

12 APÊNDICE C - CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS PARA O EMPREGO DOS SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO VISUAL E MECÂNICA NA INDÚSTRIA DE MADEIRA LAMINADA COLADA

Adotando os procedimentos da norma ASTM D3737-96 (*Standard Practice for Establishing Stresses for Structural Glued Laminated Timber*) o American Institute of Timber Construction (AITC), associação técnica de comércio que representa a maioria dos fabricantes de Madeira Laminada Colada (MLC) dos Estados Unidos, publica as normas AITC 117-2001 (*Standard Specifications for Structural Glued Laminated Timber of Softwood Species*) e AITC 119-96 (*Standard Specifications for Structural Glued Laminated Timber of Hardwood Species*) nas quais são estabelecidas as resistências de projeto para vigas e Madeira Laminada Colada produzidas com espécies de coníferas e dicotiledôneas respectivamente.

A norma americana D3737-96 aborda os procedimentos para o estabelecimento da resistência à flexão de cálculo de elementos estruturais de MLC. Esta norma envolve o conceito de multiplicar um índice de resistência (análogo à resistência de corpos-de-prova) por um fator de modificação de resistência (análogo à razão de resistência) conforme mostrado abaixo:

$$f_{m,d} = BSI_m \cdot SMF_m \quad (D1)$$

Sendo:

$f_{m,d}$ = resistência de cálculo à flexão para um elemento de MLC;

BSI_m = índice de resistência à flexão;

SMF_m = fator modificador da resistência à flexão.

A única exceção é para elementos fletidos laminados verticalmente formados de duas ou mais espécies diferentes de madeira. Neste caso as resistências de projeto são determinadas pela seguinte equação:

$$f_{byy} = \bar{E} \cdot \left(\frac{f}{E} \right) \quad (D2)$$

Sendo:

f_{byy} = resistência de cálculo para elementos laminados verticalmente formados por duas ou mais espécies de madeira;

\bar{E} = média ponderada dos valores do módulo de elasticidade das lâminas de madeira;

f / E = relação da resistência admissível pelo módulo de elasticidade de cada espécie. A menor relação deve ser usada;

f = resistência admissível de projeto para uma espécie. É obtida pela multiplicação da resistência em madeira isenta de defeitos (seção 6 desta norma) pela relação de tensão dada no item 7.2.2.1 das norma ASTM D3737 e modificando pelas condições específicas de uso dadas na seção 10 da mesma norma;

E = módulo de elasticidade correspondente a cada espécie (ASTM D 3737 item 7.5.1 e 7.5.1.1).

De acordo FALK (1997), devido ao fato da maioria dos elementos estruturais em MLC ser destinada a aplicações onde os esforços de flexão são predominantes (longarinas e tabuleiros de pontes, arcos, vigas, etc) as normas de dimensionamento dão ênfase nas propriedades de resistência e rigidez à flexão.

12.1 ÍNDICES DE RESISTÊNCIA (*Stress index*)

12.1.1 Madeira visualmente classificada

Neste caso, o termo índice de resistência se refere ao *produto da multiplicação do valor característico da resistência à flexão de corpos-de-prova isentos de defeitos da mesma madeira das lâminas da viga, pelos fatores de ajuste*

dados na seção 6 da ASTM D 3737-96. Os fatores de ajuste para madeira classificada visualmente são dados na tabela 75 abaixo.

Tabela 75 - Fatores de ajuste para resistência de corpos-de-prova isentos de defeitos.

Propriedade	Coníferas	Dicotiledôneas	Fator de correção para o teor de umidade de 12%
Flexão	0,476	0,435	1,35
Compressão paralela	0,526	0,476	1,75
Módulo de elasticidade	1,095	1,095	1,20
Cisalhamento horizontal	0,244	0,222	1,13

Fonte: ASTM D 3737-96

12.1.1.1 Resistência à flexão

A norma D 3737-96 oferece duas opções para a determinação do índice de resistência à flexão. A primeira opção é multiplicar as resistências características dadas na norma D2555-96 pelos coeficientes dados na tabela 30, multiplicando posteriormente por 0,743 para ajustar para as condições padrão de 30cm (12”) de altura, viga bi-apoiada com carregamento uniformemente distribuído e com relação vão:altura igual a 21. A segunda opção é usar os valores dados na tabela 76.

Tabela 76 - Índices de resistência à flexão em testes com grandes amostras e valores de módulo de elasticidade para madeira classificada visualmente

Grupos de Espécies	Classificação quanto à densidade de anéis	Índice de resistência a flexão		Módulo de Elasticidade	
		psi	Mpa	10 ⁺⁶ psi	Mpa
Douglas Fir-Larch	média	3000	20,7	1,9	13 100
	densa	3500	24,1	2,1	14 500
Southern Pine	leve	2000	13,8	1,5	10 300
	média	3000	20,7	1,8	12 400
	densa	3500	24,1	2,0	13 800
Hem-Fir	média	2560	17,7	1,7	11 700
	densa	3000	20,7	1,8	12 400

Fonte: ASTM D 3737-96

Como notado, a resistência determinada na classificação visual não é usada diretamente para a determinação da resistência de um elemento estrutural de MLC. A classificação visual é usada como um critério de seleção das lâminas de melhor qualidade para posicioná-las nas zonas mais solicitadas dos elementos estruturais de MLC.

12.1.1.2 Módulo de elasticidade

Neste caso a norma D3737-96 também oferece duas possibilidades para a determinação do índice para o módulo de elasticidade. Na primeira opção, o valor

médio do módulo de elasticidade dado pela D2555-96 deve ser multiplicado pelos fatores dados na tabela 75. Estes fatores ajustam os valores para uma relação vão:altura de 100:1 considerando carregamento uniforme. A segunda opção é a utilização da tabela 76. Os valores dados nesta tabela são resultado de testes em grandes amostras de madeira dos grupos de espécies listados.

12.1.2 Madeira classificada pelo sistema *E-rated*

12.1.2.1 Flexão

A norma ASTM D3737-96 estabelece que os índices de resistência à flexão devem ser determinados de acordo com os procedimentos estabelecidos por MOODY (1977). Alguns índices de resistência em função do módulo de elasticidade (relação vão:altura igual a 100) são dados na tabela 77.

Tabela 77 - Índices de resistência à flexão e compressão paralela para madeira classificada pelo sistema E-rated.

E, psi	Índice de tensão de flexão ^A , psi	Índice de tensão para compressão paralela ^B , psi
1 600 000	2560	1900
1 900 000	3000	2400
2 100 000	3500	2800
2 300 000	4000	3100

A Os valores não devem ser maiores que o obtidos por interpolação linear para valores intermediários do módulo de elasticidade.

B Os valores são para elementos de 30cm (12") de altura no teor de umidade de 12%.

Fonte: ASTM D 3737-96

Segundo HERNANDEZ¹, estes valores de resistência são usados para qualquer espécie norte-americana.

12.1.2.2 Módulo de elasticidade

De acordo com a norma D3737-96 a determinação do valor do módulo de elasticidade para a classificação da madeira deve ser realizada com uma relação vão:altura de 1:100.

12.2 FATORES MODIFICADORES DA RESISTÊNCIA

Os fatores modificadores de resistência levam em conta o efeito de redução da resistência da viga de MLC pela presença de nós e fibras inclinadas.

¹ HERNANDEZ, R. (Forest Products Laboratory).

12.2.1 Madeira visualmente classificada.

12.2.1.1 Fatores de modificação para a resistência à flexão

O fator modificador para a resistência à flexão é o menor valor de dois fatores de modificação determinados um com base nos nós e outro na inclinação das fibras.

12.2.1.1.1 Elementos laminados horizontalmente:

12.2.1.1.1.1 Nós

Os nós irão afetar menos a resistência se localizados nas lâminas próximas à linha neutra do que em outras lâminas. Assim, a influência dos nós na resistência do elemento estrutural depende de sua dimensão e de sua posição, sendo melhor medida por seu momento de inércia. FREAS & SELBO (1954) estabeleceram correlações estatísticas e empíricas para determinar a relação I_k/I_g . I_k é definido como o momento de inércia de todos os nós da seção transversal e I_g é o momento de inércia total da viga sem considerar a presença dos nós. O valor de I_k/I_g é então relacionado empiricamente com o valor do fator modificador de resistência.

Os procedimentos para calcular o valor da relação I_k/I_g são dados no anexo A2 da ASTM D 3737 e em FREAS & SELBO (1954) e também em MOODY (1977).

O fator modificador da resistência à flexão é determinado pela seguinte relação empírica.

$$SMF_b = (1 + 3R) \cdot (1 - R)^3 \cdot \left(1 - \frac{R}{2}\right) \quad (D3)$$

Sendo:

SMF_b = fator modificador da resistência à flexão;

R = relação I_k/I_g .

12.2.1.1.1.2 Inclinação das fibras

Os fatores de modificação da resistência à flexão associados com as várias inclinações de fibras são dados na tabela 78. Os fatores dados para tração aplicam-se à face tracionada dos elementos fletidos e os fatores dados para a compressão aplicam-se à face comprimida dos mesmos.

Tabela 78 - Fatores modificadores de tensão associados com a inclinação das fibras.

Inclinação da fibra	Fator modificador da resistência	
	Tração	Compressão
1:4	0,27	0,46
1:6	0,40	0,56
1:8	0,53	0,66
1:10	0,61	0,74
1:12	0,69	0,82
1:14	0,74	0,87
1:15	0,76	1,00
1:16	0,80	1,00
1:18	0,85	1,00
1:20	1,00	1,00

Fonte: ASTM D 3737-96

O valor de SMF_b deve ser igual ou superior à razão de resistência em elementos fletidos na posição de menor inércia determinada pelas formulas norma D 245-93.

12.2.1.1.2 Elementos laminados verticalmente:

12.2.1.1.2.1 Nós

O efeito de redução da resistência de elementos laminados verticalmente devido à presença de nós é levado em conta por meio do fator modificador de resistência SMF_b dado pela fórmula abaixo.

$$SMF_b = C_1 \cdot (SR_1^g) \cdot (N^a) \cdot \left(1 - 1,645 \cdot \frac{\Omega_1}{N^{1/2}} \right) \quad (D4)$$

Sendo:

C_1 = constante empírica dada na tabela 79;

SR_1 = relação de resistência dada pela norma ASTM D 245-93, para uma peça individual de madeira carregada nas bordas;

g = constante empírica = 0,81;

$a = 0,329 \cdot (1 - 1,049SR_1)$;

N = número de lâminas. Usar $N=5$ para elementos com 5 ou mais lâminas;

Ω_1 = coeficiente de variação para a resistência à flexão de uma lâmina. O coeficiente de variação para uma lâmina de madeira classificada visualmente é igual a 0,36.

Tabela 79 - Constantes usadas para ajustar a relação de resistência em elementos laminados verticalmente.

Relação de resistência (SR_1)	C_1
0,45 ou superior	1,238
0,40	1,292
0,35	1,346
0,30	1,400
0,26 ou inferior	1,444

Fonte: ASTM D 3737-96

12.2.1.1.2 Inclinação das fibras

Os fatores de modificação de resistência para os vários ângulos de inclinação das fibras são iguais aos para resistência à tração dados pela tabela 77.

12.2.1.1 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade dos elementos estruturais de MLC é diretamente dependente do módulo de elasticidade das lâminas usadas na sua fabricação. As condições padrão para a determinação do módulo de elasticidade das lâminas devem ser relação vão:altura igual a 100:1 e carregamento centrado em um ponto. Nestas condições o módulo de elasticidade não é afetado pelas deformações de cisalhamento e aproxima-se do verdadeiro módulo de elasticidade. Os valores do módulo de elasticidade determinados por outros métodos podem ser ajustados utilizando a norma ASTM D2915-94. Os fatores de ajuste para o módulo de elasticidade são dados na tabela 80 e dependem da razão de resistência à flexão de peças individuais determinada de acordo com a norma D245-93.

Os valores do módulo de elasticidade dados na tabela 76 podem ser utilizados como alternativa.

Tabela 80 - Fatores de ajuste para o módulo de elasticidade.

Razão de resistência à flexão	Fator de ajuste
$\geq 0,55$	1,00
0,45 à 0,54	0,90
$\leq 0,44$	0,80

Fonte: ASTM D 3737-96

12.2.1.1.1 Elementos laminados verticalmente

O valor do módulo de elasticidade aplicável a elementos fletidos laminados verticalmente deve ser igual a 95% da média das lâminas.

12.2.1.1.2 Elementos laminados horizontalmente

O valor do módulo de elasticidade aplicável a elementos laminados horizontalmente deve ser igual a 95% do valor calculado pela transformação da seção em análise (Anexo A2 D3737-96).

12.2.2 Madeira classificada pelo sistema *E-rated*

A determinação dos fatores de modificação para elementos estruturais de MLC produzidos com madeira classificada pelo sistema *E-rated* é similar à feita com a madeira classificada visualmente com exceção que o efeito da inclinação das fibras é levado em conta no valor do módulo de elasticidade e, portanto, o fator de modificação da resistência devido à inclinação das fibras não é usado.

12.2.2.1 Fator de modificação da resistência à flexão.

12.2.2.1.1 Elementos laminados horizontalmente

A determinação dos fatores modificadores de resistência para madeira classificada pelo sistema *E-rated* segue os mesmos procedimentos usados para madeira classificada visualmente, para se levar em conta a qualidade da madeira no dimensionamento.

O fator modificador da resistência à flexão mínimo não deve ser menor que o fator modificador dado na tabela 81 para elementos com altura igual ou inferior à 38,1cm (15”).