



TecMinho Universidade do Minho 4800-058 Guimarães – Portugal Tel.: +351 253 510 590 Fax: +351 253 510 591

Avaliação experimental da unidade ISOLAM W180 e modelação numérica dos painéis CRIPTOLAM F210 e ISOLAM R230

O presente trabalho foi realizado por solicitação de:



Rusticasa - Construções em madeira



Índice

1.	IN	TRODUÇÃO	. 3
2.	CA	MPANHA EXPERIMENTAL	.3
	2.1.	RESISTÊNCIA AO CORTE DA MADEIRA DE CRIPTOMÉRIA	4
	2.2.	LIGAÇÃO COLADA	5
	2.3.	Resistência à compressão no plano do ISOLAM W180	6
	2.3.1	. CARGA APLICADA NO ELEMENTO SUPERIOR DE MADEIRA	6
	2.3.2	. CARGA UNIFORMEMENTE APLICADA NO TOPO DA UNIDADE ISOLAM W180	7
	2.3.3	. CARGA UNIFORMEMENTE APLICADA NO TOPO DE DUAS UNIDADES ISOLAM W180 SOBREPOSTAS	8
3.	M	ODELAÇÃO NUMÉRICA	. 8
	3.1.	CRIPTOLAM F210	11
	3.2.	ISOLAM R230 1	12
4.	RE	SULTADOS	13
	4.1.	CAMPANHA EXPERIMENTAL	13
	4.2.	Modelação numérica	18
5.	VE	RIFICAÇÕES ADICIONAIS 2	24
6.	cc	DNCLUSÕES	26



1. Introdução

A empresa *Rusticasa – Construções em madeira* solicitou à Universidade do Minho a realização de uma campanha experimental para análise da unidade ISOLAM W180, de forma a criar um novo sistema construtivo de parede. O novo sistema desenvolvido pela empresa prevê a melhoria do comportamento térmico através do enchimento da secção oca com cortiça e a ligação vertical sobreposta denteada entre elementos internos. Por outro lado, foi também facultada a realização da modelação numérica dos painéis CRIPTOLAM F210 e ISOLAM R230.

Os trabalhos foram efetuados com base nos seguintes elementos:

- Norma ASTM D143 14 Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber;
- Norma EN 408:2010 Timber structures Structural timber and glued laminated timber Determination of some physical and mechanical properties;
- Eurocódigo 1 Ações em estruturas Parte 1-1: Ações gerais Pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios;
- Eurocode 5 Design of timber structures Part 1-1: General Common rules and rules for buildings;
- Peças desenhadas ISOLAM W180, CRIPTOLAM F210 e ISOLAM R230.

Numa primeira fase, foram analisadas as várias ligações ao corte constituintes do sistema, e de seguida, a avaliação da resistência à compressão de uma unidade e duas unidades sobrepostas, para avaliação do comportamento da ligação prevista denteada. Para tal, e como este sistema prevê uma camada interior de aglomerado de cortiça expandida (ICB), foi avaliada o efeito da sua presença em termos mecânicos.

Terminada a campanha experimental, procedeu-se então à modelação dos painéis, CRIPTOLAM F210 e ISOLAM R230, através de um software de cálculo automático baseado nos modelos de elementos finitos.

Por fim, efetuada a campanha experimental e a modelação numérica foi ainda solicitada pela empresa, a realização da avaliação de segurança da cantoneira metálica de suporte à laje CRIPTOLAM F210 e a validação de um apoio de uma viga de cumeeira nas paredes interiores W90 e exteriores W180.

2. Campanha experimental

As paredes do sistema construtivo proposto pela empresa Rusticasa consiste num elemento individual de secção oca, similar a um tronco, que resulta da colagem de quatro elementos de madeira Criptoméria (*Cryptomeria japonica*). Este elemento oco de madeira é preenchido por ICB (Insulation Cork Board), cortiça, o que resulta na melhoria das propriedades térmicas (capacidade isolamento) das paredes e, por outro lado, na redução da quantidade de madeira necessária (ver Figura 1). A solução final é constituída por elementos de madeira com 40 mm de espessura em todo



o seu perímetro, em que a sobreposição (na vertical) das várias unidades é materializada por uma ligação denteada, como ilustra a Figura 1.



Figura 1: Unidade ISOLAM W180. Vista geral e pormenor da ligação denteada idealizada para a sobreposição na vertical das unidades.

Para avaliação mecânica da unidade ISOLAM W180 definiu-se como necessários os seguintes ensaios:

- 1. Avaliação da resistência ao corte da madeira de criptoméria, uma vez que o comportamento das ligações coladas é função desta propriedade;
- 2. Avaliação da resistência ao corte da ligação colada, madeira-madeira, uma vez que subsistem dúvidas sobre a sua eficiência;
- Avaliação da resistência à compressão no plano do ISOLAM W180, assumindo duas situações de aplicação de carga: aplicada apenas no elemento de madeira do topo e uniformemente distribuída aplicada sobre o mesmo elemento;
- Avaliação da resistência à compressão no plano de duas unidades ISOLAM W180 para aferição do comportamento da ligação denteada.

Nos ensaios das unidades ISOLAM W180, foram ainda avaliados os eventuais efeitos da presença do ICB no interior destes elementos, tendo sido realizados ensaios com e sem ICB para efeitos de comparação.

2.1. Resistência ao corte da madeira de criptoméria

Numa primeira fase foi quantificada a resistência ao corte da madeira de criptoméria. Esta propriedade mecânica é importante na avaliação das ligações coladas que constituem a unidade ISOLAM W180. E, no caso da espécie de madeira *(Cryptomeria japónica)* proveniente dos Açores, os resultados disponíveis na bibliografia são escassos, pelo que se decidiu avançar para a quantificação desta propriedade através de ensaios de corte segundo a norma ASTM D143.

Os esquemas de ensaios e a geometria dos provetes utilizados obedecem ao definido pela ASTM D143. Nos ensaios utilizou-se um atuador com uma capacidade máxima de 200kN sob uma velocidade de aplicação da carga de 0.01mm/s. No total foram analisados 10 provetes, com a geometria da Figura 2.





Figura 2: Geometria dos provetes e setup utilizado nos ensaios para avaliação da resistência ao corte da madeira (provetes SC).

2.2. Ligação colada

A ligação colada madeira-madeira foi analisada através de dois diferentes ensaios. Por um lado, utilizou-se um esquema semelhante aos ensaios anteriores, avaliando a junta colada através de um ensaio de corte paralelo, tal como definido pelo Anexo D da EN 14080, que aqui se designou por ligação colada CC. Na Figura 3 apresenta-se a geometria dos 10 provetes ensaiados.





Por outro lado, consideraram-se ainda ensaios de corte da ligação colada através da aplicação de uma força de compressão, usando o esquema de ensaio designado por push-out. Decidiu-se usar este esquema de ensaio uma vez que já foi empregue na avaliação de ligações coladas produzidas pela Rusticasa (Barros, B.M.V. (2010), **Avaliação experimental de ligações coladas e aparafusadas em estruturas de madeira**, Universidade do Minho, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Guimarães.). Foram ensaiados 10 provetes com a geometria e o setup apresentado na Figura 4.







2.3. Resistência à compressão no plano do ISOLAM W180

Realizados os ensaios ao corte, precedeu-se então aos ensaios para avaliação da capacidade resistente a cargas verticais no plano da unidade ISOLAM W180. Sendo a solução final constituída por um material isolante, ICB (cortiça), no interior da secção, foi verificada a influência da incorporação deste material no interior da unidade ISOLAM W180 realizando ensaios com e sem preenchimento de cortiça.

A carga foi aplicada por intermédio de um atuador cuja capacidade máxima é de 200kN, adotando uma velocidade de carregamento de 0.02 mm/s, garantindo que a força máxima era atingida no intervalo de 180 a 420 segundos, conforme estipulado pela EN 408:2010. De seguida apresentamse os provetes adotados para os ensaios da unidade ISOLAM W180 e aqueles adotados para avaliar a influência da ligação denteada. Em ambos os casos, foram considerados provetes com e sem preenchimento de cortiça.

2.3.1. Carga aplicada no elemento superior de madeira.

A situação extrema, mais desfavorável, na avaliação da resistência à compressão no plano da unidade ISOLAM W180 é aquela que compreende a aplicação da carga apenas no elemento de madeira de topo da unidade. Nesta situação, a capacidade resistente é proporcional ao menor valor entre a resistência ao corte do elemento de madeira de topo e a resistência ao corte da ligação colada. Esta situação limite é pouco provável uma vez que no sistema construtivo a transmissão das cargas na vertical, através das unidades ISOLAM W180, passará também pelos elementos de madeira laterais que constituem as unidades. Por outro lado, este ensaio, com a aplicação da carga apenas no elemento de madeira do topo, afere diretamente a estabilidade mecânica da unidade ISOLAM W180 e, em particular, das suas ligações coladas.

Foram ensaiados 6 provetes com (CP_CC) e sem (CP_SC) preenchimento de cortiça, utilizando uma barra metálica rígida para aplicação da carga apenas no elemento de madeira de topo. A geometria bem como o setup utilizado são apresentados na Figura 5.







Figura 5: Geometria dos provetes e esquema de ensaio utilizado (provetes CP_SC e CP_CC).

2.3.2. Carga uniformemente aplicada no topo da unidade ISOLAM W180

Estes provetes são em tudo semelhantes aos anteriores, sendo a única diferença a área de aplicação da carga. Agora, todo a superfície de topo, incluindo as espessuras dos dois elementos de madeira laterais que formam a unidade ISOLAM W180, é submetida ao carregamento vertical à compressão. Para a aplicação da carga utilizou-se uma barra rígida em toda a área da face superior da unidade (ver Figura 6). Também nestes ensaios foi avaliada a influência do preenchimento com cortiça, adotando para cada um dos casos, com (CD_CC) e sem (CD_SC) preenchimento com cortiça, 6 provetes. A geometria dos provetes e o setup utilizado nos ensaios são apresentados na Figura 6.



Figura 6: Geometria dos provetes e esquema de ensaio utilizado (provetes CD_SC e CD_CC).



2.3.3. Carga uniformemente aplicada no topo de duas unidades ISOLAM W180 sobrepostas

De forma a avaliar o efeito da ligação denteada que materializa a ligação na vertical de duas unidades de ISOLAM W180, foram ainda ensaiados provetes constituídos por duas unidades sobrepostas. Tal como nos ensaios anteriores, foi ainda aferida a influência do preenchimento com cortiça. Deste modo, foram considerados 6 provetes sem (CD_DSC) e com (CD_DCC) cortiça nos ensaios de compressão no plano considerando a carga aplicada em todo o topo (face) superior da unidade superior. Na Figura 7 apresenta-se a geometria dos provetes utilizados nestes ensaios.



Figura 7: Geometria dos provetes CD_DSC e CD_DCC.

3. Modelação numérica

A modelação numérica recorrendo ao método de elementos finitos analisou dois elementos essências no sistema construtivo em causa: o painel CRIPTOLAM F210 e o painel ISOLAM R230. O primeiro materializa os pavimentos enquanto o segundo é utilizado nas coberturas.

A modelação numérica teve por base as peças desenhadas fornecidas pela empresa que se apresentam nas Figura 8 e Figura 9.





Figura 8: Painel de piso CRIPTOLAM F210

inho







A modelação numérica foi realizada com recurso a um software de cálculo automático, RFEM, no qual foram admitidas secções padrão disponibilizadas pelo software. Na análise estrutural considerou-se que os painéis são simplesmente apoiados, não havendo deste modo momentos fletores negativos nestes elementos.

As ações consideradas dividem-se em ações permanentes e variáveis, que dependem do painel em análise em resultado das suas diferentes utilizações.

No caso do painel CRIPTOLAM F210:

- Carga permanente: 35 kg/m² (revestimento para além do peso próprio do painel);
- Carga permanente: 50 kg/m² (correspondente às paredes divisórias);
- Sobrecarga: 200 kg/m² (admitindo uma utilização de habitação).

No caso do painel ISOLAM R230:

- Carga permanente: 10 kg/m² (revestimento para além do peso próprio do painel);
- Carga permanente: 50 kg/m² (correspondente às telhas cerâmicas);
- Sobrecarga: 40 kg/m² (admitindo uma cobertura não acessível);
- Ação da Neve: 110 kg/m² (admitindo uma localização comum para trabalhos da empresa em França).

A nível das combinações de ações adotadas, dizem respeito ao Estados Limite Último de Resistência e ao Estados Limite de Utilização definidos pelo Eurocódigo 1.

3.1. CRIPTOLAM F210

Tendo por base as peças desenhadas e os ensaios realizados foi admitida uma secção viga padrão retangular (Dlubal RFEM – secção: T-Rectangle 500/190) com uma classificação de resistência C14. Dessa forma, a secção admitida apresenta uma redução da secção final esperada, tendo como principal fator da sua simplificação, as fragilidades do painel na zona inferior. A geometria adotada no caso de um pavimento com 6 metros é ilustrada na Figura 10.







Figura 10: Geometria do modelo de um pavimento de 6 metros com painéis CRIPTOLAM F210.

3.2. ISOLAM R230

Relativamente ao ISOLAM R230, também com base nas peças desenhadas, foi admitida uma secção viga padrão retangular oca (Dlubal RFEM – secção: HSH 230/200/30/25/40), em que foi definida como um elemento híbrido para classificação de cada tipo de material existente. Como a secção superior apresenta diferentes materiais e o software não o permite, houve a necessidade de se proceder a uma simplificação. Deste modo, foi admitido o material OSB (EN 300 OSB/3) na parte superior por apresentar menor resistência que a madeira criptoméria (C14) e os restantes elementos foram classificados como C14. Por outro lado, para a definição dos parafusos horizontais presentes nos painéis, foram admitidas barras rígidas ao longo do vão de 6 metros para originarem o efeito esperado. A geometria adotada no caso de uma cobertura com 6 metros é ilustrada na Figura 11.







Figura 11: Geometria do modelo de uma cobertura de 6 metros com painéis ISOLAM R230.

No caso deste painel, importa ainda avaliar a situação em que a cobertura prevê um beiral. Assim, para além do sistema estrutural correspondente ao painel simplesmente apoiado, foi ainda analisado a situação em que o painel possui uma consola com 1.0 metro (Figura 12).



Figura 12: Geometria do modelo de uma cobertura de 6,0 metros com a inclusão de 1,0 metro de consola com painéis ISOLAM R230.

4. Resultados

4.1. Campanha experimental

Os ensaios foram realizados com o intuito de verificação da carga máxima admissível dos provetes com especial atenção à resposta de todas as ligações. A campanha de ensaios iniciou-se na ordem como apresenta o presente relatório, e para tal todos os provetes permaneceram na câmara climática até a realização dos ensaios (T=20°C, RH=60%, MC=12%). Os valores obtidos da força



máxima, tensão resistente e roturas padrão associadas à campanha experimental, estão presentes nas seguintes tabelas e figuras. Dessa forma, e para uma melhor comparação de resultados foram agrupados por geometria.

Provetos CC e SC

Provete F _{max} (kN)		fv (MPa)	Provete	F _{max} (kN)	$f_v(MPa)$
SC1	12.70	5.08	CC1	12.52	5.01
SC2	13.70	5.48	CC2	12.70	5.08
SC3	12.79	5.12	CC3	10.57	4.23
SC4	10.95	4.38	CC4	13.11	5.24
SC5	10.95	4.38	CC5	5.39	2.16
SC6	15.05	6.02	CC6	12.98	5.19
SC7	11.84	4.74	CC7	10.71	4.28
SC8	13.11	7.17	CC8	12.68	5.07
SC9	10.07	4.03	CC9	10.57	4.23
SC10	11.36	4.54	CC10	11.66	4.66
Média	12.25	4.90	Média	11.29	4.52
CoV (%)	11.62		CoV (%)	19	.39

Tabela 1 – Resultados dos provetes SC e CC

 $\Delta = \frac{Valor \ m\acute{e}dio(SC - CC)}{Valor \ m\acute{e}dio(SC)} = 7.84\%$



Figura 13: Rotura padrão dos provetes SC e CC



Provetes ACC

Proveto	F _{max} (kN)	<i>fv</i> (MPa)
ACC1	11.97	5.99
ACC2	11.53	5.77
ACC3	10.85	5.43
ACC4	12.29	6.15
ACC5	12.28	6.14
ACC6	10.40	5.20
ACC7	11.50	5.75
ACC8	12.50	6.25
ACC9	12.53	6.27
ACC10	12.47	6.24
Média	11.83	5.92
CoV (%)	5.	97

Tabela 2 –	Resultados	dos	provetes ACC	



Figura 14: Rotura padrão dos provetes ACC

- Provetes CP_SC e CP_CC

Provete	F _{max} (kN)	fv (MPa)	Provete	F _{max} (kN)	fv (MPa)
CP_SC1	16.56	1.15	CP_CC1	16.18	1.12
CP_SC2	16.68	1.16	CP_CC2	18.22	1.13
CP_SC3	14.20	0.99	CP_CC3	15.69	1.09
CP_SC4	15.27	1.06	CP_CC4	18.40	1.28
CP_SC5	16.39	1.14	CP_CC5	15.50	1.08
CP_SC6	13.30	0.92	CP_CC6	13.43	0.93
Média	15.40	1.07	Média	16.24	1.13
CoV (%) 8.31		CoV (%)	10).47	

Tabela 3 – Resultados dos provetes CP_SC e CP_CC

 $\Delta = \frac{Valor \ m\acute{e}dio(CP_CC - CP_SC)}{Valor \ m\acute{e}dio(CP_CC)} = 5.17\%$





Figura 15: Rotura padrão dos provetes CP_SC e CP_CC

- Provetes CD_SC e CD_CC

Provete	F _{max} (kN)	<i>fc</i> ,90 (MPa)	Provete	F _{max} (kN)	<i>fc</i> ,90 (MPa)
CD_SC1	27.54	1.91	CD_CC1	34.13	2.37
CD_SC2	35.31	2.45	CD_CC2	32.48	2.26
CD_SC3	29.20	2.03	CD_CC3	28.88	2.01
CD_SC4	33.02	2.29	CD_CC4	31.78	2.21
CD_SC5	34.64	2.41	CD_CC5	35.47	2.46
CD_SC6	29.23	2.03	CD_CC6	28.92	2.01
Média	31.49	2.19	Média	31.94	2.22
CoV (%)	9	.42	CoV (%)	7	.67

 $\Delta = \frac{Valor \ m\acute{e}dio(CD_CC - CD_SC)}{Valor \ m\acute{e}dio(CD_CC)} = 1.41\%$





Figura 16: Rotura padrão dos provetes CD_SC e CD_CC

Provetes CD_DSC e CD_DCC

Tabela 5 -	Resultados	dos	provetes	CD	DSC e	e CD	DCC
				_		_	

Provete	F _{max} (kN)	<i>fc</i> ,90 (MPa)	Provete	F _{max} (kN)	<i>fc</i> ,90 (MPa)
CD_DSC1	18.80	1.31	CD_DCC1	25.24	1.75
CD_DSC2	24.11	1.67	CD_DCC2	25.09	1.74
CD_DSC3	15.21	1.06	CD_DCC3	23.72	1.65
CD_DSC4	17.43	1.21	CD_DCC4	23.20	1.61
CD_DSC5	16.09	1.12	CD_DCC5	22.99	1.60
CD_DSC6	17.54	1.22	CD_DCC6	24.76	1.72
Média	18.20	1.26	Média	24.17	1.68
CoV (%)	1	5.82	CoV (%)	3	5.73

 $\Delta = \frac{Valor \ m\acute{e}dio(CD_DCC - CD_DSC)}{Valor \ m\acute{e}dio(CD_DCC)} = 24.70\%$





Figura 17: Rotura padrão dos provetes CD_DSC e CD_DCC

4.2. Modelação numérica

Apresentam-se em seguida os principais resultados da análise em Estados Limite Últimos e Estados Limite de Utilização das lajes em estudo, tendo por base as secções, ações e combinação de ações descritas anteriormente. Do mesmo modo, também são apresentadas as cargas máximas admissíveis para cada um dos painéis.

4.2.1. CRIPTOLAM F210

Recorde-se que no caso do painel CRIPTOLAM F210, as cargas admitidas para os cálculos são:

- Carga permanente: 35 kg/m² (revestimento para além do peso próprio do painel);
- Carga permanente: 50 kg/m² (correspondente às paredes divisórias);



• Sobrecarga: 200 kg/m² (admitindo uma utilização de habitação).

A título de exemplo, na Figura 18 apresentam-se os diagramas de esforços atuantes dos momentos flectores ($M_{E,d}$) e esforço transverso ($V_{E,d}$) para o painel CRIPTOLAM F210 para um vão livre de 6 metros e nas Figuras 19 e 20 apresentam-se as correspondentes deformadas instantânea e final, respetivamente.

Estados Limite Últimos (Psd= 1.35G + 1.5Q)





Figura 18: Valores atuantes do Momento fletor e esforço transverso para o caso do CRIPTOLAM F210 com um vão de 6 metros





Figura 19: Flecha instantânea para o caso do CRIPTOLAM F210 com um vão de 6 metros

• Flecha final (Combinação quase-permanente Psd=1.8G+1.24Q)





 $W_{\text{final,d}}$ = 22.4 mm

Figura 20: Flecha final para o caso do CRIPTOLAM F210 com um vão de 6 metros

Como seria expectável, é o Estado Limite de Deformação que condiciona o dimensionamento do painel CRIPTOLAM F210. Na verdade, a capacidade resistente do painel é superior às limitações impostas pela verificação dos valores máximos das flechas admissíveis. Por outro lado, esta conclusão é reconfortante uma vez que demonstra que a segurança destes painéis dificilmente será colocada em causa. Na Tabela 6 apresentam-se os valores para a carga máxima admissível para o painel CRIPTOLAM F210 impostos pela verificação do Estado Limite de Deformação, assumindo valores limite de L/300 e L/200. De notar que na verificação da deformação, assumiu-se ainda uma verificação extra de limitar a flecha instantânea a L/360 de modo a reduzir o risco de vibrações.

Tabela 6 – Valores para as cargas permanentes máximas admissíveis no caso do painel CRIPTOLAM F210 considerando Q = 200kg/m²

Limite \ Vão [m]	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
L/300	650	400	240	130	55	-	-	-	-
L/200	1000	640	400	235	120	40	-	-	-

Considerando que o painel será utilizado para aplicações referentes a habitação, a sobrecarga a considerar será de 200kg/m². Deste modo, conclui-se que o painel não deverá ser aplicado para vãos superiores a 6 metros (ver Tabela 6).

4.2.2. ISOLAM R230

No caso do painel ISOLAM R230, foi solicitado a verificação de duas situações: a) o painel simplesmente apoiado e b) a colocação do painel com uma consola livre de 1 metro. De recordar novamente que no caso do painel ISOLAM R230 que as cargas admitidas para os cálculos são:

- Carga permanente: 10 kg/m² (revestimento para além do peso próprio do painel);
- Carga permanente: 50 kg/m² (correspondente às telhas cerâmicas);
- Sobrecarga: 40 kg/m² (admitindo uma cobertura não acessível);



 Ação da Neve: 110 kg/m² (admitindo uma localização comum para trabalhos da empresa em França).

A título de exemplo, na Figura 21 apresentam-se os diagramas de esforços atuantes dos momentos flectores ($M_{E,d}$) e esforço transverso ($V_{E,d}$) para o painel ISOLAM R230 para um vão livre de 6 metros e nas Figuras 22 e 23 apresentam-se as correspondentes deformadas instantânea e final, respetivamente.

Estados Limite Últimos (Psd= 1.35G + 1.05Q + 1.5Qneve)







Estados Limite de Utilização

• Flecha instantânea (Combinação característica Psd=G+Q+Q_{neve})



Winst,d= 9.4 mm





• Flecha final (Combinação quase permanente Psd=1.8G+0.94Q+1.16Q_{neve})





Figura 23: Flecha final para o caso do ISOLAM R230 com um vão de 6 metros

Na Tabela 7 apresentam-se os valores para a carga máxima admissível para o painel ISOLAM R230 impostos pela verificação do Estado Limite de Deformação, assumindo valores limite de L/300 e L/200.

Tabela 7 – Valores das cargas permanentes máximas admissíveis [kg/m²] no caso do painel ISOLAM R230 considerando Q = 40kg/m² e Q_{neve} = 110kg/m²

Limite \ Vão [m]	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
L/300	650	550	375	250	160	95	50	10	-
L/200	700*	650*	550*	375	245	150	80	25	-

* Limitação imposta pelo Estado Limite Último à Flexão

Considerando que o painel ISOLAM R230 é normalmente utilizado considerando ações de $Q = 40 \text{kg/m}^2 \text{ e } Q_{\text{neve}} = 110 \text{kg/m}^2$, é possível concluir-se que o painel dificilmente vencerá vãos livres superiores a 7 metros.

4.2.3. ISOLAM R230 (cobertura de 6.0m + 1.0m de consola)





M_{E,d +} = 2.931 kN.m; M_{E,d -} = 0.345 kN.m





V_{E,d} = 2.126 kN

Figura 24: Momento atuante e esforço transverso para o caso do ISOLAM R230 com 1.0 m de consola

Estados Limite de Utilização

• Flecha instantânea (Combinação característica Psd=G+Q+Q_{neve})



winst,d = 6.1 mm na consola e 12.2 mm a meio vão da viga sobre dois apoios

Figura 26: Flecha final ISOLAM R230 com 1.0 m de consola

Na Tabela 8 e Tabela 9 apresentam-se os valores para a carga máxima admissível para o painel ISOLAM R230 com consola livre impostos pela verificação do Estado Limite de Deformação, assumindo valores limite de L/300 e L/150 para o vão apoiado e consola livre, respetivamente.



Tabela 8 – Valores das cargas permanentes máximas admissíveis [kg/m²] no caso do painel ISOLAM R230 considerando Q = 40kg/m² e Q_{neve} = 110kg/m² com consola livre

Consola [m] \ Vão [m]	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
1.0m	650	435	250	145	75	25	-
1.5m	700	600	435	240	125	55	-

Tabela 9 – Valores das cargas permanentes máximas admissíveis [kg/m²] no caso do painel ISOLAM R230 considerando Q = 40kg/m² e Q_{neve} = 60kg/m² com consola livre de 1 metro

Consola [m] \ Vão [m]	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
1.0m	700	465	290	180	110	60	25

Considerando as ações consideradas nas Tabelas 8 e 9, é possível concluir que o painel não deverá ser utilizado para vãos livres superiores a 6 metros quando a ação da neve é elevada, sendo possível ir para vãos até 6,5 metros quando a neve é moderada (60kg/m²).

5. Verificações adicionais

Apresentam-se de seguida as verificações adicionais, nomeadamente referente à cantoneira metálica de suporte à laje CRIPTOLAM F210 e ao apoio de viga de cumeeira nas paredes W180 e W90, tendo por base os resultados da campanha experimental e modelação numérica descritas acima.

5.1. Cantoneira metálica

Dada a constituição da cantoneira, as condições de suporte e as ações aplicadas na mesma, importa analisar a secção da chapa horizontal. Na Figura 27 ilustra-se a cantoneira em estudo e na Tabela 10 apresentam-se os resultados obtidos na sua verificação à segurança.







Valores resistentes <i>V_{Rd}</i> (kN)		Vão	Valores atuantes				
Espessura das chapas [mm]			1.35G (35+50)	+1.5Q (200)	Admissível (Tabela 6) ^{a)}		
e=10	e=8	e=6	(11)	Carga (kg/m²)	V _{Ed} (kN)	Carga (kg/m²)	V _{Ed} (kN)
22.14 14.17	7 07	4.0		5.05	1177	12.67	
	14.17	14.17 7.97	4.5	_	5.68	840	10.46
		5.0	-	6.31	624	8.92	
		5.5		6.94	475	7.77	
	Aço = S	275JR	6.0	415	7.57 ^{b)}	374	6.96
Foomm		6.5	_	-	189	4.51	
		7.0		-	128	3.86	
Sourim		7.5	-	-	88	3.38	
é		8.0	-	-	54	2.97	

Tabela 10 – Verificação de segurança da cantoneira metálica de suporte à laje CRIPTOLAM F210

a) Considerando um limite de L/300; b) Considerando um limite de L/200

Como facilmente se pode concluir, a cantoneira verifica a segurança para todos os vãos admitidos para o painel CRIPTOLAM F210 (até 6 metros) com uma espessura de 6 mm. Na Tabela 10 apresenta-se ainda, a título de curiosidade, os valores máximos possíveis de aplicar para os diferentes vãos que o painel poderá apresentar (até 8 metros) e os correspondentes valores atuantes na cantoneira.

5.2. Apoio de viga de cumeeira nas paredes W180 e W90

Uma possível limitação do sistema construtivo desenvolvido, poderá residir no apoio das vigas de cumeeira nas paredes W180 e W90. Na verdade, a resistência à compressão perpendicular às fibras da madeira utilizada é baixa bem como é reduzida área de apoio/contacto. Na Tabela 11 apresentam-se as cargas máximas admissíveis no caso do apoio das vigas de cumeeira nas paredes W90 e W180, considerando as duas classes de qualidade previstas pela norma NP4544:2015 para a madeira de criptoméria, bem como a indicação do valor mínimo obtido nos ensaios de compressão perpendicular às fibras da madeira de Criptoméria. De referir que o valor mínimo obtido nos ensaios realizados é superior ao valor de cálculo proposto pela norma para a classe de qualidade mais alta (CYS I) o que reforça a confiança nos cálculos aqui apresentados.



Tabela 11 – Cargas máximas admissíveis para o apoio das vigas de cumeeira nas paredes do sistema construtivo

	Classe de Qualidade		
Dados	CYS II	CYSI	
Valor característico de resistência à compressão perpendicular às fibras $f_{c,90,k}$ (MPa)	1.80	2.20	
Valor de cálculo de resistência à compressão perpendicular às fibras $f_{c,90,d}$ (MPa)	1.25	1.52	
Valor mínimo encontrado nos ensaios CD_DCC <i>f</i> _{c,90} (MPa)	1.60		
Carga máxima admissível nas Paredes W180 (kN)	15.95	19.50	
Carga máxima admissível nas Paredes W90 (kN)	7.98	9.75	

5.3. Resistência à compressão no plano das paredes W180

Considerando as duas classes de qualidade previstas pela norma NP4544:2015 para a madeira de criptoméria, de seguida na Tabela 11 apresentam-se os valores para aas cargas máximas admissíveis a considerar para as paredes W180.

Tabela 12 - Cargas máximas admissíveis para as paredes W180

	Classe de Qualidade		
Dados	CYS II	CYSI	
Valor característico de resistência à compressão perpendicular às fibras $f_{c,90,k}$ (MPa)	1.80	2.20	
Valor de cálculo de resistência à compressão perpendicular às fibras $f_{c,90,d}$ (MPa)	1.25	1.52	
Carga máxima admissível nas Paredes W180 (kN/m)	99.65	121.85	

6. Conclusões

O presente relatório foi efetuado tendo por base todos os elementos escritos, peças desenhadas, análise experimental da unidade ISOLAM W180 e a modelação numérica dos painéis ISOLAM R230 e CRIPTOLAM F210.

Numa primeira fase, procedeu-se à avaliação experimental da unidade ISOLAM W180. Para tal foram analisadas as ligações coladas que materializam a secção externa da unidade, o efeito do seu preenchimento com ICB, e por fim, a ligação vertical denteada entre unidades.

Os ensaios ao corte SC e CC, sobre a secção externa da unidade, apresentaram valores de tensões homogéneos tendo a rotura sucedido sempre no lado da madeira. O mesmo tipo de rotura foi verificado no caso dos provetes ACC. No entanto, é importante salientar que, quando comparadas



com as tensões dos provetes SC e CC foram obtidas diferenças de 17.23% e 23.65%, respetivamente.

No que diz respeito aos provetes realizados na unidade ISOLAM W180, os mesmos conduziram às seguintes conclusões:

- nos provetes CP_SC e CP_CC, dados como a situação mais desfavorável pelo carregamento das cargas (apenas no elemento interno do tronco), como era esperado, a rotura ocorreu sempre na ligação madeira-madeira. No entanto, aquando do preenchimento da unidade com ICB, é possível afirmar-se que este não apresenta qualquer benefício estrutural;
- para os provetes CD_SC e CD_CC, com a mesma secção que CP_SC e CP_CC, em que a única diferença é relativa à área de aplicação da carga (área total do topo), observou-se um incremento da capacidade resistente. Relativamente à existência do enchimento com ICB, também estes não apresentaram acréscimo de resistência (diferença de 1.41%).
- por fim, para os provetes que já apresentavam a ligação denteada de dois elementos sobrepostos (CD_DSC e CD_DCC), para a mesma situação de carregamento que os provetes CD_SC e CD_CC, obtiveram-se menores valores de resistência, quando comparados com os provetes que não apresentam a ligação denteada. Neste contexto, é importante referir, que a presença do ICB resultou num incremento da resistência de 24.70%. Relativamente à rotura dos provetes, nos CD_DSC observou-se encurvadura enquanto que nos CD_DCC a rotura ocorreu na ligação denteada nas extremidades dos elementos.

Por outro lado, foi realizada uma modelação numérica, utilizado um software de elementos finitos, Dlubal RFEM, analisando o comportamento mecânico dos painéis ISOLAM R230 e CRIPTOLAM F210. O objetivo passou pela definição de uma tabela de apoio ao projetista para a definição das cargas máximas admitidas por cada um dos painéis nas situações mais representativas. Na prática é a verificação do estado limite de deformação que limita a utilização dos painéis. O painel CRIPTOLAM F210 vence vãos até 6 metros e o painel ISOLAM R230 poderá vencer vãos livres de 6 metros, considerando uma consola até 1,5 metros.

No que diz respeito a verificações adicionais, os resultados obtidos na verificação da cantoneira metálica permitiram concluir a segurança para todos os vãos admitidos para o painel CRIPTOLAM F210 (até 6 metros) com uma espessura de 6 mm. É importante notar que os valores de tensões resistentes usados nas verificações, foram aqueles apresentados pela NP4544:2015, que são inferiores aos obtidos em laboratório nos ensaios realizados para a caracterização da madeira de criptoméria.

Por fim, recomenda-se que no cálculo das paredes W180, na verificação da sua capacidade de carga no plano, seja adotado o valor de cálculo da tensão de compressão perpendicular às fibras



da madeira de criptoméria definida pela NP4544:2015, tendo em conta que os valores experimentais obtidos foram sempre superiores, com um coeficiente de segurança aceitável, relativamente aos valores da norma.

Realizou,

Realizou/Verificou,

Fille Mats

(Eng.º Filipe Matos)

manco

(Prof. Jorge M. Branco)