

## SISTEMAS MISTAS MADEIRA-BETÃO: APLICAÇÃO E DIMENSIONAMENTO

## TIMBER-CONCRETE COMPOSITE SYSTEMS: APPLICATION AND DESIGN

Alfredo M. P. G. Dias <sup>(1)</sup> (A)

(1) Professor Auxiliar, SerQ, ISISE, Departamento de Engenharia Civil Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal  
Endereço de contato: alfgdias@dec.uc.pt; (A) Apresentador

**Código de identificação: T6-37**

### Resumo

Os sistemas mistos madeira-betão têm sido usados em todo o mundo desde há quase 100 anos. Estas soluções trazem à construção de madeira um conjunto de novas possibilidades em termos de desempenho que permitem a sua utilização em situações mais exigentes, que jamais seriam possíveis utilizando exclusivamente madeira. Este artigo apresenta uma breve visão do uso de sistemas madeira-betão em todo o mundo, desde a década de 1920, até aos nossos dias. São apresentadas as tipologias de construção mais representativas e são discutidas as razões para o uso desta solução composta.

Apesar do uso crescente dos sistemas madeira-betão, a sua análise e dimensionamento não está enquadrada por um quadro regulamentar adequado. Para resolver esta questão, o Comité Europeu de Normalização (CEN) criou uma equipa de projeto (Project Team) europeia cujo objetivo é a preparação de uma nova parte do Eurocódigo para a análise e conceção de estruturas compostas de madeira. Neste artigo serão apresentadas e discutidas as diretrizes de projeto e as regras de código, disponíveis para o projeto desses sistemas. Além disso, são também apresentados e debatidos o estado e os resultados futuros esperados dos esforços europeus de normalização no que se refere à preparação de uma nova parte do Eurocódigo sobre os compósitos de madeira.

**Palavras chave:** madeira-betão, pontes, edifícios, análise estrutural; dimensionamento

### Abstract

*Timber-Concrete Composite systems have been used all over the world for almost 100 years. These solutions bring to timber construction a set of new performance capabilities that allow their use in highly demanding situations, which would not be possible using solely timber. This paper gives an overview of the use of Timber-Concrete Composite systems around the world, starting as early as the 1920 decade, up to now. The most representative construction typologies are presented and the reasons for the use of this composite solution discussed.*

*In spite of the relatively wide application of Timber-Concrete Composite systems, their analysis and design was not supported by an adequate regulatory framework. In order to address this issue European Standardization Body CEN has established a European Project Team whose objective is the preparation of a new Eurocode part on the analysis and design of Timber Composite Structures. In this paper the design guidelines and code rules, available for the design of these systems will be presented and discussed. Furthermore, the status and anticipated future results of the European standardization efforts regarding the preparation of a new Eurocode part on Timber Composites will also be presented and discussed.*

**Keywords:** timber-concrete; bridges; buildings; structural analysis; design

## 1. INTRODUÇÃO

As estruturas mistas madeira-betão surgiram na primeira metade do século XX, tendo tido grande desenvolvimento durante o período das Guerras Mundiais, devido à escassez de aço que então ocorreu [1]. As primeiras aplicações foram em pontes de madeira em vias rodoviárias dos Estados Unidos da América. Estas aplicações correspondiam não só a reabilitações, mas igualmente a estruturas novas em que se pretendiam obter maiores durabilidades e desempenhos mecânicos. A primeira ponte madeira-betão pensa-se que terá sido construída em 1924 [2].

De acordo com o Inventário Nacional Americano, existem mais de 1400 pontes mistas madeira betão em serviço em todo o território dos Estados Unidos da América. Algumas das pontes construídas na década de 30 do século passado estão ainda em serviço passados quase 100 anos, tendo sido alvo de poucas ações de manutenção.



Figura 1. Pontes construídas na década de 30 nos EUA

Na Europa, o recurso a estruturas mistas madeira-betão tem verificado um crescimento significativo nas últimas décadas, não só na reabilitação de estruturas/pavimentos existentes em madeira, mas igualmente em edifícios novos. Sendo assim permitido atingir dimensionamentos que seriam impossíveis recorrendo somente a soluções convencionais de madeira, o mesmo ocorrendo noutras zonas do como por exemplo na Oceânia (Figura 2).

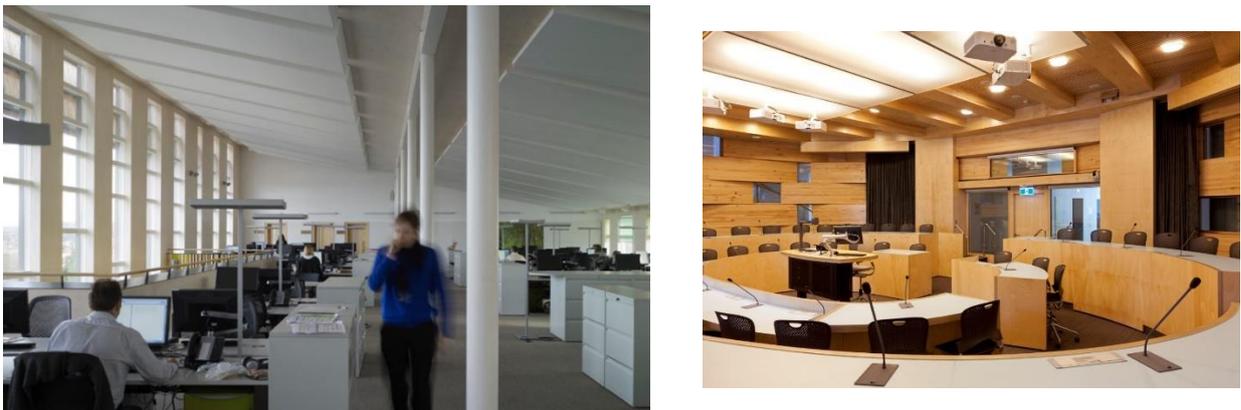


Figura 2 Exemplos de pavimentos mistos no Reino Unido e Austrália [3]

A utilização dos materiais madeira e betão permite combinar as melhores propriedades de cada material, sendo a madeira um material que resiste bem a esforços de flexão/tração e o betão aos esforços de compressão. No entanto, a sua utilização só tira, adequadamente, partido das propriedades de cada material se estes funcionarem em conjunto. Para que tal ocorra é necessário existir um sistema de ligação eficaz que garanta o adequado comportamento misto.

Segundo Ceccotti [4], o uso deste sistema estrutural, em detrimento de uma solução corrente de madeira, permite obter ganhos de resistência de duas a três vezes e um incremento de três a quatro vezes na rigidez. Estudos recentes demonstram que além de vantagens importantes ao nível de comportamento mecânico e físico [3] estes sistemas apresentam ainda vantagens não desprezáveis em termos de sustentabilidade [5]. Efetivamente Análises de Ciclo de Vida comparativas entre soluções mistas e soluções convencionais de betão têm demonstrado vantagem relevantes das primeiras (Figura 3).

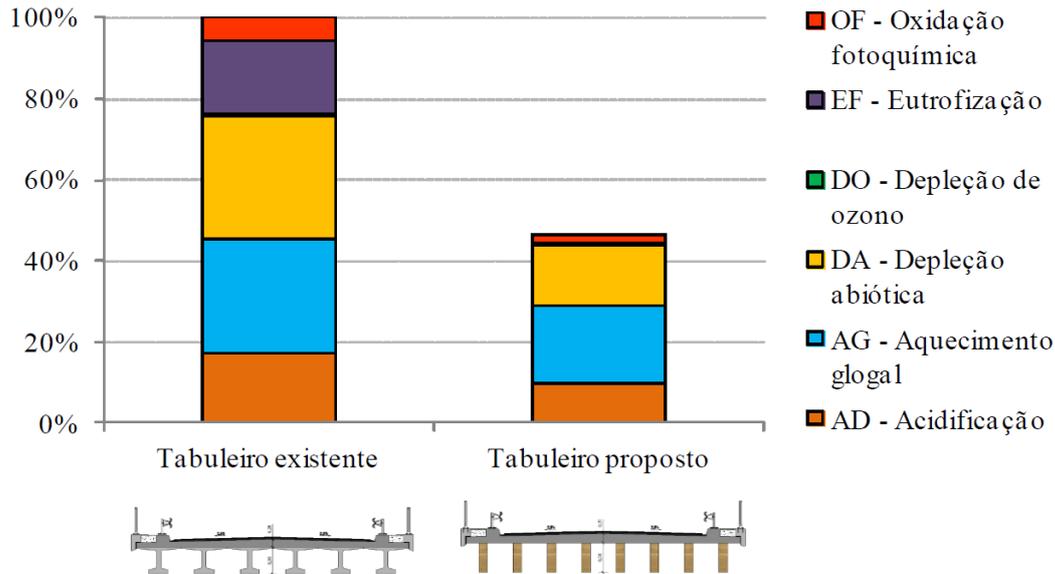


Figura 3: Análise comparativa dos impactos ambientais de uma solução mista e uma solução convencional em betão

Por estas razões é de esperar um aumento da utilização deste tipo de solução nos próximos anos, no entanto para que tal ocorra de forma adequada deverá existir um enquadramento regulamentar simples e claro que ajude os projetistas não só na análise mas igualmente no dimensionamento.

## 2. ENQUADRAMENTO REGULAMENTAR ATUAL

### 2.1 Europa

A análise e dimensionamento de sistemas mistos madeira-betão apresentam muitas especificidades importantes resultado da combinação de dois materiais com comportamentos bastante distintos, com recurso a sistemas de ligação que são quase sempre semi-rígidos.

A atual versão do Eurocódigo 5 fornece algumas indicações sobre aspetos específicos da análise e dimensionamento das estruturas mistas madeira-betão. A versão em vigor do Eurocódigo 5 está dividida nas três partes base, que são comuns a todos os Eurocódigos de materiais: parte 1-1 – regras gerais e regras para edifícios [6], 1-2 dimensionamento em situação de incêndio [7] e parte 2 dimensionamento de pontes [8].

Na parte 1-1 apenas existe uma cláusula explicitamente e especificamente dedicada à análise e conceção de sistemas mistos madeira betão:

- Cláusula - 7.1 (3) Módulo de escorregamento de ligações madeira-betão

Por outro lado, na parte 2 há uma série de cláusulas específicas para a análise e dimensionamento de pontes madeira-betão:

- Cláusula - 2.4.1 - Tabela 2.1 – Coeficientes de segurança recomendados para propriedades de materiais;
- Cláusula - 5.1.3 - Análise simplificada – Seção efetiva da viga;
- Cláusula - 5.2 – Influência do escorregamento em sistemas laminados;
- Cláusula - 5.3 (1) – Remete o dimensionamento dos elementos de betão para o Eurocódigo 2 [9];
- Cláusula - 5.3 (2) – Dimensionamento de ligações metálicas e entalhadas;
- Cláusula - 5.3 (3) - Largura efetiva das estruturas de vigas mistas madeira betão aos Estados Limites de Serviço, SLS;
- Cláusula - 5.3 (4) - Consideração da fendilhação nos elementos de betão;
- Cláusula - 5.3 (5) – Abordagem simplificada para determinação da rigidez da seção de betão fendilhada;
- Cláusula - 6.1.2 (Tabela 6.1) - Coeficientes de atrito para madeira-betão;
- Cláusula - 8.2 – Ligações madeira-betão.

Apesar destas indicações, muitos aspetos importantes não estão explicitamente incluídos nestes regulamentos. Nessas situações os projetistas optam, em muitos casos, por adaptar cláusulas semelhantes originalmente destinadas a outros tipos de estruturas, como sejam as estruturas de madeira (Eurocódigo 5) e as estruturas de betão (Eurocódigo 2). Um bom paradigma desta abordagem, é o exemplo demonstrativo apresentado na publicação STEP 2 [4], que é muitas vezes seguido e usado como referência. Um exemplo claro dessa adaptação é o método  $\gamma$  dado no Eurocódigo 5 para estruturas de madeira, que, apesar de não ter sido especificamente desenvolvido para sistemas madeira-betão, é provavelmente a abordagem mais utilizada para analisar este tipo de estruturas e que vários estudos mostraram permitir bons resultados para a maioria das aplicações de engenharia [14].

Existem, no entanto, muitas outras questões, como por exemplo, a análise a longo prazo do sistema TCC para a qual a adoção dos modelos do Eurocódigo 5 não conduz, na maioria dos casos, a soluções adequadas [15].

## 2.2 Austrália e Nova Zelândia

As indicações de apoio ao projeto disponíveis na Austrália e da Nova Zelândia [10] seguem a abordagem do EC5 como a base subjacente para a análise e dimensionamento. No entanto, estes procedimentos foram modificados por forma a respeitar os códigos australiano e neozelandês [11].

Nestes documentos guia são dadas algumas limitações que resultam da incerteza reconhecida sobre alguns aspetos, nomeadamente a deformabilidade de longo prazo.

Tanto para efeito de análise como para efeito de verificação de Estados Limites Últimos como de Estados Limites de Serviço assume-se o um comportamento elástico para as ligações, no entanto limita-se a aplicabilidade do procedimento a duas configurações de ligação entalhada descritas no documento. Para estes tipos de ligação, as propriedades mecânicas são indicadas tendo por base resultados disponíveis de ensaios laboratoriais [11].

Na Austrália também está disponível um Manual de Pontes de Madeira [12], que tem um capítulo dedicado às pontes de madeira cobertas com um elemento de betão “não estrutural” e outro dedicado às pontes mistas madeira-betão. Estes documentos, além de indicações para análise e dimensionamento, fornecem igualmente detalhes de execução e pormenorização para este tipo de estrutura.

## 2.3 Canadá

O código canadiano de pontes rodoviárias [13] dá indicações específicas para o projeto das pontes madeira-betão.

Estas incluem indicações sobre: análise, sistemas de ligação, pormenorização e execução. No entanto, o âmbito destas orientações é restringido a sistemas mistos com uso de decks laminados de madeira. O método de análise sugerido assume o comportamento elástico linear dos materiais e sugere o uso da seção homogeneizada.

São permitidas duas configurações de ligação, ambas baseadas em entalhes obtidos através de alturas variáveis dos elementos laminados, combinadas com ligadores de aço.

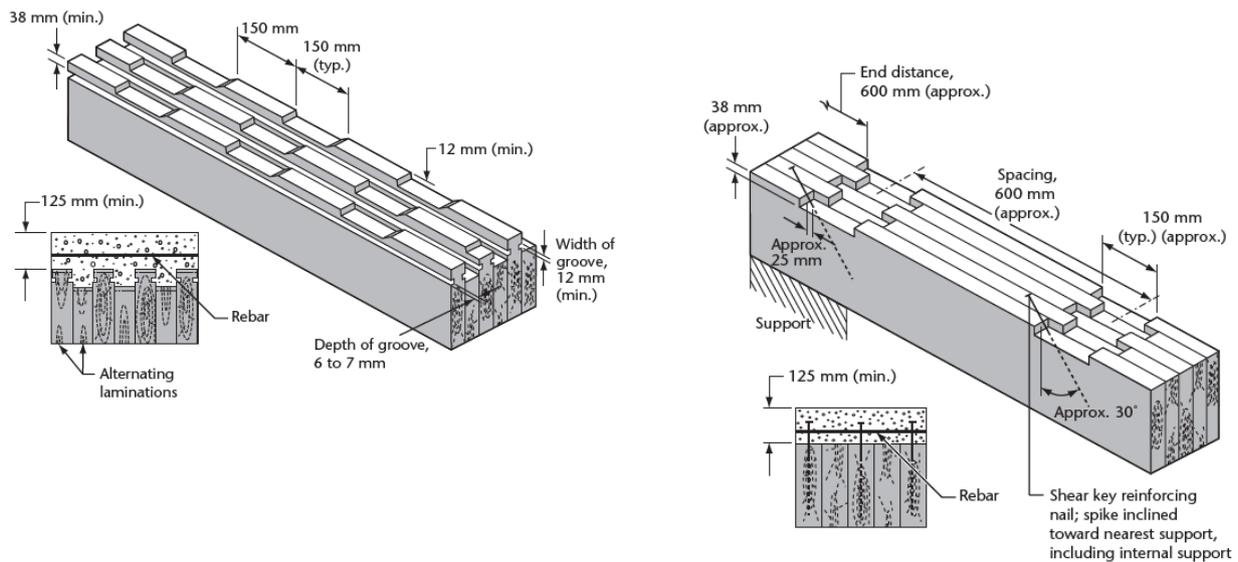


Figura 4 Ligações indicada no código canadiano [13]

Neste regulamento são igualmente indicados alguns requisitos mínimos nomeadamente para a espessura do betão e sua resistência. Além disso, são também indicados os requisitos mínimos para o de aço de reforço, bem como indicações para a sua pormenorização.

## 2.4 Brasil

No Brasil existe também um manual para projeto e execução de pontes de madeira, o qual tem indicações para a análise e dimensionamento de sistemas mistos madeira-betão tendo em vista a sua aplicação em pontes [14].

As indicações focam-se em sistemas mistos com recurso a decks de madeira constituídos por elementos de seção circular. De forma análoga à maioria deste tipo de documentos também neste caso são indicados valores para as propriedades mecânicas da ligação. São indicadas duas configurações com varões de aço colados em X, nas quais varia o diâmetro dos varões. São dadas indicações para o dimensionamento de sistemas recorrendo a betonagem *in situ* ou pré-fabricação do betão. Detalhes gerais sobre pormenorização e execução são igualmente dados.

## 3. ENQUADRAMENTO REGULAMENTAR FUTURO

Na Europa encontram-se atualmente em revisão os Eurocódigos estruturais, que incluem os Eurocódigos base e os Eurocódigos de materiais. No âmbito do mandato da Comissão Europeia para preparação da nova geração de regulamentos, M / 515 "Rumo a uma segunda geração de Eurocódigos" [15]. Este mandato tem como objetivos, entre outros: i) assegurar que os Eurocódigos evoluem de forma adequada, visando a manutenção da confiança dos utilizadores, ii) garantir que os regulamentos se mantêm completamente atualizados com a consideração de novas metodologias, novos materiais e novos requisitos regulamentares indo ao encontro aos requisitos do mercado, iii)

permitir uma maior harmonização e fazer um esforço no sentido de melhorar e facilitar a utilização prática do conjunto normativo existente [15].

O trabalho está organizado em quatro fases, iniciadas em 2015 e que deverão estar concluídas em 2020.

Na Subcomissão 5 que tem a responsabilidade dos regulamentos relacionados com o dimensionamento de estruturas de madeira, a resposta ao Mandato foi organizada em torno de 6 Equipas de Projeto (PT):

- SC5.T1 - Madeira Laminada Cruzada (CLT) e Reforço de estruturas de madeira; Eurocódigo 5, cláusulas novas e revistas para o Eurocódigo 5 parte 1-1;
- SC5.T2 – Estruturas mistas madeira-betão; nova parte para o Eurocódigo 5;
- SC5.T3 – Novas cláusulas e cláusulas revistas para o Eurocódigo 5 parte 1-1;
- SC5.T4, Dimensionamento de Estruturas em situação de incêndio, novas cláusulas e cláusulas revistas para o Eurocódigo 5, parte 1-2;
- SC5.T5 - Ligações, cláusulas novas cláusulas e cláusulas revistas para o Eurocódigo 5, parte 1-1;
- SC5.T6 - Pontes, novas cláusulas e cláusulas revistas para o Eurocódigo 5, parte 2.

As Equipas de Projeto SC5.T1 e SC5.T2 foram incluídas na primeira fase, e o desenvolvimento do trabalho correspondente está em curso neste momento [16-18]. As restantes Equipas de Projeto deverão iniciar o seu trabalho nas fases posteriores, nomeadamente SC5.T3 na Fase 2, SC5.T4 e SC5.T5 na Fase 3 e finalmente SC5.T6 na Fase 4.

De acordo com a resposta ao mandato, a Equipa de Projeto SC5 espera que o SC5.T2 produza uma Especificação Técnica Europeia (TS) que venha a dar origem a uma parte nova do Eurocódigo 5 a parte 1-3 para o dimensionamento de sistemas mistos de madeira. O seu objetivo está centrado na simplificação e melhoria do conteúdo disponível da versão atual do Eurocódigo, onde são dadas várias cláusulas para este tipo de estruturas. Isto deve ser feito em estreita coordenação com outros Eurocódigos relacionados, nomeadamente o Eurocódigo 2 e, em menor escala com o Eurocódigo 4, interligando-se naturalmente com um vasto leque de Normas e regulamentos (Figura 5).

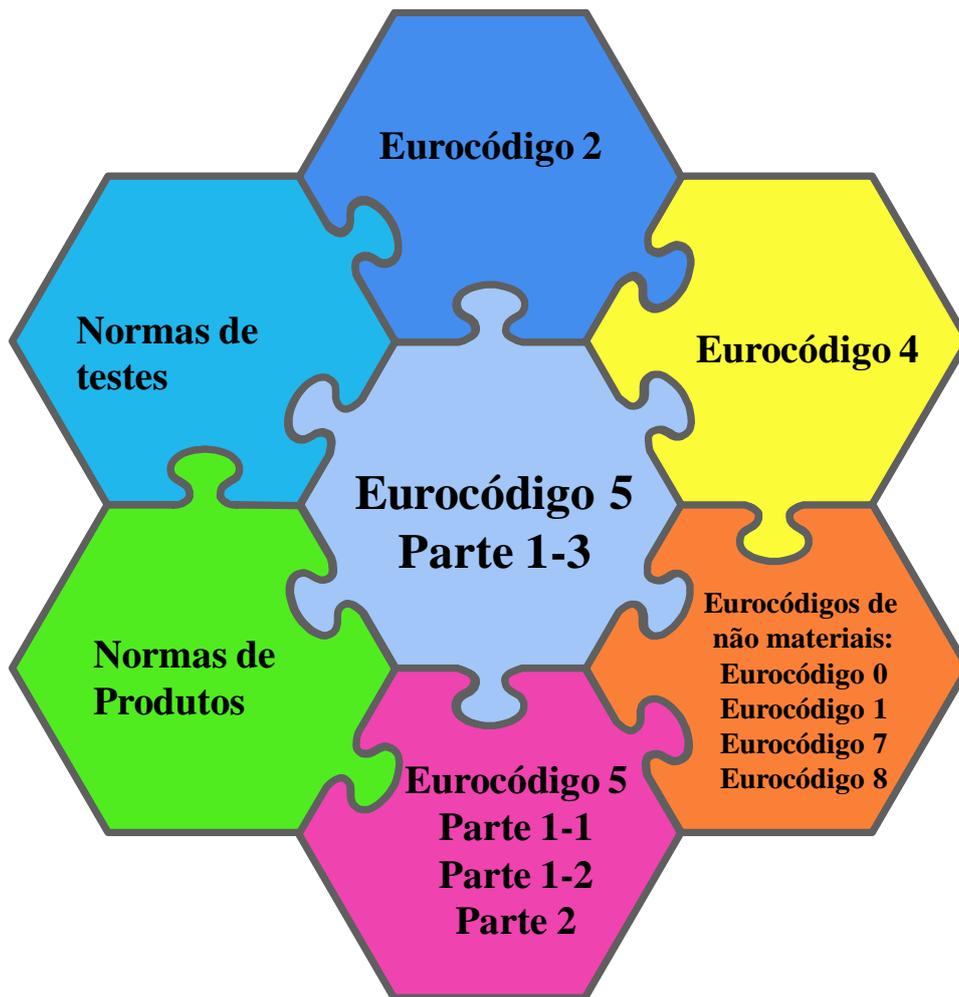


Figura 5: Interligação entre o novo documento regulamentar sobre madeira betão e os restantes regulamentos

Será necessária uma coordenação geral com as outras 5 Equipas de Projeto da sub-comissão 5, bem como com outras equipas de outras subcomissões relacionadas. No entanto, espera-se uma relação mais estreita com três Equipas de Projeto: SC5.T4, SC5.T5 e SC5.T6.

O desempenho em situação de incêndio dos sistemas mistos madeira-betão é uma das motivações para a utilização prática de sistemas mistos madeira-betão, a sua análise e dimensionamento têm especificidades importantes que serão abordadas na parte 1-2 do Eurocódigo 5 (SC5.T4).

Tal como antes referido e largamente referido na bibliografia [19] uma das aplicações mais antigas e relevantes dos sistemas mistos madeira-betão são as pontes, dadas as vantagens significativas que esta solução apresenta, quando comparada com as soluções de madeira tradicionais. A análise e dimensionamento destas estruturas será tratada na parte 2 do Eurocódigo 5 (SC5.T6). Assim tanto para a parte 1-2 como para a parte 2 serão abordados aspetos específicos de análise e dimensionamento de sistemas mistos madeira-betão em situação de incêndio e para pontes, respetivamente. As questões gerais serão tratadas na nova parte 1-3.

#### 4. NOTAS FINAIS

Os sistemas mistos madeira-betão têm sido usados com grande sucesso em estruturas por todo o mundo. As motivações para este uso incluem o aumento da capacidade de carga, rigidez, desempenho dinâmico, desempenho construtivo (térmico e acústico), durabilidade e sustentabilidade, amplamente demonstrados ao longo de quase um século. Este sistema construtivo tem permitido soluções mais ambiciosas as quais não seriam possíveis recorrendo somente a soluções tradicionais de madeira.

Por forma a materializar este potencial serão necessários avanços complementares na área regulamentar, claramente insuficiente face aos desenvolvimentos recentes. No âmbito da próxima geração de Eurocódigos estruturais espera-se que esta situação mude nomeadamente com a futura revisão da EN 1995-1-1, que deverá incluir uma parte especificamente dedicada a sistemas mistos madeira-betão.

A preparação de uma nova parte de código regulamentar levanta, naturalmente, desafios significativos. A discussão aberta e alargada esperada durante o período de desenvolvimento, em diferentes fóruns Europeus (por exemplo, subcomités e grupos de trabalho do CEN, ações de custo, comités espelhados nacionais) mas também a nível internacional é essencial para este fim, esperando-se que permita o desenvolvimento de documentos Técnico-Científicos à altura dos desafios técnicos que este tipo de solução tem conseguido ultrapassar

#### AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pelos fundos FEDER através do Programa Operacional Factores de Competitividade - COMPETE e por fundos nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia no âmbito do projecto POCI-01-0145-FEDER-007633.

#### REFERENCES

- [1] Van der Linden, M., *Timber Concrete Composite Floors*. Delft University of Technology, Delft, 1999.
- [2] DelDOT, *Delaware's Historic Bridges*. 2000.
- [3] Dias, A., et al., *Timber-concrete-composites increasing the use of timber in construction*. p. 1-9. 2015.
- [4] Ceccotti, A., *Timber-concrete composite structures*, H. Blass, Editor. Centrum Hout: The Netherlands. p. 1-14, 1995.
- [5] Rodrigues, J.N., P. Providência, and A.M.P.G. Dias, *Sustainability and Lifecycle Assessment of Timber-Concrete Composite Bridges*. 0(0): p. 04016025. 2016.
- [6] CEN, *Eurocode 5 - Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings*. CEN. 2004.
- [7] CEN, *Eurocode 5 - Design of timber structures - Part 1-2: General - Structural fire design*. CEN. 2004.
- [8] CEN, *Eurocode 5 - Design of timber structures - Part 2: Bridges*. CEN. 2004.
- [9] IPQ, *Eurocódigo 2 - Proyecto de estructuras de betão armado*. IPQ. 2010.
- [10] Gerber, C., K. Crews, and R. Shrestha, *Design Guide Australia and New Zealand - Timber Concrete Composite Floor Systems*, S.T.I. Company, Editor. 2012, Structural Timber Innovation Company: Christchurch.
- [11] Crews, K. and C. Gerber, *Development of design procedures for timber concrete composite floors in Australia and New Zealand*. p. Nelson - New Zealand. 2010.
- [12] RTA, *Timber Concrete Composite Bridges*. , R.a.T.A.o.N. Austrália, Editor. Austrália, Roads and Traffic Authority of NSW: Australia. p. 25, 2008.
- [13] CSA, *Canadian Highway Bridge design Code*. Canadian Standards Association. 2006.
- [14] Junior, C.C., et al., *Manual de Projeto e Construção de Pontes de Madeira*. São Carlos, Brasil: SET-EESC - USP. 2006.
- [15] CEN, *Response to Mandate M/515 EN 'Towards a second generation of EN Eurocodes'*. CEN/TC250. 2013.

- [16] Winter, S., M. Kleinhenz, and P. Dietsch, *EUROCODE 5 - A HALFTIME SUMMARY OF THE REVISION PROCESS*. p. Viena, Austria. 2016.
- [17] Dietsch, P., *REINFORCEMENT OF TIMBER STRUCTURES – A NEW SECTION FOR EUROCODE 5*. p. Viena, Austria. 2016.
- [18] Dias, A., *TIMBER-CONCRETE COMPOSITES – A NEW PART IN EUROCODE 5*. p. Viena, Austria. 2016.
- [19] Rodrigues, J.N.A., A.M.P.G. Dias, and P.M.P. Providência, *Timber-Concrete Composite Bridges: State-of-the-Art Review*.2013.