado-limite último de resistência.

A Figura 10, apresenta o estudo das distribuições de tensões normais nas secções de referência (S1) e na interface madeira-betão armado (S2) (Figura 1) para cada um dos elementos finitos considerados para o modelo mais simples isotrópico linear (modelos 1-1-1 e 2-1-1 da Tabela 2) e comparados com as habituais hipóteses da Resistência dos Materiais (Figura 3). Adicionalmente, na Figura 11 apresenta-se em detalhe as regiões de compressão e tração na região de interface que é apresentada na Figura 10b.

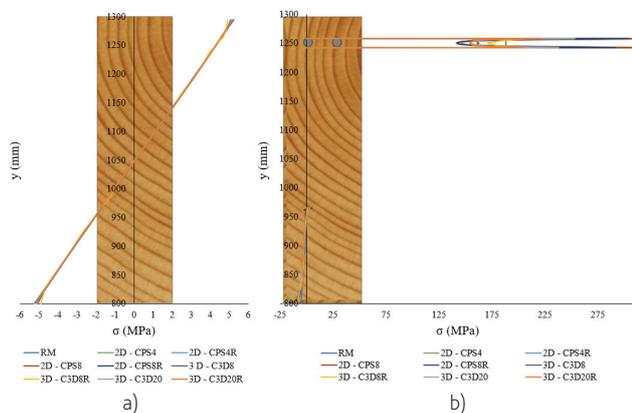


Figura 10 Distribuição das tensões normais nas secções a) S1 e b) interface

Pode-se observar que todos os elementos conseguem descrever bem o comportamento geral do problema, quando comparado com as hipóteses das resistências dos materiais, sendo o elemento 3D com 8 nós e integração reduzida o que apresenta pior comportamento. Na interface as maiores concentrações de tensões foram observadas nas extremidades dos varões e nos elementos CPS4, CPS8 e CPS8R.

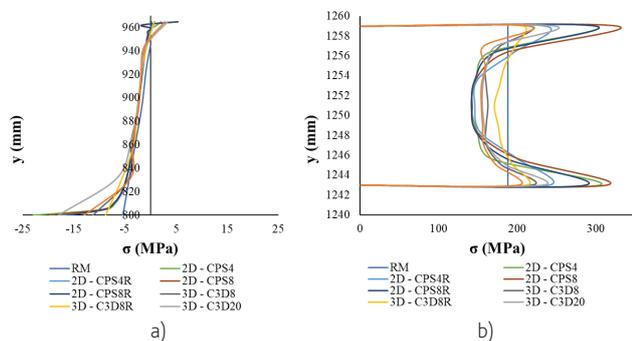


Figura 11 Detalhe das tensões normais na secção interface a) parte inferior em compressão b) parte superior em tração

Na Figura 12 observa-se que a variação de tensão normal, da extremidade do varão até à secção de interface, onde é máxima,

não é linear, indicando que não é uniforme a distribuição de tensões de aderência na interface, como admitem alguns métodos de dimensionamento [7]. Também é patente que a transferência de tensão da madeira para o varão se concentra acentuadamente na proximidade da interface. Outro aspeto a destacar é a diferença nos resultados entre os modelos isotrópicos e ortotrópicos (Figura 12).

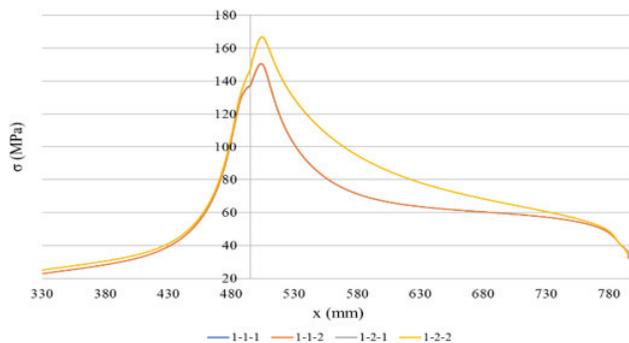


Figura 12 Distribuição de tensões ao longo do varão

5 Conclusões

A consideração da ortotropia da madeira nos modelos faz com que a distribuição de tensões seja modificada consideravelmente, sendo necessária a sua consideração para representar o desempenho geral da ligação. Adicionalmente, para trabalhos futuros pretende-se a inserção de propriedades mais completas para o estudo de estados limites últimos, como, por exemplo, a não linearidade de material e critérios de rotura, fundamental para a comparação com os resultados laboratoriais.

Outro passo importante será a consideração de elementos adicionais na ligação, como, por exemplo, elementos para a transmissão de esforços cortantes e geometrias diferenciadas que facilitem a prefabricação.

Como com a metodologia simplificada de modelação com elementos finitos 2D em estado plano de tensão, conseguem-se resultados suficientemente precisos para o estudo deste tipo de ligação comparando-se com a referência 3D. Estes modelos afiguram-se viáveis para futuras análises com a inserção de características mais complexas do problema, no sentido de conseguirem descrever o campo de tensões com um esforço computacional menor.

Agradecimentos

A investigação que levou a estes resultados recebeu financiamento da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT-Portugal, SFRH / BD / 144968/2019) e apoio do Instituto de Sustentabilidade e Inovação em Engenharia Estrutural (ISISE).

Referências

- [1] Ramage, M.H. *et al.* – "The wood from the trees: The use of timber in construction". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.68, p.333-359, 2017.
- [2] Negrão, J.; Faria, A. – *Projecto de estruturas de madeira*. Publindústria, Porto, 2009.
- [3] Negrão, J. *et al.* – "Numerical and experimental study of small-scale moment-resistant reinforced concrete joints for timber frames". *Construction and Building Materials*, v.118, p.89-103, 2016.
- [4] Abaqus – Users, Theory and Scripting manuals. Providence, RI, USA: Abaqus, Inc., Dassault Systèmes Simulia Corp. 2014.
- [5] European Committee for Standardization – EN 1992-1-1: Eurocode 5: *Design of timber structures – Part 1-1: General common rules and rules for buildings*. Brussels, 2004.
- [6] European Committee For Standardization – EN 338:2003: *Structural Timber - Strength Classes*. Brussels, 2003.
- [7] European Committee for Standardization – ENV 1995-2:1997: *Design of timber structures. Part 2: Bridges*. Brussels, 1997.
- [8] Negrão, J. *et al.* – "Nós de betão armado resistentes a momentos para pórticos de madeira lamelada colada". In: Proceedings: XIV EBRAMEM – *Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira*. Abril, 2014, Natal, RN, Brasil.
- [9] Ribeiro, A.; Mascia, N.T. – Numerical and experimental study of shear stress behavior of NBR and ASTM standard test specimens for FRP-wood bonds. *Composite Structures*, v.224, p. 111066, 2019.
- [10] Dias, A.M.P.G. – *Mechanical behaviour of timber-concrete joints*. Portugal, 2005.

