

Desenvolvimento e caracterização de painéis em palha para construção modular

Projeto Vale I&D n.º ALT20-03-0247-FEDER-018235

Cliente:

ILOS - Peace and Research Centre, Lda.
Monte Serro, Relíquias
7630-392 RELÍQUIAS

RELATÓRIO DE VALE

(RIA013/17)

Cofinanciado por:





Relatório de Vale

Desenvolvimento e caracterização de painéis em palha para construção modular, no âmbito do Projeto Vale I&D n.º ALT20-03-0247-FEDER-018235

1 - Enquadramento

A empresa ILOS - Peace Research Centre, Lda., no âmbito do Projeto Vale I&D n.º ALT20-03-0247-FEDER-018235 - "Desenvolvimento e caracterização de painéis em palha para construção modular de habitações", solicitou ao ITeCons a realização de estudos de apoio ao desenvolvimento e caracterização de painéis em palha para construção modular de habitações ou outros edifícios.

Nos últimos anos, a indústria da construção tem procurado estratégias para a redução das emissões de carbono, normalmente relacionadas com a extração de matérias-primas e com as quantidades de energia necessárias para a transformação, manufatura e transporte dos materiais de construção. Estas preocupações ambientais têm fomentado a investigação e desenvolvimento de tecnologias de construção baseadas na utilização de materiais naturais e sustentáveis, tornando-os mais competitivos relativamente a soluções convencionais existentes no mercado. Assim, a utilização de materiais naturais na construção procura promover a redução da quantidade de energia necessária para a produção de materiais de construção e a redução dos custos associados ao transporte, ao serem utilizados recursos naturais endógenos.

O arroz é um dos cereais mais consumidos, revelando-se como o alimento principal para mais de metade da população. Em Portugal, a produção de arroz é feita em 5 rios (Mira, Sado, Sorraia, Tejo e Mondego), numa área total de cerca de 30.000 hectares, produzindo aproximadamente 180.000 toneladas de arroz (em casca) por ano, o que representa cerca de metade do consumo interno. Para além do valor económico associado a esta agroindústria, há também uma importância cultural relacionada com as tradições gastronómicas e dinamização cultural das regiões de cultivo. Assim, com a valorização dos recursos endógenos pretende-se dinamizar as atividades económicas relacionadas com estes produtos regionais, como forma de criar riqueza e fomentar a competitividade a um nível global.

Além das vantagens apresentadas, a construção em palha pode contribuir para a valorização de um resíduo relevante da agroindústria nacional. No caso da palha de arroz, este material tem dificuldades de escoamento por parte dos agricultores devido ao seu elevado teor em sílica, o que o torna inviável para a alimentação animal, gerando uma grande quantidade de resíduos que, na maior parte das vezes, são queimados, contribuindo para o aumento da poluição atmosférica e para a contaminação dos solos. A palha de arroz apresenta, ainda, outras vantagens, como o facto de ser um material biodegradável

(causando menos poluição no fim de vida das construções), apresenta boas características de isolamento térmico (devido à sua estrutura porosa) e capacidade de conferir atraso térmico aos edifícios.

A construção com fardos de palha tem sido utilizada em diversos países, nomeadamente Estados Unidos da América, Reino Unido e Alemanha desde o século XIX. As baixas emissões de carbono que caracterizam este tipo de construção têm renovado o interesse neste tipo de construção. Para isso, é fundamental desenvolver trabalhos de investigação aplicada a este tipo de materiais, de forma a transmitir ao mercado as informações técnicas necessárias para uma eficaz implementação no mercado. Assim, a utilização da palha na construção, não sendo uma abordagem inovadora, apresenta grande potencial de investigação e desenvolvimento de produtos diferenciados.

Atendendo às propriedades intrínsecas da palha e à sua origem sustentável, neste projeto, a ILOS pretendeu desenvolver uma tecnologia de construção em palha que vá para além da construção convencional com fardos de palha. Para o efeito, desenvolveram-se painéis modulares em palha, compostos por estruturas de madeira e preenchidas no seu interior com palha de arroz, com características técnicas que permitam garantir a qualidade do produto e assegurar o desempenho de acordo com requisitos técnicos e regulamentares. O desenvolvimento de um painel em que os componentes têm de cumprir determinados requisitos, garantirá as propriedades globais pretendidas para o painel.

O desenvolvimento deste trabalho permitiu valorizar a palha de arroz, nomeadamente a que não é aproveitada, e contribuir para o desenvolvimento de soluções construtivas mais sustentáveis e inovadoras que permitam à ILOS expandir o seu mercado nomeadamente e internacional. Neste sentido, com este projeto concretizou-se um conjunto de tarefas de desenvolvimento científico, nomeadamente:

- Definição da tipologia de painel e das propriedades mecânicas que necessita de garantir;
- Estudo dos requisitos necessários para a garantia da qualidade. Realização de ensaios laboratoriais iniciais de caracterização dos materiais constituintes.
- Estudo estrutural do painel em função de propriedades dos materiais que o constituem.
- Estudo dimensional relativo à geometria e às características dimensionais;
- Desenvolvimento e construção de protótipos para a realização de ensaios laboratoriais de caracterização dos painéis;
- Realização de ensaios de caracterização de propriedades mecânicas, higrotérmicas, acústicas e de reação ao fogo;
- Realização de ensaios de durabilidade;
- Análise de resultados e comparação com os valores dos requisitos pré-definidos;
- Otimização do painel para melhorar determinadas características.

Para a realização deste trabalho, a ILOS necessitou de encontrar um parceiro da área de desenvolvimento tecnológico, que tivesse capacidade para apoiar tecnicamente o desenvolvimento de novos produtos e com meios técnicos para executar ensaios que permitam caracterizar o isolamento em fardos de palha de arroz. A ILOS considerou o ITeCons como uma entidade que corresponde aos requisitos necessários para a prestação de serviços de I&DT no âmbito deste trabalho, com competências no domínio das Ciências da Construção e dos Materiais, com recursos qualificados. Este apoio consistiu na realização de cálculos e ensaios de caracterização do isolamento em fardos de palha.

O presente relatório resume o trabalho desenvolvido pelo ITeCons no âmbito deste Vale I&D, com as atividades desenvolvidas e respetivas conclusões.

2 - Atividades desenvolvidas

Os painéis desenvolvidos são preenchidos com fardos de palha de arroz, com o objetivo de conferir as características de isolamento necessárias. Para isso, foi necessário proceder à caracterização do isolamento em palha de arroz, com vista à sua utilização em elementos construtivos da envolvente de edifícios. Assim, o presente relatório incide sobre a caracterização do painel e do isolamento em fardos de palha de arroz dos painéis para construção modular, com a seguinte sequência:

- Cálculos estruturais para avaliar a carga vertical máxima a aplicar no painel (capítulo 3.1);
- Determinação de comprimento, largura e espessura dos fardos de palha (capítulo 3.2);
- Determinação da massa volúmica aparente dos fardos de palha (capítulo 3.3);
- Determinação da estabilidade dimensional em condições definidas de temperatura e humidade dos fardos de palha (capítulo 3.4).
- Determinação de absorção de água por imersão parcial de curta duração dos fardos de palha (capítulo 3.5);
- Determinação de coeficiente de condutibilidade térmica dos fardos de palha (capítulo 3.6);
- Determinação das propriedades de transmissão ao vapor de água dos fardos de palha (capítulo 3.7);
- Determinação de curvas higroscópicas dos fardos de palha (capítulo 3.8);
- Determinação da resistência ao crescimento de fungos dos fardos de palha (capítulo 3.9);
- Determinação da resistência ao fluxo de ar dos fardos de palha (capítulo 3.10);
- Ensaios e classificação de reação ao fogo dos fardos de palha (capítulo 3.11);

- Ensaio e classificação de resistência ao fogo dos painéis com madeira e palha de arroz (capítulo 3.12);
- Ensaio de resistência à tração dos cordões (capítulo 3.13).

Os trabalhos previstos para a caracterização física dos painéis constituídos com palha de arroz foram definidos em conjunto com a ILOS. De seguida, são apresentados os resultados dos ensaios realizados.

3 - Resultados alcançados

3.1 - Carga vertical máxima

Nesta tarefa realizaram-se os cálculos para avaliar a carga vertical máxima a aplicar no topo de uma estrutura constituída por painéis com estrutura de madeira e preenchidos por fardos de palha.

A configuração dos painéis foi definida pelo requerente, a partir da definição de estudos preliminares que resultaram na configuração tipo apresentada na Figura 1. As dimensões da estrutura de madeira, com preenchimento com fardos de palha de arroz, de acordo com os dados (desenhos) fornecidos pelo requerente, estão apresentadas na Figura 1.

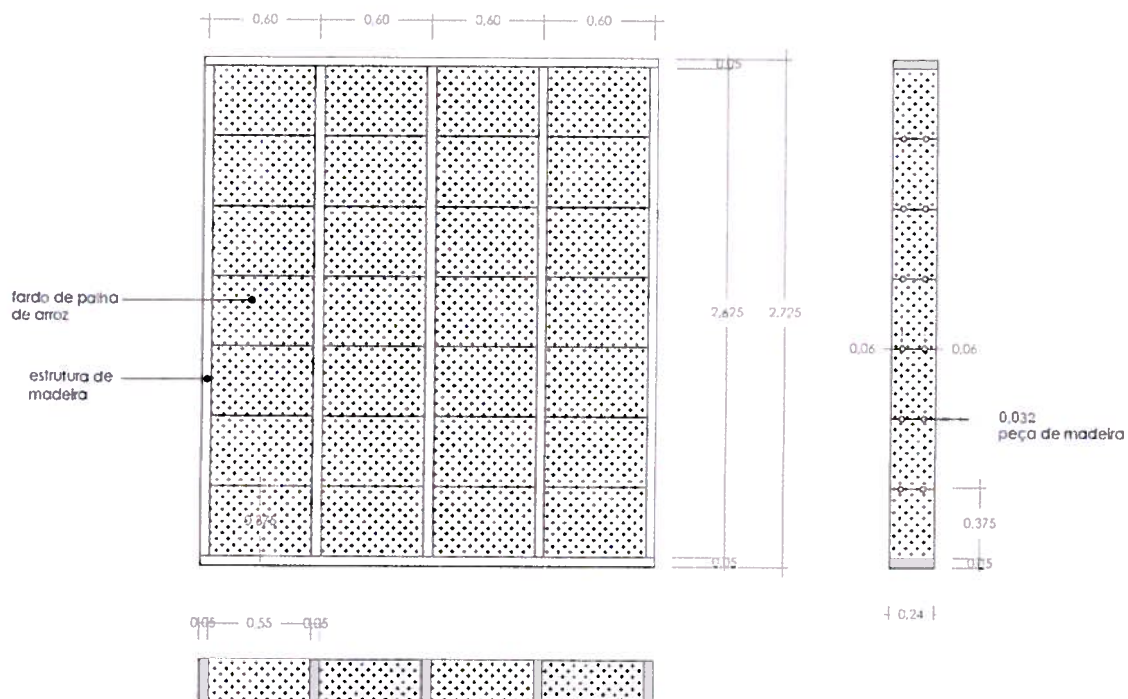


Figura 1: Desenhos dos painéis com estrutura de madeira e preenchimento com fardos de palha de arroz.

Os cálculos de resistência mecânica foram elaborados de acordo com o Eurocódigo 5 [1] e determinados com o auxílio do *software* CYPE (versão 2016). Foram consideradas simplificações ao modelo inicial, designadamente, a alteração das duas peças circulares de madeira com 0.032m de diâmetro, por uma única com área equivalente (diâmetro igual a 0.045m), como é possível observar-se na Figura 2.

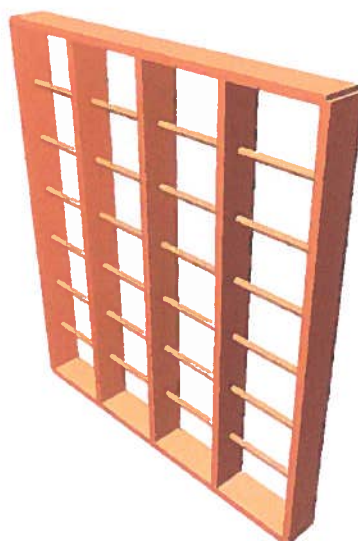


Figura 2: Modelo simplificado, em 3D, da estrutura de madeira.

Com o apoio de *software* de cálculo, foi aplicada no topo da estrutura uma carga vertical linearmente distribuída com o objetivo de se avaliar a carga máxima admissível. De acordo com o fabricante, as propriedades mecânicas da madeira utilizada são de acordo com as normas EN 14081-1 [1] e EN 338 [2]. De acordo com esta norma, a classe de resistência do material é C24.

A avaliação da capacidade de carga foi determinada com aplicação gradual de várias cargas verticais até se obter a carga máxima admissível sem que ocorra a rotura ou deformação excessiva das peças que constituem a estrutura. Após a análise dos vários casos, observou-se que os perfis de madeira mais solicitados (componente estrutural 1 da Figura 3) resistem a uma carga máxima vertical (não majorada) linearmente distribuída de 20kN/m.

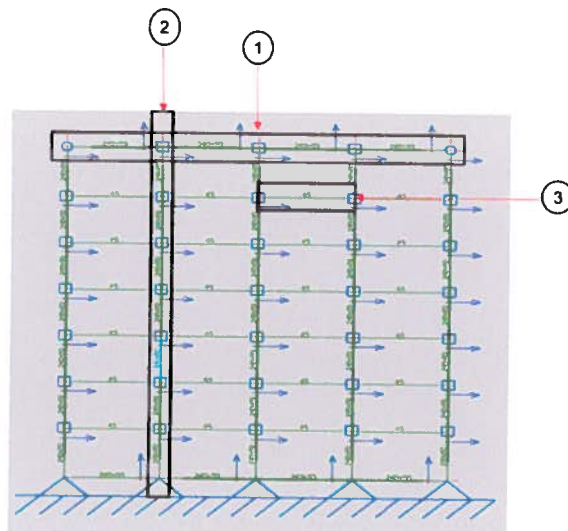


Figura 3: Componentes estruturais mais solicitadas quando sujeitos a uma carga vertical linearmente distribuída.

Os cálculos a seguir indicados correspondem aos elementos estruturais mais solicitados - perfil de madeira com dimensões 0.240x0.05m (componente estrutural 1, na Figura 3), perfil de madeira com dimensões 0.240x0.05m (componente estrutural 2, na Figura 3) e peça de madeira com diâmetro de 0.04 m (componente estrutural 3 da Figura 3) - quando sujeitos à aplicação de uma carga vertical linearmente distribuída de 20kN/m.

As propriedades mecânicas dos materiais utilizados nos vários elementos estruturais encontram-se indicadas na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades mecânicas da madeira de classe C24 (EN 338).

Materiais utilizados						
Material		E (MPa)	ν (-)	G (MPa)	α_t (m/m°C)	γ (kN/m ³)
Tipo	Designação					
Madeira	C24	11000.00	-	690.00	0.000005	4.12
<p><i>Anotação:</i></p> <p><i>E: Módulo de elasticidade</i></p> <p><i>N: Módulo de poisson</i></p> <p><i>G: Módulo de corte</i></p> <p><i>α_t: Coeficiente de dilatação</i></p> <p><i>γ: Peso específico</i></p>						

A Figura 4 descreve a localização dos nós do modelo de cálculo utilizado.

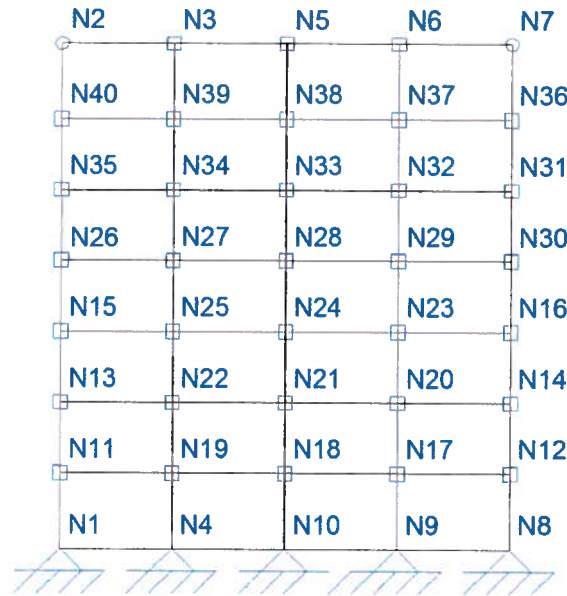



Figura 4: Descrição dos nós utilizados no modelo de cálculo.

3.1.1 Perfil de madeira 0.240 m x 0.05 m (componente 1)

O tramo mais solicitado corresponde à barra N2-N3 (ver Figura 4).

Perfil: 240x50		Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas			
Material: Madeira (C24)		Inicial	Final		Área (cm ²)	I _y ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _z ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _t ⁽²⁾ (cm ⁴)
		N2	N3	0.600	120.00	5760.00	250.00	864.60
		<p>Notas: ⁽¹⁾ Inércia relativamente ao eixo indicado ⁽²⁾ Momento de inércia à torção uniforme</p>						
				Encurvadura		Encurvadura lateral		
				Plano XY	Plano XZ	Banzo sup.	Banzo inf.	
				□	1.00	1.00	0.00	0.00
				L _k	0.600	0.600	0.000	0.000
				C ₁	-	-	1.000	
		<p>Anotação: □: Coeficiente de encurvadura L_k: Comprimento de encurvadura (m) C₁: Fator de modificação para o momento crítico</p>						

As verificações, em estado limite último (E.L.U.) são abaixo indicadas:

Resistência à tração uniforme paralela ao fio (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.2)

A verificação não é necessária, já que não existe esforço axial de tração.

Resistência à compressão uniforme paralela ao fio (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.4 - 6.3.2)

Deve satisfazer:

Resistência da secção transversal à compressão

$$\eta = \frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \leq 1$$

$$\eta < \underline{0.001} \quad \checkmark$$

Resistência à encurvadura por flexão no eixo z

$$\eta = \frac{\sigma_{c,0,d}}{\chi_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1$$

$$\eta < \underline{0.001} \quad \checkmark$$

O esforço atuante de cálculo desfavorável produz-se para a combinação de ações PP+1.35·CARGA.

Em que:

$\sigma_{c,0,d}$: Tensão de cálculo à compressão paralela ao fio, dada por:

$$\sigma_{c,0,d} = |N_{c,0,d}|/A$$

$$\sigma_{c,0,d} : \underline{0.00} \text{ MPa}$$

Em que:

$N_{c,0,d}$: Compressão axial de cálculo paralela ao fio

$$N_{c,0,d} : \underline{0.02} \text{ kN}$$

A : Área da secção transversal

$$A : \underline{120.00} \text{ cm}^2$$

$f_{c,0,d}$: Resistência de cálculo à compressão paralela ao fio, dada por:

$$f_{c,0,d} : \underline{9.69} \text{ MPa}$$

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \cdot f_{c,0,k} / \gamma_M$$

Em que:

k_{mod} : Fator de modificação pela duração da carga (Permanente) e o conteúdo de humidade (Classe de serviço 1)

$$k_{mod} : \underline{0.60}$$

$f_{c,0,k}$: Resistência característica à compressão paralela ao fio

$$f_{c,0,k} : \underline{21.00} \text{ MPa}$$

γ_M : Coeficiente parcial para as propriedades do material

$$\gamma_M : \underline{1.30}$$

Resistência à encurvadura: (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.3.2)

k_c : Fator de instabilidade, dado por:

$$k_{c,z} : \underline{0.87}$$

$$\chi_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}}$$

Em que:

$$k = 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel} - 0.3) + \lambda_{rel}^2)$$

$$k_z : \underline{0.79}$$

Em que:

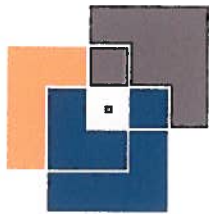
β_c : Fator associado à retidão das peças

$$\beta_c : \underline{0.20}$$

$\gamma_{rel,z}$: Esbelteza relativa, dada por:

$$\gamma_{rel,z} : \underline{0.70}$$

O presente relatório não pode ser reproduzido, exceto na íntegra, sem o acordo escrito do ITECons.



$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}$$

Em que:

 $E_{0,05}$: Valor do quinto percentil do módulo de elasticidade paralelo ao fio $E_{0,05}$: 7400.00 MPa $f_{c,0,k}$: Resistência característica à compressão paralela ao fio $f_{c,0,k}$: 21.00 MPa λ_z : Esbelteza mecânica, dada por: λ_z : 41.57

$$\lambda = \frac{L_k}{i}$$

Em que:

 $L_{k,z}$: Comprimento de encurvadura da barra $L_{k,z}$: 600.00 mm i_z : Raio de rotação i_z : 14.43 mm**Resistência à encurvadura:** (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.3.2)

Não se verifica a resistência à encurvadura por flexão no plano xz, já que o valor da esbelteza relativa em relação ao eixo y é inferior a 0.3.

 $\lambda_{rel,y}$: Esbelteza relativa, dada por: $\lambda_{rel,y}$: 0.15

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}$$

Em que:

 $E_{0,05}$: Valor do quinto percentil do módulo de elasticidade paralelo ao fio $E_{0,05}$: 7400.00 MPa $f_{c,0,k}$: Resistência característica à compressão paralela ao fio $f_{c,0,k}$: 21.00 MPa λ_y : Esbelteza mecânica, dada por: λ_y : 8.66

$$\lambda = \frac{L_k}{i}$$

Em que:

 $L_{k,y}$: Comprimento de encurvadura da barra $L_{k,y}$: 600.00 mm i_y : Raio de rotação i_y : 69.28 mm**Resistência à flexão no eixo y** (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.6 - 6.3.3)

A verificação não é necessária, já que não existe momento fletor.

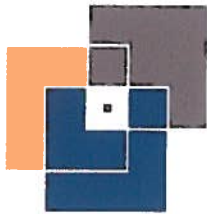
Resistência à flexão no eixo z (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.6 - 6.3.3)

Deve satisfazer:

Resistência da secção transversal à flexão:

$$\eta = \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

 η : 0.751 ✓



O esforço atuante de cálculo desfavorável produz-se no nó N3, para a combinação de ações 1.35·PP+1.35·CARGA.

Não se verifica a resistência à encurvadura lateral, já que o módulo resistente elástico da secção em relação ao eixo z é inferior ou igual ao módulo resistente elástico em relação ao eixo y.

Resistência da secção transversal à flexão:

$\sigma_{m,d}$: Tensão de cálculo à flexão, dada por:

$$\sigma_{m,d} = |M_d| / W_{el}$$

Em que:

M_d : Momento fletor de cálculo

W_{el} : Módulo resistente elástico da secção transversal

$f_{m,d}$: Resistência de cálculo à flexão, dada por:

$$f_{m,d} = k_{mod} \cdot k_h \cdot f_{m,k} / \gamma_M$$

Em que:

k_{mod} : Fator de modificação para a duração da carga e o conteúdo de humidade

Em que:

Classe de duração da carga

Classe de serviço

$f_{m,k}$: Resistência característica à flexão

k_h : Fator de altura, dado por:

Para alturas (flexão) ou larguras (tração) de peças retangulares de madeira maciça inferiores a 150 mm:

$$k_h = \min\{(150/h)^{0.2}; 1.3\}$$

Em que:

h : Altura em flexão ou maior dimensão da secção em tração

γ_M : Coeficiente parcial para as propriedades do material

$$\sigma_{m,z,d}^+ : 0.00 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,z,d}^- : 10.36 \text{ MPa}$$

$$M_{z,d}^+ : 0.00 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{z,d}^- : 1.04 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$W_{el,z} : 100.00 \text{ cm}^3$$

$$f_{m,z,d} : 13.80 \text{ MPa}$$

$$k_{mod} : 0.60$$

$$\text{Classe} : \textit{Permanente}$$

$$\text{Classe} : 1$$

$$f_{m,k} : 24.00 \text{ MPa}$$

$$k_h : 1.25$$

$$h : 50.00 \text{ mm}$$

$$\gamma_M : 1.30$$

Resistência ao esforço transversal no eixo y (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.7)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{\tau_{y,d}}{f_{v,d}} \leq 1$$

$$\eta : 0.995 \checkmark$$

O esforço atuante de cálculo desfavorável produz-se no nó N3, para a combinação de ações 1.35·PP+1.35·CARGA.

Em que:

τ_d : Tensão de cálculo ao esforço transversal, dada por:

$$T_{y,d} : 1.84 \text{ MPa}$$

$$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{|V_d|}{A \cdot k_{cr}}$$

Em que:

V_d: Esforço transversal de cálculo

$$V_{y,d} : \underline{9.85} \text{ kN}$$

A: Área da secção transversal

$$A : \underline{120.00} \text{ cm}^2$$

k_{cr}: Fator que tem em conta a influência das fendas

$$k_{cr} : \underline{0.67}$$

f_{v,d}: Resistência de cálculo ao esforço transversal, dada por:

$$f_{v,d} : \underline{1.85} \text{ MPa}$$

$$f_{v,d} = k_{mod} \cdot f_{v,k} / \gamma_M$$

Em que:

k_{mod}: Fator de modificação pela duração da carga (Permanente) e o conteúdo de humidade (Classe de serviço 1)

$$k_{mod} : \underline{0.60}$$

f_{v,k}: Resistência característica ao esforço transversal

$$f_{v,k} : \underline{4.00} \text{ MPa}$$

γ_M: Coeficiente parcial para as propriedades do material

$$\gamma_M : \underline{1.30}$$

Resistência ao esforço transversal no eixo z (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.7)

A verificação não é necessária, já que não existe esforço transversal.

Resistência à torção (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.8)

A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.

Resistência à flexão desviada (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.6)

A verificação não é necessária, já que não existe flexão desviada para nenhuma combinação.

Resistência à flexão e tração axial combinadas (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.2.3)

A verificação não é necessária, já que não existe interação entre esforço axial de tração e momento fletor para nenhuma combinação.

Resistência à flexão e compressão axial combinadas (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.2.4)

O esforço atuante de cálculo desfavorável produz-se no nó N3, para a combinação de ações 1.35·PP+1.35·CARGA.

Deve satisfazer:

Resistência da secção transversal à flexão e compressão combinadas

$$\eta = \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.526} \checkmark$$

$$\eta = \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.751} \checkmark$$

Resistência à encurvadura para flexão e compressão combinadas

$$\eta : \underline{0.526} \checkmark$$

$$\eta = \frac{\sigma_{c,0,d}}{\chi_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\eta = \frac{\sigma_{c,0,d}}{\chi_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

η : 0.751 ✓

Resistência à encurvadura lateral para flexão e compressão combinadas

Não é necessária a verificação de resistência à encurvadura lateral já que o comprimento de encurvadura lateral é nulo.

Em que:

$\sigma_{c,0,d}$: Tensão de cálculo à compressão paralela ao fio, dada por:

$\sigma_{c,0,d}$: 0.00 MPa

$$\sigma_{c,0,d} = |N_{c,0,d}|/A$$

Em que:

$N_{c,0,d}$: Compressão axial de cálculo paralela ao fio

$N_{c,0,d}$: 0.02 kN

A : Área da secção transversal

A : 120.00 cm²

$\sigma_{m,d}$: Tensão de cálculo à flexão, dada por:

$\sigma_{m,y,d}$: 0.00 MPa

$\sigma_{m,z,d}$: 10.36 MPa

$$\sigma_{m,d} = |M_d|/W_{el}$$

Em que:

M_d : Momento fletor de cálculo

$M_{y,d}$: 0.00 kN·m

$M_{z,d}$: 1.04 kN·m

W_{el} : Módulo resistente elástico da secção transversal

$W_{el,y}$: 480.00 cm³

$W_{el,z}$: 100.00 cm³

$f_{c,0,d}$: Resistência de cálculo à compressão paralela ao fio, dada por:

$f_{c,0,d}$: 9.69 MPa

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \cdot f_{c,0,k} / \gamma_M$$

Em que:

k_{mod} : Fator de modificação pela duração da carga (Permanente) e o conteúdo de humidade (Classe de serviço 1)

k_{mod} : 0.60

$f_{c,0,k}$: Resistência característica à compressão paralela ao fio

$f_{c,0,k}$: 21.00 MPa

γ_M : Coeficiente parcial para as propriedades do material

γ_M : 1.30

$f_{m,d}$: Resistência de cálculo à flexão, dada por:

$f_{m,y,d}$: 11.08 MPa

$f_{m,z,d}$: 13.80 MPa

$$f_{m,d} = k_{mod} \cdot k_h \cdot f_{m,k} / \gamma_M$$

Em que:

k_{mod} : Fator de modificação pela duração da carga (Permanente) e o conteúdo de humidade (Classe de serviço 1)

k_{mod} : 0.60

$f_{m,k}$: Resistência característica à flexão

$f_{m,k}$: 24.00 MPa

k_h : Fator de altura, dado por:

$k_{h,y}$: 1.00

$k_{h,z}$: 1.25

Eixo y:

Para alturas (flexão) ou larguras (tração) de peças retangulares de madeira maciça superiores ou iguais a 150 mm;

$$k_h = 1.0$$

Eixo z:

Para alturas (flexão) ou larguras (tração) de peças retangulares de madeira maciça inferiores a 150 mm:

$$k_h = \min\{(150/h)^{0.2}; 1.3\}$$

Em que:

h: Altura em flexão ou maior dimensão da secção em tração

$$h : 50.00 \text{ mm}$$

γ_M : Coeficiente parcial para as propriedades do material

$$\gamma_M : 1.30$$

k_m : Fator que tem em conta o efeito da redistribuição de tensões sob flexão desviada e a falta de homogeneidade do material na secção transversal

$$k_m : 0.70$$

k_c : Fator de instabilidade

$$k_{c,y} : 1.00$$

$$k_{c,z} : 0.87$$

Resistência ao esforço transversal e torsor combinados (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.7 - 6.1.8)

A verificação não é necessária, já que a barra não está submetida a momento torsor nem a esforço transversal.

3.1.2 Perfil de madeira 0.240 m x 0.05 m (componente 2)

O perfil de madeira, cujo tramo mais solicitado corresponde à barra N39/N3 da figura 4, é idêntico ao perfil anterior. As verificações, em E.L.U., são abaixo indicadas:

Resistência à tração uniforme paralela ao fio (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.2)

A verificação não é necessária, já que não existe esforço axial de tração.

Resistência à compressão uniforme paralela ao fio (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.4 - 6.3.2)

Deve satisfazer:

Resistência da secção transversal à compressão

$$\eta = \frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \leq 1$$

$$\eta : 0.157 \checkmark$$

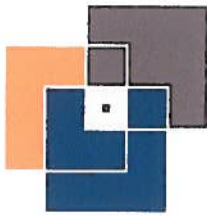
Resistência à encurvadura por flexão no eixo z

$$\eta = \frac{\sigma_{c,0,d}}{\chi_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1$$

$$\eta : 0.163 \checkmark$$

O esforço atuante de cálculo desfavorável produz-se no nó N39, para a combinação de ações 1.35·PP+1.35·CARGA.

Em que:



$\sigma_{c,0,d}$: Tensão de cálculo à compressão paralela ao fio, dada por:

$$\sigma_{c,0,d} = |N_{c,0,d}|/A$$

Em que:

$N_{c,0,d}$: Compressão axial de cálculo paralela ao fio

A : Área da secção transversal

$f_{c,0,d}$: Resistência de cálculo à compressão paralela ao fio, dada por:

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \cdot f_{c,0,k} / \gamma_M$$

Em que:

k_{mod} : Fator de modificação pela duração da carga (Permanente) e o conteúdo de humidade (Classe de serviço 1)

$f_{c,0,k}$: Resistência característica à compressão paralela ao fio

γ_M : Coeficiente parcial para as propriedades do material

Resistência à encurvadura: (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.3.2)

k_c : Fator de instabilidade, dado por:

$$\chi_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}}$$

Em que:

$$k = 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel} - 0.3) + \lambda_{rel}^2)$$

Em que:

β_c : Fator associado à retidão das peças

$\lambda_{rel,z}$: Esbelteza relativa, dada por:

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}$$

Em que:

$E_{0,05}$: Valor do quinto percentil do módulo de elasticidade paralelo ao fio

$f_{c,0,k}$: Resistência característica à compressão paralela ao fio

λ_z : Esbelteza mecânica, dada por:

$$\lambda = \frac{L_k}{i}$$

Em que:

$L_{k,z}$: Comprimento de encurvadura da barra

i_z : Raio de rotação

Resistência à encurvadura: (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.3.2)

Não se verifica a resistência à encurvadura por flexão no plano xz, já que o valor da esbelteza relativa em relação ao eixo y é inferior a 0.3.

$\lambda_{rel,y}$: Esbelteza relativa, dada por:

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}$$

$\sigma_{c,0,d}$: 1.52 MPa

$N_{c,0,d}$: 18.21 kN

A : 120.00 cm²

$f_{c,0,d}$: 9.69 MPa

k_{mod} : 0.60

$f_{c,0,k}$: 21.00 MPa

γ_M : 1.30

$k_{c,z}$: 0.96

k_z : 0.63

β_c : 0.20

$\lambda_{rel,z}$: 0.47

$E_{0,05}$: 7400.00 MPa

$f_{c,0,k}$: 21.00 MPa

λ_z : 27.71

$L_{k,z}$: 400.00 mm

i_z : 14.43 mm

$\lambda_{rel,y}$: 0.10

Em que:

$E_{0,05}$: Valor do quinto percentil do módulo de elasticidade paralelo ao fio

$E_{0,05}$: 7400.00 MPa

$f_{c,0,k}$: Resistência característica à compressão paralela ao fio

$f_{c,0,k}$: 21.00 MPa

λ_y : Esbelteza mecânica, dada por:

λ_y : 5.77

$$\lambda = \frac{L_k}{i}$$

Em que:

$L_{k,y}$: Comprimento de encurvadura da barra

$L_{k,y}$: 400.00 mm

i_y : Raio de rotação

i_y : 69.28 mm

Resistência à flexão no eixo y (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.6 - 6.3.3)

A verificação não é necessária, já que não existe momento fletor.

Resistência à flexão no eixo z (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.6 - 6.3.3)

Deve satisfazer:

Resistência da secção transversal à flexão:

$$\eta = \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

η : 0.094 ✓

O esforço atuante de cálculo desfavorável produz-se no nó N3, para a combinação de ações PP+1.35·CARGA.

Não se verifica a resistência à encurvadura lateral, já que o módulo resistente elástico da secção em relação ao eixo z é inferior ou igual ao módulo resistente elástico em relação ao eixo y.

Resistência da secção transversal à flexão:

$\sigma_{m,d}$: Tensão de cálculo à flexão, dada por:

σ_{m,z,d^+} : 0.00 MPa

σ_{m,z,d^-} : 1.30 MPa

$$\sigma_{m,d} = |M_d| / W_{el}$$

Em que:

M_d : Momento fletor de cálculo

M_{z,d^+} : 0.00 kN·m

M_{z,d^-} : 0.13 kN·m

W_{el} : Módulo resistente elástico da secção transversal

$W_{el,z}$: 100.00 cm³

$f_{m,d}$: Resistência de cálculo à flexão, dada por:

$f_{m,z,d}$: 13.80 MPa

$$f_{m,d} = k_{mod} \cdot k_h \cdot f_{m,k} / \gamma_M$$

Em que:

k_{mod} : Fator de modificação para a duração da carga e o conteúdo de humidade

k_{mod} : 0.60

Em que:

Classe de duração da carga

Classe : Permanente

Classe de serviço

Classe : 1

$f_{m,k}$: Resistência característica à flexão

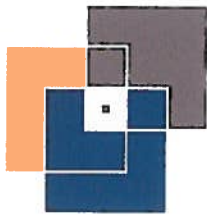
$f_{m,k}$: 24.00 MPa

k_h : Fator de altura, dado por:

k_h : 1.25

O presente relatório não pode ser reproduzido, exceto na íntegra, sem o acordo escrito do ITeCons.

Pág. 15/44



Para alturas (flexão) ou larguras (tração) de peças retangulares de madeira maciça inferiores a 150 mm:

$$k_h = \min\{(150/h)^{0.2}; 1.3\}$$

Em que:

h: Altura em flexão ou maior dimensão da secção em tração

h : 50.00 mm

γ_M : Coeficiente parcial para as propriedades do material

γ_M : 1.30

Resistência ao esforço transversal no eixo y (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.7)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{\tau_{y,d}}{f_{v,d}} \leq 1$$

η : 0.037 ✓

O esforço atuante de cálculo desfavorável produz-se para a combinação de ações PP+1.35·CARGA.

Em que:

τ_d : Tensão de cálculo ao esforço transversal, dada por:

$\tau_{y,d}$: 0.07 MPa

$$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{|V_d|}{A \cdot k_{cr}}$$

Em que:

V_d : Esforço transversal de cálculo

$V_{y,d}$: 0.37 kN

A: Área da secção transversal

A : 120.00 cm²

k_{cr} : Fator que tem em conta a influência das fendas

k_{cr} : 0.67

$f_{v,d}$: Resistência de cálculo ao esforço transversal, dada por:

$f_{v,d}$: 1.85 MPa

$$f_{v,d} = k_{mod} \cdot f_{v,k} / \gamma_M$$

Em que:

k_{mod} : Fator de modificação pela duração da carga (Permanente) e o conteúdo de humidade (Classe de serviço 1)

k_{mod} : 0.60

$f_{v,k}$: Resistência característica ao esforço transversal

$f_{v,k}$: 4.00 MPa

γ_M : Coeficiente parcial para as propriedades do material

γ_M : 1.30

Resistência ao esforço transversal no eixo z (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.7)

A verificação não é necessária, já que não existe esforço transversal.

Resistência à torção (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.8)

A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.

Resistência à flexão desviada (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.6)

A verificação não é necessária, já que não existe flexão desviada para nenhuma combinação.

Resistência à flexão e tração axial combinadas (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.2.3)

A verificação não é necessária, já que não existe interação entre esforço axial de tração e momento fletor para nenhuma combinação.

Resistência à flexão e compressão axial combinadas (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.2.4)

O esforço atuante de cálculo desfavorável produz-se no nó N3, para a combinação de ações 1.35·PP+1.35·CARGA.

Deve satisfazer:

Resistência da secção transversal à flexão e compressão combinadas

$$\eta = \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

η : 0.090 ✓

$$\eta = \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

η : 0.118 ✓

Resistência à encurvadura para flexão e compressão combinadas

$$\eta = \frac{\sigma_{c,0,d}}{\chi_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

η : 0.222 ✓

$$\eta = \frac{\sigma_{c,0,d}}{\chi_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

η : 0.257 ✓

Resistência à encurvadura lateral para flexão e compressão combinadas

Não é necessária a verificação de resistência à encurvadura lateral já que o comprimento de encurvadura lateral é nulo.

Em que:

$\sigma_{c,0,d}$: Tensão de cálculo à compressão paralela ao fio, dada por:

$\sigma_{c,0,d}$: 1.51 MPa

$$\sigma_{c,0,d} = |N_{c,0,d}| / A$$

Em que:

$N_{c,0,d}$: Compressão axial de cálculo paralela ao fio

$N_{c,0,d}$: 18.18 kN

A : Área da secção transversal

A : 120.00 cm²

$\sigma_{m,d}$: Tensão de cálculo à flexão, dada por:

$\sigma_{m,y,d}$: 0.00 MPa

$\sigma_{m,z,d}$: 1.30 MPa

$$\sigma_{m,d} = |M_d| / W_{el}$$

Em que:

M_d : Momento fletor de cálculo

$M_{y,d}$: 0.00 kN·m

$M_{z,d}$: 0.13 kN·m

W_{el} : Módulo resistente elástico da secção transversal

$W_{el,y}$: 480.00 cm³

$W_{el,z}$: 100.00 cm³

O presente relatório não pode ser reproduzido, exceto na íntegra, sem o acordo escrito do ITeCons.

Pág. 17/44

$f_{c,0,d}$: Resistência de cálculo à compressão paralela ao fio, dada por:

$$f_{c,0,d} : \underline{9.69} \text{ MPa}$$

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \cdot f_{c,0,k} / \gamma_M$$

Em que:

k_{mod} : Fator de modificação pela duração da carga (Permanente) e o conteúdo de humidade (Classe de serviço 1)

$$k_{mod} : \underline{0.60}$$

$f_{c,0,k}$: Resistência característica à compressão paralela ao fio

$$f_{c,0,k} : \underline{21.00} \text{ MPa}$$

γ_M : Coeficiente parcial para as propriedades do material

$$\gamma_M : \underline{1.30}$$

$f_{m,d}$: Resistência de cálculo à flexão, dada por:

$$f_{m,y,d} : \underline{11.08} \text{ MPa}$$

$$f_{m,z,d} : \underline{13.80} \text{ MPa}$$

$$f_{m,d} = k_{mod} \cdot k_h \cdot f_{m,k} / \gamma_M$$

Em que:

k_{mod} : Fator de modificação pela duração da carga (Permanente) e o conteúdo de humidade (Classe de serviço 1)

$$k_{mod} : \underline{0.60}$$

$f_{m,k}$: Resistência característica à flexão

$$f_{m,k} : \underline{24.00} \text{ MPa}$$

k_h : Fator de altura, dado por:

$$k_{h,y} : \underline{1.00}$$

$$k_{h,z} : \underline{1.25}$$

Eixo y:

Para alturas (flexão) ou larguras (tração) de peças retangulares de madeira maciça superiores ou iguais a 150 mm:

$$k_h = 1.0$$

Eixo z:

Para alturas (flexão) ou larguras (tração) de peças retangulares de madeira maciça inferiores a 150 mm:

$$k_h = \min\{(150/h)^{0.2}; 1.3\}$$

Em que:

h : Altura em flexão ou maior dimensão da secção em tração

$$h : \underline{50.00} \text{ mm}$$

γ_M : Coeficiente parcial para as propriedades do material

$$\gamma_M : \underline{1.30}$$

k_m : Fator que tem em conta o efeito da redistribuição de tensões sob flexão desviada e a falta de homogeneidade do material na secção transversal

$$k_m : \underline{0.70}$$

k_c : Fator de instabilidade

$$k_{c,y} : \underline{1.00}$$

$$k_{c,z} : \underline{0.96}$$

Resistência ao esforço transversal e torsor combinados (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.7 - 6.1.8)

A verificação não é necessária, já que a barra não está submetida a momento torsor nem a esforço transversal.

3.1.3 Peça de madeira com 0.045 m de diâmetro (componente 3)

O tramo mais solicitado corresponde à barra N39-N38 (ver Figura 4).

Nós		Comprimento (m)	Características mecânicas			
Inicial	Final		Área (cm ²)	I _y ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _z ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _t ⁽²⁾ (cm ⁴)
N38	N37	0.600	15.90	20.13	20.13	40.26
Notas: (1) Inércia relativamente ao eixo indicado (2) Momento de inércia à torção uniforme						
		Encurvadura		Encurvadura lateral		
		Plano XY	Plano XZ	Banzo sup.	Banzo inf.	
<input type="checkbox"/>		1.00	1.00	0.00	0.00	
L _k		0.600	0.600	0.000	0.000	
C ₁		-		1.000		
Anotação: <input type="checkbox"/> : Coeficiente de encurvadura L _k : Comprimento de encurvadura (m) C ₁ : Fator de modificação para o momento crítico						

As verificações, em E.L.U., são abaixo indicadas:

Resistência à tração uniforme paralela ao fio (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.2)

A verificação não é necessária, já que não existe esforço axial de tração.

Resistência à compressão uniforme paralela ao fio (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.4 - 6.3.2)

Deve satisfazer:

Resistência da secção transversal à compressão

$$\eta = \frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \leq 1$$

η : 0.025 ✓

Resistência à encurvadura por flexão no eixo y

$$\eta = \frac{\sigma_{c,0,d}}{\chi_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1$$

η : 0.034 ✓

Resistência à encurvadura por flexão no eixo z

$$\eta = \frac{\sigma_{c,0,d}}{\chi_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1$$

η : 0.034 ✓

O esforço atuante de cálculo desfavorável produz-se para a combinação de ações PP+1.35·CARGA.

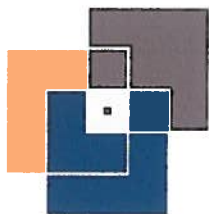
Em que:

$\sigma_{c,0,d}$: Tensão de cálculo à compressão paralela ao fio, dada por:

$\sigma_{c,0,d}$: 0.25 MPa

O presente relatório não pode ser reproduzido, exceto na íntegra, sem o acordo escrito do ITECons.

Pág. 19/44



$$\sigma_{c0,d} = |N_{c0,d}|/A$$

Em que:

$N_{c0,d}$: Compressão axial de cálculo paralela ao fio

A : Área da secção transversal

$f_{c0,d}$: Resistência de cálculo à compressão paralela ao fio, dada por:

$$f_{c0,d} = k_{mod} \cdot f_{c0,k} / \gamma_M$$

Em que:

k_{mod} : Fator de modificação pela duração da carga (Permanente) e o conteúdo de humidade (Classe de serviço 1)

$f_{c0,k}$: Resistência característica à compressão paralela ao fio

γ_M : Coeficiente parcial para as propriedades do material

Resistência à encurvadura: (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.3.2)

k_c : Fator de instabilidade, dado por:

$$\chi_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}}$$

Em que:

$$k = 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel} - 0.3) + \lambda_{rel}^2)$$

Em que:

β_c : Fator associado à retidão das peças

λ_{rel} : Esbelteza relativa, dada por:

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}}$$

Em que:

$E_{0,05}$: Valor do quinto percentil do módulo de elasticidade paralelo ao fio

$f_{c0,k}$: Resistência característica à compressão paralela ao fio

λ : Esbelteza mecânica, dada por:

$$\lambda = \frac{L_k}{i}$$

Em que:

L_k : Comprimento de encurvadura da barra

i : Raio de rotação

$$N_{c0,d} : 0.39 \text{ kN}$$

$$A : 15.90 \text{ cm}^2$$

$$f_{c0,d} : 9.69 \text{ MPa}$$

$$k_{mod} : 0.60$$

$$f_{c0,k} : 21.00 \text{ MPa}$$

$$\gamma_M : 1.30$$

$$k_{c,y} : 0.76$$

$$k_{c,z} : 0.76$$

$$k_y : 0.97$$

$$k_z : 0.97$$

$$\beta_c : 0.20$$

$$\lambda_{rel,y} : 0.90$$

$$\lambda_{rel,z} : 0.90$$

$$E_{0,05} : 7400.00 \text{ MPa}$$

$$f_{c0,k} : 21.00 \text{ MPa}$$

$$\lambda_y : 53.33$$

$$\lambda_z : 53.33$$

$$L_{k,y} : 600.00 \text{ mm}$$

$$L_{k,z} : 600.00 \text{ mm}$$

$$i_y : 11.25 \text{ mm}$$

$$i_z : 11.25 \text{ mm}$$

Resistência à flexão no eixo y (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.6 - 6.3.3)

Deve satisfazer:

Resistência da secção transversal à flexão:

$$\eta = \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.032} \quad \checkmark$$

O esforço atuante de cálculo desfavorável produz-se no nó N37, para a combinação de ações PP+1.35·CARGA.

Não se verifica a resistência à encurvadura lateral, já que o módulo resistente elástico da secção em relação ao eixo y é inferior ou igual ao módulo resistente elástico em relação ao eixo z.

Resistência da secção transversal à flexão:

$\sigma_{m,d}$: Tensão de cálculo à flexão, dada por:

$$\sigma_{m,y,d}^+ : \underline{0.36} \quad \text{MPa}$$

$$\sigma_{m,y,d}^- : \underline{0.00} \quad \text{MPa}$$

$$\sigma_{m,d} = |M_d| / W_{el}$$

Em que:

M_d : Momento fletor de cálculo

$$M_{y,d} : \underline{0.00} \quad \text{kN}\cdot\text{m}$$

W_{el} : Módulo resistente elástico da secção transversal

$$W_{el,y} : \underline{8.95} \quad \text{cm}^3$$

$f_{m,d}$: Resistência de cálculo à flexão, dada por:

$$f_{m,y,d} : \underline{11.08} \quad \text{MPa}$$

$$f_{m,d} = k_{mod} \cdot k_h \cdot f_{m,k} / \gamma_M$$

Em que:

k_{mod} : Factor de modificação para a duração da carga e o conteúdo de humidade

$$k_{mod} : \underline{0.60}$$

Em que:

Classe de duração da carga

$$\text{Classe} : \underline{\text{Permanente}}$$

Classe de serviço

$$\text{Classe} : \underline{1}$$

$f_{m,k}$: Resistência característica à flexão

$$f_{m,k} : \underline{24.00} \quad \text{MPa}$$

k_h : Factor de altura, dado por:

$$k_h : \underline{1.00}$$

Para secções não retangulares:

$$k_h = 1.0$$

γ_M : Coeficiente parcial para as propriedades do material

$$\gamma_M : \underline{1.30}$$

Resistência à flexão no eixo z (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.6 - 6.3.3)

A verificação não é necessária, já que não existe momento fletor.

Resistência ao esforço transversal no eixo y (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.7)

A verificação não é necessária, já que não existe esforço transversal.

Resistência ao esforço transversal no eixo z (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.7)

Deve satisfazer:

$$\eta = \frac{\tau_{v,d}}{f_{v,d}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.008} \quad \checkmark$$

O presente relatório não pode ser reproduzido, exceto na íntegra, sem o acordo escrito do ITECons.

Pág. 21/44

O esforço atuante de cálculo desfavorável produz-se no nó N38, para a combinação de ações 1.35·PP+1.35·CARGA.

Em que:

τ_d : Tensão de cálculo ao esforço transversal, dada por:

$$\tau_{z,d} : \underline{0.01} \text{ MPa}$$

$$\tau_d = \frac{4}{3} \cdot \frac{|V_d|}{A \cdot k_{cr}}$$

Em que:

V_d : Esforço transversal de cálculo

$$V_{z,d} : \underline{0.01} \text{ kN}$$

A : Área da secção transversal

$$A : \underline{15.90} \text{ cm}^2$$

k_{cr} : Fator que tem em conta a influência das fendas

$$k_{cr} : \underline{0.67}$$

$f_{v,d}$: Resistência de cálculo ao esforço transversal, dada por:

$$f_{v,d} : \underline{1.85} \text{ MPa}$$

$$f_{v,d} = k_{mod} \cdot f_{v,k} / \gamma_M$$

Em que:

k_{mod} : Fator de modificação pela duração da carga (Permanente) e o conteúdo de humidade (Classe de serviço 1)

$$k_{mod} : \underline{0.60}$$

$f_{v,k}$: Resistência característica ao esforço transversal

$$f_{v,k} : \underline{4.00} \text{ MPa}$$

γ_M : Coeficiente parcial para as propriedades do material

$$\gamma_M : \underline{1.30}$$

Resistência à torção (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.8)

A verificação não é necessária, já que não existe momento torsor.

Resistência à flexão desviada (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.6)

A verificação não é necessária, já que não existe flexão desviada para nenhuma combinação.

Resistência à flexão e tração axial combinadas (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.2.3)

A verificação não é necessária, já que não existe interação entre esforço axial de tração e momento fletor para nenhuma combinação.

Resistência à flexão e compressão axial combinadas (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.2.4)

O esforço atuante de cálculo desfavorável produz-se no nó N37, para a combinação de ações PP+1.35·CARGA.

Deve satisfazer:

Resistência da secção transversal à flexão e compressão combinadas

$$\eta = \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.033} \checkmark$$

$$\eta = \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.033} \checkmark$$

Resistência à encurvadura para flexão e compressão combinadas

$$\eta = \frac{\sigma_{c,0,d}}{\chi_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

η : 0.066 ✓

$$\eta = \frac{\sigma_{c,0,d}}{\chi_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

η : 0.066 ✓

Resistência à encurvadura lateral para flexão e compressão combinadas

Não é necessária a verificação de resistência à encurvadura lateral já que o comprimento de encurvadura lateral é nulo.

Em que:

$\sigma_{c,0,d}$: Tensão de cálculo à compressão paralela ao fio, dada por:

$\sigma_{c,0,d}$: 0.25 MPa

$$\sigma_{c,0,d} = |N_{c,0,d}|/A$$

Em que:

$N_{c,0,d}$: Compressão axial de cálculo paralela ao fio

$N_{c,0,d}$: 0.39 kN

A : Área da secção transversal

A : 15.90 cm²

$\sigma_{m,d}$: Tensão de cálculo à flexão, dada por:

$\sigma_{m,y,d}$: 0.36 MPa

$\sigma_{m,z,d}$: 0.00 MPa

$$\sigma_{m,d} = |M_d|/W_{el}$$

Em que:

M_d : Momento fletor de cálculo

$M_{y,d}$: 0.00 kN·m

$M_{z,d}$: 0.00 kN·m

W_{el} : Módulo resistente elástico da secção transversal

$W_{el,y}$: 8.95 cm³

$W_{el,z}$: 8.95 cm³

$f_{c,0,d}$: Resistência de cálculo à compressão paralela ao fio, dada por:

$f_{c,0,d}$: 9.69 MPa

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \cdot f_{c,0,k} / \gamma_M$$

Em que:

k_{mod} : Fator de modificação pela duração da carga (Permanente) e o conteúdo de humidade (Classe de serviço 1)

k_{mod} : 0.60

$f_{c,0,k}$: Resistência característica à compressão paralela ao fio

$f_{c,0,k}$: 21.00 MPa

γ_M : Coeficiente parcial para as propriedades do material

γ_M : 1.30

$f_{m,d}$: Resistência de cálculo à flexão, dada por:

$f_{m,y,d}$: 11.08 MPa

$f_{m,z,d}$: 11.08 MPa

$$f_{m,d} = k_{mod} \cdot k_h \cdot f_{m,k} / \gamma_M$$

Em que:

k_{mod} : Fator de modificação pela duração da carga (Permanente) e o conteúdo de humidade (Classe de serviço 1)

k_{mod} : 0.60

$f_{m,k}$: Resistência característica à flexão

$f_{m,k}$: 24.00 MPa

k_h : Fator de altura, dado por:

$k_{h,y}$: 1.00

$k_{h,z}$: 1.00

Eixo y:

Para secções não retangulares:



$$k_h = 1.0$$

Eixo z:

Para secções não retangulares:

$$k_h = 1.0$$

γ_M : Coeficiente parcial para as propriedades do material

$$\gamma_M : 1.30$$

k_m : Fator que tem em conta o efeito da redistribuição de tensões sob flexão desviada e a falta de homogeneidade do material na secção transversal

$$k_m : 1.00$$

k_c : Fator de instabilidade

$$k_{c,y} : 0.76$$

$$k_{c,z} : 0.76$$

Resistência ao esforço transversal e torsor combinados (Eurocódigo 5 EN 1995-1-1: 2004 + A1:2008: 6.1.7 - 6.1.8)

A verificação não é necessária, já que a barra não está submetida a momento torsor nem a esforço transversal.

3.1.4 Deslocamentos obtidos

Os deslocamentos obtidos nos nós (N2, N3, N38 e N39) dos elementos estruturais anteriormente analisados são os seguintes:

Deslocamentos dos nós, por ações							
Referência	Descrição	Deslocamentos em eixos globais					
		Dx (mm)	Dy (mm)	Dz (mm)	Gx (mRad)	Gy (mRad)	Gz (mRad)
N2	Peso próprio	0.000	0.000	-0.002	-	-	-
	CARGA	-0.001	0.000	-0.096	-	-	-
N3	Peso próprio	0.000	0.000	-0.002	0.000	-0.001	0.000
	CARGA	-0.001	0.000	-0.271	0.000	-0.500	0.000
N38	Peso próprio	0.000	0.000	-0.002	0.000	0.000	0.000
	CARGA	0.000	0.000	-0.202	0.000	0.000	0.000
N37	Peso próprio	0.000	0.000	-0.002	0.000	0.000	0.000
	CARGA	0.010	0.000	-0.231	0.000	0.099	0.000

A partir da análise da estrutura constituída por elementos de madeira e preenchida com fardos de palha, determinou-se a máxima carga vertical linearmente distribuída que pode ser aplicada no topo da estrutura. O valor da carga máxima vertical (não majorada) obtido é de 20kN/m.

3.2 - Geometria (comprimento, largura e espessura)

A determinação do comprimento e espessura dos fardos de palha de arroz foi realizada segundo as indicações da norma EN 822 [3] e a determinação da espessura de acordo com a norma EN 823 [4].

A medição destas características foi realizada em 3 fardos distintos (Figura 5).



Figura 5: Fardos de palha utilizados para a determinação das características geométricas.

Os resultados da determinação das características geométricas dos fardos de palha, nomeadamente comprimento e largura, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados da determinação do comprimento e largura dos fardos de palha.

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Média
Ref. ITeCons	ISO034A17.1	ISO034A17.2	ISO034A17.3	
Comprimento, l (mm)	615	570	590	592
Largura, b (mm)	420	415	410	415

Os resultados da determinação da espessura dos fardos de palha são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Resultados da determinação da espessura dos fardos de palha.

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Média
Ref. ITeCons	ISO034A17.1	ISO034A17.2	ISO034A17.3	
Espessura, d (mm)	295	300	305	300

3.3 - Massa volúmica aparente

A determinação da massa volúmica aparente dos fardos de palha de arroz foi realizada segundo as indicações da norma EN 1602 [5].

Foi registada a massa volúmica aparente em 5 provetes, previamente estabilizados à temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ e $(50 \pm 5)\%$ de humidade relativa até massa constante. Após a determinação das dimensões

lineares dos provetes, para cálculo do volume, foram feitas as pesagens dos provetes à temperatura de $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ e $(50\pm 5)\%$ de humidade relativa.

Os resultados da determinação da massa volúmica aparente dos fardos de palha são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados da determinação de massa volúmica aparente dos fardos de palha.

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5
Ref. ITeCons	ISO034A/17.1	ISO034A/17.2	ISO034A/17.3	ISO034A/17.4	ISO034A/17.5
Comprimento (mm)	615	570	590	610	610
Largura (mm)	420	415	410	415	430
Espessura (mm)	295	300	305	305	300
Volume (m³)	0.0762	0.0710	0.0738	0.0772	0.0787
Massa após condicionamento (g)	6246	5912	6042	6076	6482
Massa volúmica aparente (kg/m³)	82.0	83.3	81.9	78.7	82.4

De acordo com as medições realizadas, a massa volúmica aparente total é de 81.6 kg/m^3 .

3.4 - Estabilidade dimensional

Este ensaio é baseado na norma EN 1604: 2013 e consiste na determinação de variações dimensionais que se verificam quando os provetes, após condicionamento, são submetidos a ambientes específicos de temperatura e humidade relativa.

Foram preparados 3 provetes com dimensões $200 \times 200 \text{ mm}$, com uma massa volúmica aparente próxima dos fardos de palha de onde foram retiradas as amostras. Os provetes foram condicionados durante 48 horas a $(70\pm 2)^{\circ}\text{C}$ de temperatura e $(90\pm 5)\%$ de humidade relativa, de acordo com a tabela 2 da norma EN 13171:2013 [6].

As tabelas seguintes apresentam os resultados obtidos para os provetes de palha de arroz.

Tabela 5: Resultados dos ensaios de estabilidade dimensional dos provetes de palha de arroz.

Provetes Ref. ITeCons	Dimensões	Valor inicial (mm)	Valor final (mm)	Varição dimensional ($\Delta\epsilon$) (%)
ISO035A/17.1	comprimento (l)	201.0	195.0	-3.0
	largura (b)	212.6	218.4	2.7
	espessura (d)	62.8	72.4	15.3
ISO035A/17.2	comprimento (l)	209.4	204.6	-2.3
	largura (b)	220.0	225.4	2.5
	espessura (d)	71.2	78.6	10.4
ISO035A/17.3	comprimento (l)	211.4	209.0	-1.1
	largura (b)	215.6	219.0	1.6
	espessura (d)	66.6	78.0	17.1

Tabela 6: Variações dimensionais dos provetes da palha de arroz.

Provetes Ref. ITeCons	Varição dimensional comprimento, $\Delta\epsilon_l$ (%)	Varição dimensional largura, $\Delta\epsilon_b$ (%)	Varição dimensional espessura, $\Delta\epsilon_d$ (%)
ISO035A/17.1	-3.0	2.7	15.3
ISO035A/17.2	-2.3	2.5	10.4
ISO035A/17.3	-1.1	1.6	17.1
Média	-2.1	2.3	14.3

3.5 - Absorção de água

Esta propriedade descreve a capacidade do material absorver água líquida quando em contacto com a água, provocando uma variação de massa durante o processo de absorção e de secagem, sendo a sua quantificação relevante na caracterização de materiais higroscópicos.

A determinação de absorção de água por imersão parcial de curta duração foi realizada de acordo com a norma EN 1609 (método A) [6]. Neste ensaio, os provetes são colocados num tanque com a face inferior em contacto com a água, durante um período de 24 horas (Figura 6). Após este período, os provetes são retirados do tanque e o excesso de água é drenado. Após este processo, é determinada a variação da massa dos provetes.



Figura 6: Determinação da absorção de água por imersão parcial de curta duração dos provetes de fardos de palha de arroz.

Foram preparados 4 provetes com dimensões 200x200mm, com uma massa volúmica aparente próxima dos fardos de palha de onde foram retiradas as amostras. Os provetes foram estabilizados durante 6 horas a $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ e $(50\pm 5)\%$ de humidade relativa.

Os resultados dos ensaios de absorção de água por imersão parcial de curta duração são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Resultados dos ensaios de absorção de água por imersão parcial de curta duração.

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Média
Ref. ITECons	ISO033A/17.1	ISO033A/17.2	ISO033A/17.3	ISO033A/17.4	
Comprimento (mm)	222.0	220.0	215.0	190.0	212.0
Largura (mm)	171.0	190.0	196.0	215.0	193.0
Espessura (mm)	72.00	77.00	80.00	77.00	76.5
A_p (m²)	0.0380	0.0418	0.0421	0.0409	0.0407
Massa inicial, m_o (g)	107.1	117.2	120.1	122.9	116.8
Massa final, $m_{2\theta}$ (g)	249.1	270.4	268.1	276.1	265.9
W_p (kg/m²)	3.74	3.67	3.51	3.75	3.67

3.6 - Condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica de um material corresponde ao fluxo de calor que percorre 1m^2 de uma parede com 1 metro de espessura desse material, quando a diferença de temperatura entre as duas faces do material é de 1°C e exprime-se em $\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$.

O coeficiente de condutibilidade térmica do material foi determinado pelo método "Guarded Hot Plate". (ISO 8302 [7]), utilizando um equipamento da marca Lambda Mebtechnik GmbH Dresden, modelo Single Specimen Lambda-meter EP-500, seguindo os procedimentos de ensaio definidos na EN 12667 [7]. O equipamento quantifica o fluxo térmico em regime permanente que atravessa um provete colocado entre dois pratos, munidos de sensores térmicos. O objetivo do ensaio é reproduzir um fluxo de calor constante e unidirecional entre os dois pratos com dimensões $500\times 500\text{mm}$, embora o fluxo gerado pelo equipamento corresponda a uma área de $150\times 150\text{mm}$. Os limites dos pratos são constituídos por material isolante.

Os provetes em palha de arroz foram preparados de forma a garantir que o fluxo de calor atravessasse o material. Independentemente do isolamento conferido pelos limites dos pratos, os provetes foram igualmente isolados com uma moldura de EPS, de forma a garantir o sentido do fluxo e o isolamento em relação à temperatura ambiente (Figura 7).



Figura 7: Preparação de provetes para a determinação do coeficiente de condutibilidade térmica dos fardos de palha de arroz.

Assim, o volume dos provetes está fixado pelo espaço interior da moldura de EPS ($300\times 300\times 40\text{mm}$).

A quantidade de ensaios de condutibilidade térmica permitiu estabelecer os valores declarados definidos nas normas aplicáveis. Com esta finalidade, apresenta-se na Tabela 8 o cálculo dos valores de condutibilidade térmica ($\lambda_{90/90}$).

Tabela 8: Resultados dos ensaios de condutibilidade térmica ($\lambda_{90/90}$).

Provete	Condutibilidade Térmica a 10°C (seco) [W/(m.°C)]:
OMH100A/17.1	0,0397
OMH100A/17.2	0,0395
OMH100A/17.3	0,0384
OMH100A/17.4	0,0397
OMH100A/17.5	0,0400
OMH100A/17.6	0,0397
$\lambda_{10,seco}$	0,0395
Desv. Padrão	0,0006
k (6 provetes)	2,49
$\lambda_{10,seco,90/90}$	0,0409

3.7 - Transmissão de vapor de água

As características de transmissão de vapor de água dos materiais é um parâmetro essencial para a modelação da transferência de vapor nos elementos construtivos, sendo especialmente relevante em materiais higroscópicos, como é o caso da palha de arroz, e é dado pelo fator de resistência à difusão do vapor de água (μ). Este parâmetro expressa a relação adimensional entre permeabilidade ao vapor de água do ar e a permeabilidade ao vapor de água do próprio material (π). O coeficiente de permeabilidade ao vapor de água representa a quantidade de vapor de água que, por unidade de tempo e espessura, atravessa por difusão um provete desse material, quando sujeito a uma diferença de pressão de vapor unitária entre as duas faces e é expresso em kg/(m.s.Pa).

A determinação da resistência à transmissão do vapor de água foi realizada de acordo com a norma EN 12086 [3]. O ensaio foi realizado a temperatura constante (23 ± 1)°C e humidade relativa (50 ± 3)%. Os provetes são inseridos numa moldura metálica, com dimensões 100x100mm, que é colocada e selada sobre uma tina com sílica gel, de forma a garantir um fluxo de humidade descendente. São registadas medições sucessivas da massa do conjunto, até obter 5 medições com variação de massa inferior a 5%.

Seguindo as indicações da norma, foram preparados 5 provetes com dimensões 100x100mm e 50mm de espessura, com uma massa volúmica aparente próxima dos fardos de palha de onde foram retiradas as amostras (Figura 8).

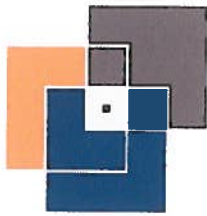


Figura 8: Ensaio de determinação das propriedades de transmissão do vapor de água.

Os resultados dos ensaios de resistência à transmissão do vapor de água da palha de arroz são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Resultados dos ensaios de determinação da resistência à transmissão do vapor de água da palha de arroz.

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5	Média
Ref. ITeCons	ISO032A/17.1	ISO032A/17.2	ISO032A/17.3	ISO032A/17.4	ISO032A/17.5	
Largura (mm)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Comprimento (mm)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Espessura (mm)	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00
Área média, A (m²)	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
Velocidade de transmissão do vapor de água, g [mg/(h.m²)]	6440.64	6669.19	5872.10	5749.79	5929.06	6132.16
Permeância ao vapor de água, W [mg/(m².h.Pa)]	4.60	4.76	4.19	4.11	4.24	4.38
Resistência ao vapor de água, Z [(m².h.Pa)/mg]	0.22	0.21	0.24	0.24	0.24	0.23



Permeabilidade ao vapor de água, δ [mg/(m.h.Pa)]	0.23	0.24	0.21	0.21	0.21	0.22
Fator de resistência à difusão de vapor de água, μ [-]	3.09	2.98	3.39	3.46	3.35	3.25
Espessura de ar equivalente à resistência à difusão do vapor de água, S_d [m]	0.15	0.15	0.17	0.17	0.17	0.16

3.8 - Curvas higroscópicas

A higroscopicidade representa a capacidade dos materiais adsorverem e restituírem vapor de água a partir da humidade ambiente. Os materiais podem, também, conter água na sua estrutura em diferentes quantidades e para diferentes situações de temperatura e humidade relativa. Assim, é possível definir valores do teor de humidade de equilíbrio do material para diferentes condições de humidade relativa e para uma temperatura constante, sendo estas variações designadas por curvas higroscópicas.

A determinação das curvas higroscópicas foi realizada de acordo com a norma EN ISO 12571 [6]. Para a determinação das curvas de adsorção, os provetes são secos até massa constante, sendo posteriormente colocados numa série de diferentes ambientes com temperatura constante [(23±0.5)°C] e com a humidade relativa a aumentar por etapas. O teor de humidade é determinado quando se atinge o equilíbrio em cada ambiente. O ponto de partida da desadsorção é uma humidade relativa de 95%, podendo coincidir com o último ponto da curva de adsorção. Os provetes são colocados consecutivamente numa série de diferentes ambientes, sempre com temperatura constante mas com a humidade relativa a diminuir por etapas. À semelhança das curvas de adsorção, o teor de humidade é determinado quando se atinge o equilíbrio em cada ambiente. Assim, a curva de desadsorção é traçada após a definição do teor de humidade de cada humidade relativa.

Foram preparados 4 provetes com uma massa mínima de 10g, previamente secos até massa constante (Figura 9).



Figura 9: Ensaio de determinação das curvas higroscópicas da palha de arroz.

As curvas de adsorção e desadsorção que resultam do ensaio descrito são apresentadas na **Figura 10**.

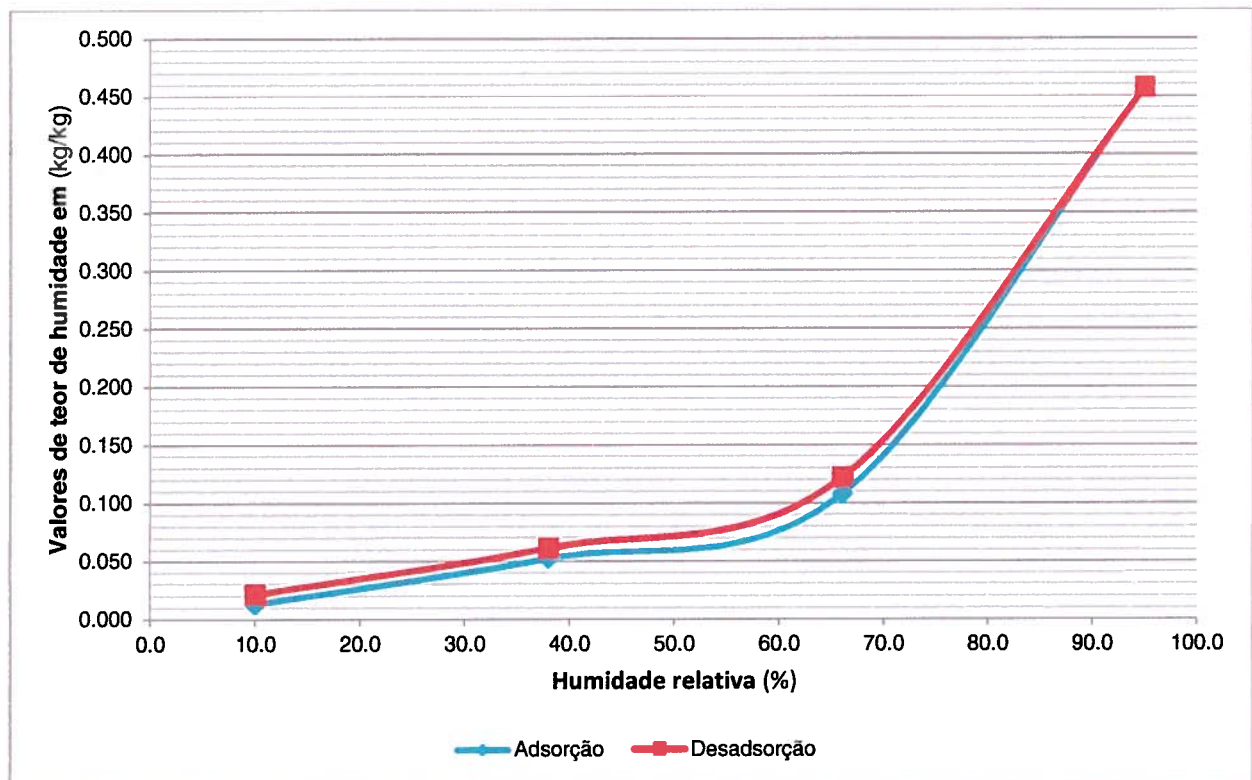


Figura 10: Determinação das curvas higroscópicas: de adsorção (a azul) e de desadsorção (a vermelho).

3.9 - Resistência ao crescimento de fungos

A exposição da palha de arroz a ambientes com elevados teores de humidade poderá criar condições favoráveis ao crescimento biológico. A determinação da resistência à degradação biológica pelo crescimento de fungos é um parâmetro relevante na caracterização de soluções construtivas constituídas com fibras vegetais, como é o caso da palha de arroz.

De modo a determinar a resistência das amostras ao crescimento de fungos, foram preparados 2 provetes de palha de arroz, em caixas em grelha de aço inoxidável, com dimensões 10x10mm e foram mantidos a $(23\pm 2)^\circ\text{C}$, num ambiente com elevado teor de humidade, durante 28 dias. Após este período de tempo, os provetes foram inspecionados visualmente (Figura 11) e com recurso a um microscópio estereoscópico (Figura 12), para avaliar a presença de fungos.

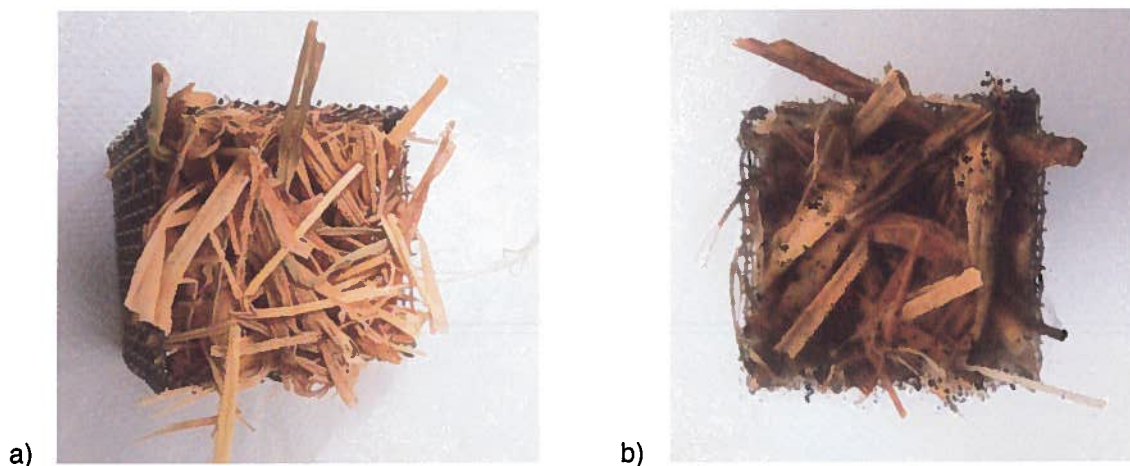


Figura 11: Determinação da resistência ao crescimento de fungos da palha de arroz: registo fotográfico dos provetes no início (a) e no fim (b) do ensaio.

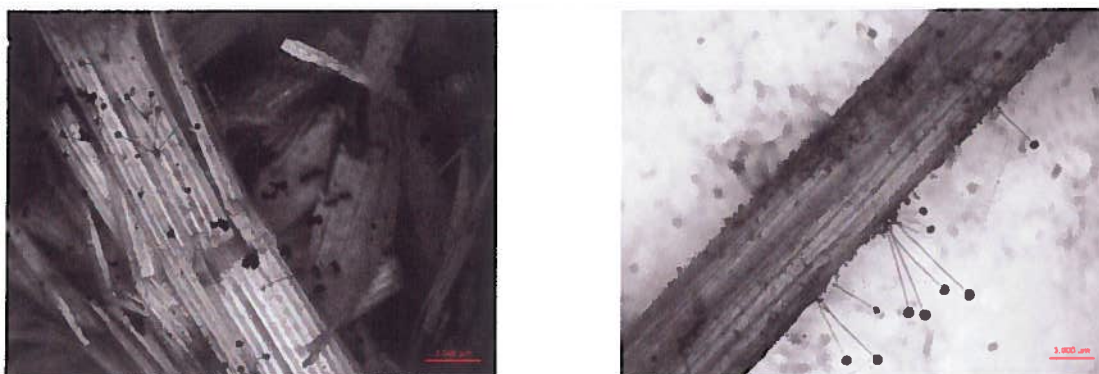


Figura 12: Determinação da resistência ao crescimento de fungos da palha de arroz: registo por microscópio estereoscópico.

A presença de fungos foi expressa de acordo com as indicações da norma EN ISO 846 [8], que se apresenta na Tabela 10.

Tabela 10: Resultados da avaliação do crescimento fúngico nos provetes ensaiados, de acordo com as indicações da EN ISO 846 [8].

Provetes Ref. ITeCons	Intensidade de crescimento *	Observações
QUI478A/17.1	3	Crescimento visível a olho nu, cobrindo 50% da superfície teste.
QUI478A/17.2	3	Crescimento visível a olho nu, cobrindo 50% da superfície teste.

* Categorias de intensidade do crescimento:

0 - Não existe crescimento visível ao microscópio; 1 - Não existe crescimento visível a olho nu, mas visível ao microscópio; 2 - Crescimento visível a olho nu, cobrindo mais do que 25% da superfície de teste; 3 - Crescimento visível a olho nu, cobrindo até 50% da superfície de teste; 4 - Crescimento considerável, cobrindo mais do que 50% da superfície de teste; 5 - Crescimento muito forte, cobrindo toda a superfície de teste.

3.10 - Resistência ao fluxo de ar

A resistência ao fluxo de ar de materiais porosos ou fibrosos indica, de uma maneira indireta, algumas das propriedades da sua estrutura. Esta propriedade traduz a capacidade que o material tem de resistir à passagem de um fluxo de ar. Pode ser usada para estabelecer correlações entre a estrutura dos materiais e algumas das suas propriedades acústicas (ex: absorção, atenuação, etc.). Por esta razão, a resistência ao fluxo de ar é um parâmetro relevante na análise da qualidade acústica dos painéis constituídos por fardos de palha de arroz.

A determinação da resistência ao fluxo de ar foi realizada de acordo com as indicações da norma ISO 9053 [9]. Para este ensaio, os provetes devem ser colocados no interior de um cilindro em alumínio, com um diâmetro interior de 100mm, onde será realizado o ensaio.

Foram preparados 9 provetes que, devido às características da palha de arroz, e de forma a garantir uma massa volúmica aparente próxima dos fardos de palha de onde foram retiradas as amostras, foram cortados e colocados diretamente no interior do cilindro para a realização do ensaio (**Figura 13**).

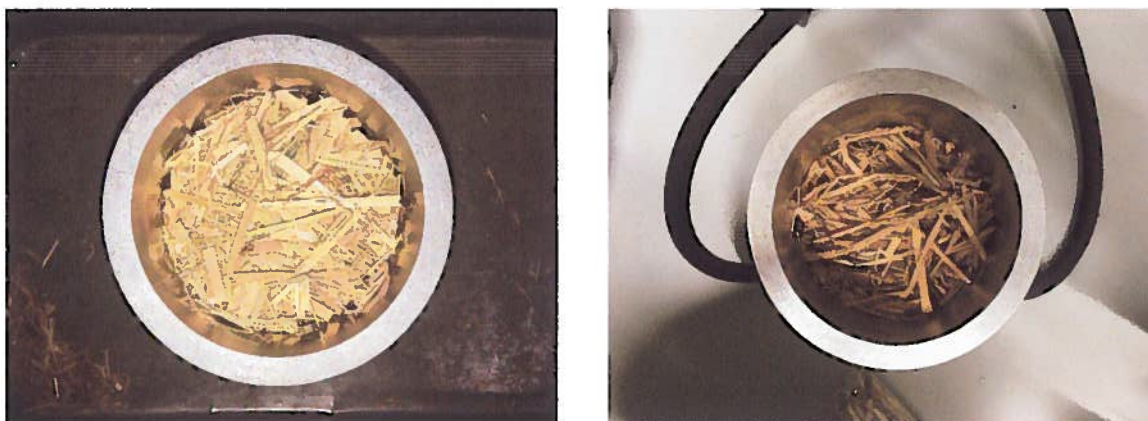


Figura 13: Determinação da resistência ao fluxo de ar: preparação dos provetes com palha de arroz.

Provetes	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Massa, m (g)	62.59	63.18	64.12	62.91	59.54	63.76	63.97	63.45	63.49
Espessura média (mm)	97.02	100.28	99.08	100.35	100.56	100.05	100.33	100.27	99.30
Massa vol. aparente (kg/m ³)	82.1	80.2	82.4	79.8	75.4	81.1	81.2	80.6	81.4
r (Pa.s/m ²)	618.62	1546.38	1104.84	908.67	931.37	936.44	1192.34	871.65	841.06

De acordo com os ensaios realizados, a resistividade ao fluxo de ar (r) é de 0.995×10^3 kPa.s/m², com um desvio padrão de 0.262×10^3 kPa.s/m².

3.11 - Reação ao fogo

Os ensaios de reação ao fogo têm como objetivo a avaliação da contribuição dos materiais numa fase de ignição e propagação inicial de incêndio, pretendendo-se avaliar várias propriedades.

A verificação da classe de reação do fogo foi realizada através de ensaios de ignitabilidade (EN ISO 11925-2 [10]) e de ensaio de elemento isolado em combustão (EN 13823 [11]), ou "Single Burning Item" (SBI), tendo em vista a verificação da classe D de reação ao fogo (de acordo com os critérios de classificação descritos na norma EN 13501-1 [12] (Tabela 11)).



Tabela 11: Classes de reação ao fogo de produtos de construção, excluindo os destinados a revestimentos de pisos e produtos de isolamento térmico em tubos lineares.

Classe	Método(s) de ensaio	CrITÉrios de classificação	Classificação complementar
A1	EN ISO 1182 (*) e	$\Delta T \leq 30$ °C; e $\Delta m \leq 50$ %; e $t_f = 0$ s (isto é, sem chamas persistentes)	-
	EN ISO 1716	$PCS \leq 2,0$ MJ/kg ^{a)} e $PCS \leq 2,0$ MJ/kg ^{b)} e $PCS \leq 1,4$ MJ/m ² d) ^{c)} e $PCS \leq 2,0$ MJ/kg ^{c)}	-
A2	EN ISO 1182 (*) ou	$\Delta T \leq 50$ °C; e $\Delta m \leq 50$ %; e $t_f \leq 20$ s	-
	EN ISO 1716 e	$PCS \leq 3,0$ MJ/kg ^{a)} e $PCS \leq 4,0$ MJ/m ² b) ^{c)} e $PCS \leq 4,0$ MJ/m ² d) ^{c)} e $PCS \leq 3,0$ MJ/kg ^{c)}	-
	EN 13823	$FIGRA \leq 120$ W/s e $LFS <$ bordo do provete e $THR_{600s} \leq 7,5$ MJ	Produção de fumo ^{h)} e gotas/partículas inflamadas ^{g)}
B	EN 13823 e	$FIGRA \leq 120$ W/s e $LFS <$ bordo do provete e $THR_{600s} \leq 7,5$ MJ	Produção de fumo ^{h)} e gotas/partículas inflamadas ^{g)}
	EN ISO 11925-2 ^{h)} : Exposição = 30 s	$F_s \leq 150$ mm em 60 s	
C	EN 13823 e	$FIGRA \leq 250$ W/s e $LFS <$ bordo do provete e $THR_{600s} \leq 15$ MJ	Produção de fumo ^{h)} e gotas/partículas inflamadas ^{g)}
	EN ISO 11925-2 ^{h)} : Exposição = 30 s	$F_s \leq 150$ mm em 60 s	
D	EN 13823 e	$FIGRA \leq 750$ W/s	Produção de fumo ^{h)} e gotas/partículas inflamadas ^{g)}
	EN ISO 11925-2 ^{h)} : Exposição = 30 s	$F_s \leq 150$ mm em 60 s	
E	EN ISO 11925-2 ^{h)} : Exposição = 15 s	$F_s \leq 150$ mm em 20 s	gotas/partículas inflamadas ^{h)}
F	desempenho não-determinado		

a) Para produtos homogéneos e componentes substanciais de produtos não-homogéneos.
b) Para qualquer componente não-substancial externo de produtos não-homogéneos.
c) Alternativamente, qualquer componente não-substancial externo com um $PCS \leq 2,0$ MJ/m², desde que o produto satisfaça aos seguintes critérios da EN 13823: $FIGRA \leq 20$ W/s, e $LFS <$ bordo do provete, e $THR_{600s} \leq 4,0$ MJ, e s1, e d0.
d) Para qualquer componente não-substancial interno de produtos não-homogéneos.
e) Para o produto como um todo.
f) Na última fase do desenvolvimento do procedimento de ensaio foram introduzidas modificações ao sistema de medição de fumo, cujo efeito necessita de investigação adicional, o que poderá resultar numa modificação dos valores limites e/ou parâmetros de avaliação da produção de fumo.
s1 = $SMOGR_A \leq 30$ m²/s² e $TSP_{600s} \leq 50$ m²; s2 = $SMOGR_A \leq 180$ m²/s² e $TSP_{600s} \leq 200$ m²; s3 = nem s1 nem s2
g) d0 = Não se verifica a libertação de gotas/partículas inflamadas em 600 s, de acordo com a EN 13823;
d1 = Não se verifica a libertação de gotas/partículas inflamadas com duração superior a 10 s, no período de 600 s, de acordo com a EN 13823;
d2 = nem d0 nem d1; A ignição do papel no ensaio da EN ISO 11925-2 resulta numa classificação d2
h) Aprovação = não ocorrência de ignição do papel (sem classificação);
Reprovação = ignição do papel (classificação d2).
i) Sob condições de ataque da superfície pela chama e, se adequado a utilização final do produto, ataque do bordo pela chama.

3.11.1 Ensaios de ignitabilidade

Este ensaio incide na determinação da extensão da propagação da chama (F_s) em intervalos de tempo definidos, de acordo com a norma EN ISO 11925-2:2010 [10]. Para a verificação da classe D de reação ao fogo, deverá ser aplicada uma pequena chama na face principal e o tempo de aplicação da chama é de 30 segundos. A propagação da chama não poderá exceder os 150mm de altura, a partir do ponto de aplicação, num intervalo de 60 segundos após a aplicação da chama.

Uma vez que o provete consiste em derivados de partículas soltas, são aplicados requisitos específicos para a preparação de provetes e para a aplicação da chama. De acordo com as indicações da norma ISO 11925-2, os provetes devem ser colocados no interior de suportes com características e dimensões definidas (**Figura 14**), procurando reproduzir a massa volúmica aparente dos fardos de palha de arroz.

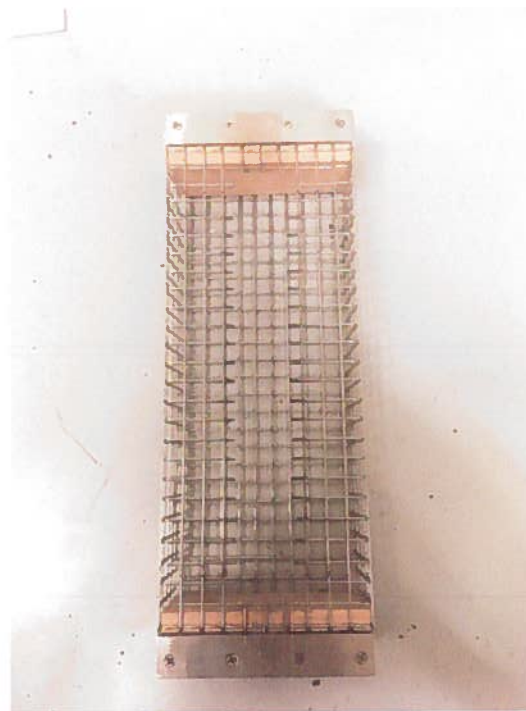


Figura 14: Suporte para provetes derivados de partículas soltas, como é o caso da palha de arroz.

Foram preparados 6 provetes considerando as dimensões interiores do suporte apresentado – 34x87x199mm -, de forma a garantir uma massa volúmica aparente próxima dos fardos de palha de onde foram retiradas. Tendo em conta a configuração do suporte, o ensaio foi realizado apenas na face principal do provete (**Figura 15**), de acordo com as indicações da norma.



Figura 15: Provete de palha de arroz antes (à esquerda) e depois (à direita) do ensaio de ignitabilidade.

Os resultados dos ensaios de ignitabilidade são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Resultados dos provetes de palha de arroz ao ensaio de ignitabilidade e respetiva classificação à reação ao fogo.

Provete	Propagação da chama inferior a 150 seg.	Ocorrência de queda de gotas e de partículas inflamadas
1	sim	não
2	sim	não
3	sim	não
4	sim	não
5	sim	não
6	sim	não

3.11.2 Ensaio SBI

Este ensaio incide na determinação do calor libertado (THR_{600s}), da produção total de fumo (TSP_{600s}), durante 600 segundos, e da propagação lateral da chama (LFS), seguindo as instruções da norma EN 13823 [11]. Durante o ensaio é, ainda, avaliada a taxa de desenvolvimento do fogo (FIGRA) e a taxa de desenvolvimento de fumo (SMOGRA), sendo também registada a ocorrência de queda de gotas e partículas inflamadas. No caso de se pretender a obtenção de classe D, será necessário que o FIGRA seja igual ou inferior a 750.

O ensaio consiste na avaliação de diversos aspetos do desempenho ao fogo de um provete de grandes dimensões, ao qual é submetido à ação das chamas de um queimador de gás debitando uma potência térmica nominal de 30 kW.

O ensaio de SBI tem como referência uma situação de fogo num compartimento em que o produto aplicado numa circunstância particularmente desfavorável (formando um canto ou aplicado num canto) é objeto de ataque direto pelas chamas e pela radiação térmica originada pela combustão de um elemento ou componente isolado (como, por exemplo, uma pequena peça de mobiliário ou cesto de papéis). Ilustra-se na **Figura 4** o equipamento existente no ITeCons para a realização deste ensaio e um provete de palha de arroz no equipamento de SBI, antes do início do respetivo ensaio.

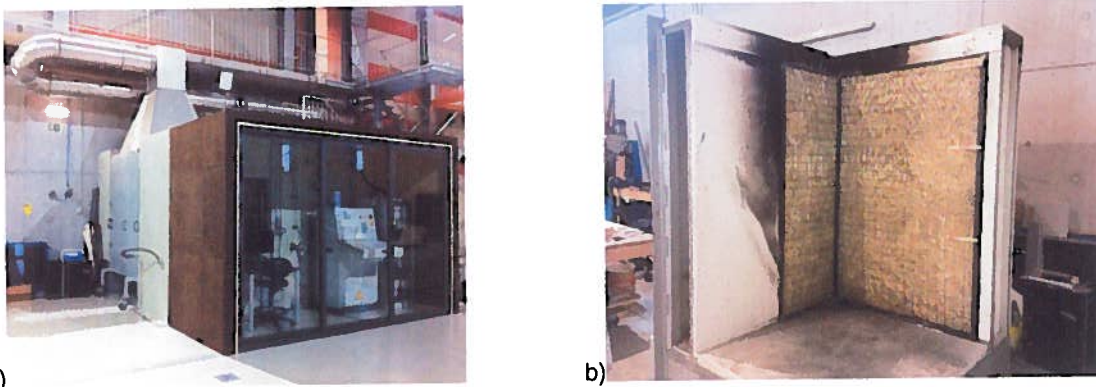


Figura 16: Equipamento para o ensaio de SBI: a) instalação laboratorial do ITeCons; b) provete instalado, antes da realização do ensaio.

Após o primeiro ensaio de SBI com o provete de palha de arroz, o valor de FIGRA obtido foi muito superior ao valor limite para a classe D – mais de 2000 de FIGRA, não verificando esta classe de reação ao fogo. Uma vez que o valor limite deste parâmetro para a classe D é de 750, a palha de arroz, com provetes com massa volúmica aparente semelhante às dos fardos de onde foram retiradas as amostras, foi classificada como classe E.

3.12 - Resistência ao fogo

Os ensaios de resistência ao fogo são realizados de acordo com a norma EN 1365-1 [7].

Do ponto de vista da segurança contra incêndio, os elementos da construção podem ter função de suporte, de compartimentação ou ambas. Tendo em vista estes requisitos, os critérios fundamentais para caracterizar a resistência ao fogo são os seguintes:

- Capacidade de suporte de carga (representado por R);
- Estanquidade às chamas e gases quentes (representado por E);
- Isolamento térmico (representado por I).

Tendo em conta a função do elemento construtivo, os painéis com madeira e palha de arroz devem ser respeitar as exigências apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13: Exigências de resistência ao fogo tendo em conta a função do elemento construtivo.

Funções do elemento	Exigências		
	Estabilidade - R	Estanquidade - E	Isolamento térmico - I
Suporte	R	-	-
Compartimentação	-	E	-
		Ei	
Suporte e compartimentação	RE		-
	REI		

O ensaio foi realizado num painel com estrutura de madeira e isolamento em palha de arroz com as dimensões apresentadas na **Figura 1** (no início deste relatório), revestido em ambas as faces com argamassa à base de argila com 25mm de espessura.

O provete foi preparado com dimensões exteriores de 2725x2450mm e o ensaio foi realizado com uma carga aplicada de 13.3kN/ml e um total de 32,56kN, centrada sobre a parte superior do provete. O provete foi condicionado previamente durante 13 dias a uma temperatura média de 25°C e humidade relativa média de 63%. O ensaio foi realizado a uma temperatura ambiente de 24°C e humidade relativa de 73%.

O tempo de duração do ensaio foi de 120 minutos. Ao fim deste tempo, o provete manteve os critérios de estabilidade (R), estanquidade (E) e isolamento térmico (I), obtendo uma classificação de resistência ao fogo REI 120.

3.13 - Resistência à tração dos cordões

Os cordões têm como função fixar os fardos de palha de arroz durante o manuseamento e o transporte dos mesmos. Uma vez que a palha é comprimida até serem obtidas as dimensões finais, os cordões e os respetivos nós estão sujeitos a forças de tração consideráveis.

Para ensaiar a resistência à tração dos laços em cordel retirados de fardos de palha de arroz, incluindo os nós, os cordões foram colocados no equipamento de tração conforme apresentado na Figura 17. Os roletes de suporte em aço onde é feito o "loop" dos cordões tem um diâmetro de 8mm e devem estar colocados de modo a permitir uma livre rotação dos mesmos.



Figura 17: Ensaio de resistência à tração dos cordões.

Foram ensaiados 6 cordões, removidos dos fardos de palha de arroz. Antes do ensaio, os cordões foram condicionados durante 6 horas a $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ de temperatura $(50\pm 5)\%$ de humidade relativa.

O ensaio foi realizado a $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ de temperatura $(50\pm 5)\%$ de humidade relativa. A velocidade de deslocamento vertical do veio superior, para tração do cordão, foi de $10\text{mm}/\text{min}$ ($\pm 10\%$), tendo em consideração as indicações da norma EN 1608 [13].

Os resultados dos ensaios aos cordões são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14: Resultados dos ensaios de resistência à tração dos cordões ensaiados.

Provetes Ref. ITeCons	Comprimento (mm)	Força máxima (kN)	Modo de rotura
OMC054A/17.2	687	2.973	Rotura dentro do nó
OMC054A/17.3	711	2.605	Rotura dentro do nó
OMC054A/17.4	722	2.832	Rotura dentro do nó
OMC054A/17.5	673	2.726	Rotura junto ao nó
OMC054A/17.6	722	2.510	Rotura junto ao nó
OMC054A/17.7	722	2.801	Rotura junto ao nó

A partir destes resultados, a força média registada é de 2.743kN.

4 - Considerações finais

Tão importante como a produção e utilização racional da energia, é a energia que se estima ser incorporada nos materiais e produtos ao longo dos seus ciclos de vida, por via das matérias-primas extraídas, processo de fabrico, transporte, desempenho, durabilidade e condições de eliminação. A incorporação de materiais naturais e disponíveis em território nacional, como é o caso da palha de arroz, em soluções construtivas modulares permitirá contribuir para o desenvolvimento de uma indústria da construção mais sustentável. Para além disso, as características de isolamento conferidas pela palha de arroz permitem o desenvolvimento de painéis modulares que poderão contribuir para uma maior eficiência energética e uma maior sustentabilidade dos edifícios.

Desta forma, o desenvolvimento de novos produtos com menor incorporação de energia e menor impacto ambiental beneficiará do esforço de valorização de resíduos, do incremento de durabilidade dos sistemas, bem como do respetivo aumento de eficiência e desempenho.

A realização deste trabalho irá permitir à empresa ILOS a aquisição de novas competências pelo desenvolvimento de produtos diferenciados e com potencial competitivo no mercado global, promovendo o crescimento da empresa numa área estratégica para a indústria da construção.

Coimbra, 16 de junho de 2017

Autoria técnica do relatório:

Prof.^a Julieta António:


Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico
Prof. Doutor António Fedeu
Presidente da Direção do ITeCons

Colaboração técnica:

Arq.^a Beatriz Marques:



Referências

- [1] CEN - European Committee for Standardization, EN 1995-1-1 - Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings, (2004).
- [2] CEN - European Committee for Standardization, EN 338 - Structural timber - Strength classes, (2016).
- [3] CEN - European Committee for Standardization, EN 12086 - Thermal insulating products for building applications - Determination of water vapour transmission properties, (2013).
- [4] CEN - European Committee for Standardization, EN 822 - Thermal insulating products for building applications - Determination of length and width, (2013).
- [5] CEN - European Committee for Standardization, EN 1602 - Thermal insulating products for building applications - Determination of the apparent density, (2013).
- [6] CEN - European Committee for Standardization, EN 13171 - Thermal insulation products for buildings - Factory made wood fibre (WF) products - Specification, (2013).
- [7] ISO - International Organization for Standardization, ISO 8302 - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Guarded hot plate apparatus, (1991).
- [8] CEN - European Committee for Standardization, EN ISO 846 - Plastics - Evaluation of the action of microorganisms, (1997).
- [9] ISO - International Organization for Standardization, ISO 9053 - Acoustics - Materials for acoustical applications - Determination of airflow resistance, (1991).
- [10] ISO - International Organization for Standardization, ISO 11925-2 - Reaction to fire tests - Ignitability of products subjected to direct impingement of flame - Part 2: Single-flame source test, (2010).
- [11] CEN - European Committee for Standardization, EN 13823 - Reaction to fire tests for building products - Building products excluding floorings exposed to the thermal attack by a single burning item, (2014).
- [12] CEN - European Committee for Standardization, EN 13501-1 - Fire classification of construction products and building elements - Classification using test data from reaction to fire tests, (2009).
- [13] CEN - European Committee for Standardization, EN 1608 - Thermal insulating products for building applications - Determination of tensile strength parallel to faces, (2013).