

ANÁLISE DOS MÉTODOS ANALÍTICOS DE DIMENSIONAMENTO DE LAJES DE MADEIRA LAMINADA CRUZADA

ANALYTIC DESIGN METHODS ANALYSIS OF CROSS LAMINATED TIMBER PLATES

S. T. A. Amorim ⁽¹⁾ (A), J. N. R. Mantilla ⁽²⁾, E. V. M. Carrasco ⁽³⁾

(1) Doutoranda, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, Brasil

(2) Dra. Profa. Universidade FUMEC, Belo Horizonte, Brasil

(3) Dr. Prof., Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura - TAU, Brasil

Endereço de contato: silvia.taa@hotmail.com; (A) Apresentador

Código de identificação: T4-27

Resumo

Os painéis de madeira laminada cruzada (CLT) são formados por lâminas de madeira com grandes dimensões arrançadas ortogonalmente e unidas com adesivo estrutural sob alta pressão. A disposição ortogonal das lâminas de madeira proporciona estabilidade dimensional ao painel que trabalha como um elemento rígido e autoportante. Os painéis de CLT são utilizados como elementos estruturais em edificações de vários pavimentos em construções pré-fabricadas ou em tabuleiro de estruturas de pontes, dispostos tanto no sentido vertical como horizontal. Quando utilizados como placas de cobertura ou de pisos ou em pontes estão sujeitos a esforços de flexão. Neste trabalho, são analisados comparativamente os diferentes métodos analíticos para o dimensionamento de lajes de CLT sujeitas à flexão no Estado Limite Último. Os métodos estudados foram: o Método Gama, sendo este uma adaptação do anexo B do Eurocódigo 5, o Método K da teoria dos materiais compostos, o método *Shear Analogy* e a norma canadense O86-14 - *Engineering design in wood*. No dimensionamento dessas estruturas ainda não existe uma abordagem de cálculo universalmente aceita pelos projetistas e fabricantes de CLT. Em algumas das abordagens utilizadas, considera-se no cálculo estrutural a resistência das lâminas intermediárias transversais às fibras e em outras essa resistência é desprezada, como no Método Gama. Os resultados obtidos foram comparados e constatou-se que os métodos de maior precisão consideram a rigidez e resistência estrutural de todas as lâminas.

Palavras chave: madeira laminada cruzada; dimensionamento CLT

Abstract

Cross laminated timber panels (CLT) are formed by large-sized orthogonally arranged wood layers bonded with structural adhesive under high pressure. The wood layers orthogonal arrangement of provides dimensional stability to the panel which works as a rigid and self-supporting structural element. The CLT panels are used as structural elements in multi-floor prefabricated constructions or in bridge deck structures, arranged both vertically and horizontally. When used as roof plates, floors or bridges, they are subject to bending stresses. In this work, the different analytical methods for designing CLT slabs subjected to bending in the Ultimate Limit State are comparatively analyzed. The methods studied are: Gamma Method, which is an adaptation of Eurocode 5 Annex B, K Method from composite theory, Shear Analogy method and based on Canadian Standard O86-14 - Engineering design in wood. In designing these structures there is still no universally accepted calculation approach by designers and manufacturers of CLT. In some of these approaches, in structural design the resistance of the intermediate transversed layers is considered, and in others this resistance is neglected, as in the Gamma Method. The results were compared and it was verified that the more accurate methods consider the rigidity and structural resistance of all layers.

Keywords: Cross Laminated Timber; CLT design

1. INTRODUÇÃO

Os painéis de madeira laminada cruzada (CLT) são formados por lâminas de madeira com grandes dimensões arranjadas ortogonalmente e unidas com adesivo estrutural sob alta pressão. A disposição ortogonal das lâminas de madeira proporciona estabilidade dimensional ao painel que trabalha como um elemento rígido e autoportante, sendo variável o número de painéis conforme a função a desempenhar. Os painéis de CLT são utilizados como elementos estruturais em edificações de vários pavimentos em construções pré-fabricadas, ou em tabuleiro de estruturas de pontes, e podem ser dispostos tanto no sentido vertical como horizontal. Eles possuem alto grau de pré-fabricação e índice de resistência/peso. Os painéis de CLT são isolantes térmicos e acústicos e trazem conforto ao ambiente construído. Além disso, como a matéria prima dos painéis é a madeira, um recurso natural renovável o CLT pode ser considerado um sistema construtivo mais sustentável, que gera menos impactos ao meio ambiente, frente às soluções tradicionais. A construção em CLT pode ser considerada uma alternativa viável e mais sustentável para os edifícios altos.

A aplicação do CLT nos edifícios se iniciou nos anos 90 na Áustria e Suíça, conforme [1]. O CLT foi estudado e desenvolvido primeiramente na Suíça e se desenvolveu na Áustria tal como é usado hoje. Nos últimos 20 anos a aplicação dos painéis de CLT em edifícios de múltiplos pavimentos vem aumentando e os países que lideram o uso de CLT atualmente são Áustria, Alemanha, Suíça, Suécia, Noruega e Reino Unido.

As normas técnicas vêm incorporando este produto (ANSI/APA 2012 PRG 320 [2]; DIN 2004; EN2004 [3]), além de manuais de utilização como IFP Innovation Handbook [4] e a Norma técnica europeia [5].

O comportamento mecânico dos painéis de CLT é complexo, principalmente devido à ortogonalidade em relação à direção das fibras dos painéis consecutivos, além da anisotropia inerente à madeira. No dimensionamento das estruturas ainda não existe uma abordagem de cálculo universalmente aceita pelos pesquisadores, projetistas e fabricantes de CLT.

Para os painéis de CLT sujeitos a carregamentos perpendiculares ao plano diversas teorias e métodos analíticos de dimensionamento vem sendo propostas e testadas. Algumas delas já foram incorporados às normas técnicas de dimensionamento (DIN 2004; EN2004 [3]). Essas teorias se baseiam na determinação da rigidez efetiva à flexão e ao cisalhamento da peça, de acordo com a configuração geométrica dos painéis, espessura e direção das fibras da madeira. Determina-se um modelo de painel equivalente como uma hipótese simplificada para tratar o comportamento do painel à flexão. De acordo com [6], em 1999 Kreuzinger propôs o método Shear Analogy para o dimensionamento de lajes de CLT e em 2003 Blass e Gortlacher propuseram o método Gama ou “Mechanically jointed beams theory”, sendo este uma adaptação do anexo B do Eurocódigo 5[3]. Outro método proposto foi o *k-method* conforme [7]. Segundo [8] estes são os três principais métodos de cálculo das estruturas de CLT utilizadas como placas de cobertura ou de piso sujeitos a esforços de flexão.

Neste trabalho, são comparados os diferentes métodos analíticos utilizados no dimensionamento de lajes de CLT sujeitas à flexão no Estado Limite Último de resistência à flexão verificando o nível de precisão e confiabilidade de cada uma dessas teorias.

2. METODOLOGIA

São dimensionadas três configurações distintas de lajes de CLT sujeitas à flexão através de quatro métodos de cálculo estabelecidos empregados atualmente por projetistas e fabricantes. São eles: o Método Gama, sendo este uma adaptação do anexo B do Eurocódigo 5, o Método K da teoria dos materiais compostos, o método Shear Analogy e o método simplificado segundo a norma canadense *O86-14 - Engineering design in Wood* descrito em [4].

Os dados do trabalho experimental de [9] são utilizados como referência para os cálculos realizados. Em [9] os valores de resistência à flexão foram obtidos dos ensaios experimentais do tipo flexão em quatro pontos em vigas de CLT constituídas de madeira de pinho (*Picea Abies*), cujo módulo de elasticidade longitudinal $E=11000\text{MPa}$ e o coeficiente de resistência à flexão característico $F_b=24\text{MPa}$.

Apesar dos painéis serem elementos estruturais bidimensionais e resistirem à flexão nas duas direções quando são utilizados como lajes de piso ou cobertura sua largura máxima é de aproximadamente 2,5m e esta dimensão é muito menor que o comprimento da peça e portanto trabalham como se fossem elementos de vigas, uniaxiais. No trabalho de referência ao presente estudo, [9], foram ensaiadas vigas de CLT que representam lajes com uma direção principal.

Foram consideradas três configurações diferentes de painéis de CLT de três e sete camadas com alturas h , larguras b e comprimentos L , conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Geometria dos painéis de CLT

Nº camadas	h(mm)	b(mm)	L(mm)
3	57	300	1026
3	132	250	2340
7	298	300	5400

O vão das vigas de CLT, valor de L na tabela acima corresponde a 18 vezes a altura h de cada painel. A Figura 1 abaixo mostra o desenho esquemático dos painéis dimensionados.

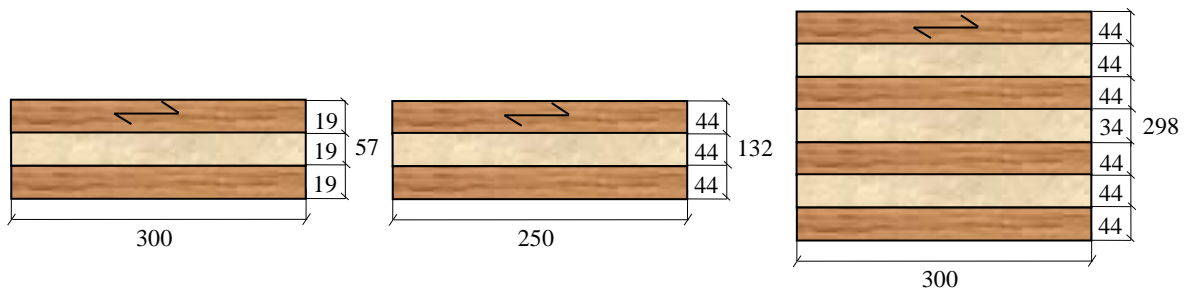


Figura 1: Geometria dos painéis de CLT.

No dimensionamento da placa de CLT sujeita à flexão verifica-se a expressão abaixo:

$$\sigma \leq f_b \quad (1)$$

Sendo f_b a resistência de característica da peça σ a tensão aplicada à estrutura da placa de CLT dada pela expressão geral abaixo:

$$\sigma = \frac{M}{I_{eff}} z \quad (2)$$

Sendo M o momento fletor resistente, I_{eff} o momento de inércia efetivo para a placa de CLT, em relação ao momento de inércia I equivalente para uma seção maciça que varia conforme o método de cálculo e z a distancia da superfície do painel à linha neutra.

A seguir são brevemente descritos os métodos de cálculo estudados.

2.1 Método Gama ou “Mechanically jointed beams theory”

O Método Gama ou “Mechanically jointed beams theory” consiste em uma adaptação do anexo B do Eurocódigo 5 [3] para as estruturas de CLT. O dimensionamento é realizado considerando a

inércia efetiva e calcula-se a resistência à tração e compressão máximas e ao cisalhamento, como no EC5 [3] para as vigas conectadas, como os perfis I ou perfis T.

Pode ser implementado utilizando o elemento de viga do tipo Euler-Bernoulli, pois não são consideradas as deformações de cisalhamento. Esta deformação é considerada apenas no fator de conexão Gama que determina o índice de conexão entre as laminas longitudinais e as laminas dispostas transversalmente.

Um novo gama γ (fator de eficiência da conexão, que vale 1 caso os painéis estejam completamente colados ou 0 caso contrário) contido na equação da rigidez efetiva do EC5 [3] é calculado considerando a deformação de cisalhamento, *rolling shear*, que provoca uma deformação global na junção entre os painéis de madeira.

Calcula-se uma rigidez efetiva conforme a expressão abaixo:

$$EI_{eff} = \sum E_i I_i + \gamma_i E_i A_i z_i^2 \quad (3)$$

Sendo E_i o módulo de elasticidade paralelo às fibras da madeira de cada uma das lâminas dispostas longitudinalmente, b_i é a largura da lamina, h_i a espessura, z_i a distancia do centróide da lâmina i ao centróide da seção transversal e γ_i é o fator de eficiência da conexão. O módulo de elasticidade das lâminas transversais é considerado zero neste método.

O momento resistente M é calculado conforme a equação abaixo, para o módulo de elasticidade longitudinal sendo o mesmo em todas as camadas do painel:

$$M = F_b \cdot \frac{I_{eff}}{(\gamma_1 a_1 + 0.5 \cdot h)} \quad (4)$$

Sendo F_b o coeficiente de resistência à flexão característico e a_1 a distancia do centroide da primeira lâmina até a linha neutra.

A figura abaixo representa o diagrama de tensões normais e de cisalhamento de um painel de CLT, para diferentes valores do coeficiente de conexão γ . Verifica-se que quanto maior o grau de conexão, valor máximo igual a 1, as lâminas longitudinais de CLT se comportam como parte do conjunto de toda seção transversal da peça e quando a conexão entre os painéis é menor, como na figura letra d, resistem à flexão individualmente. A figura mostra também que as camadas transversais não são consideradas na resistência à flexão.

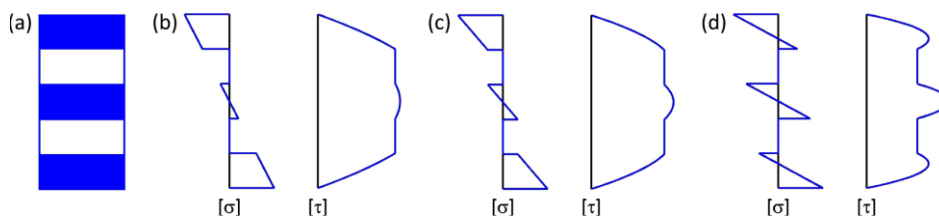


Figura 2: Diagramas de tensão normal (à esquerda) e de cisalhamento (à direita) em uma seção transversal de 5-camadas de CLT (as camadas coloridas representam as placas longitudinais) (a) para um fator de eficiência de conexão (c) igual a (b) 1.0, (c) 0.5, e (d) 0.1. Fonte: [9].

2.2 Método K ou “Composite Theory” da teoria dos materiais compostos

O método K é baseado na teoria dos materiais compósitos e considera no dimensionamento da placa a rigidez e resistência de cada lâmina longitudinal ou transversal que constitui o painel de CLT.

A rigidez e resistência das camadas individuais são incorporadas ao cálculo a partir de um fator de composição K_i . Este fator composição K_i é determinado conforme o tipo de carregamento e a orientação das placas de CLT. A expressão abaixo mostra o cálculo da rigidez efetiva para a configuração do painel em estudo e sujeito à flexão:

$$EI_{eff} = E \cdot I \cdot K_1 \quad (5)$$

Sendo E o módulo de elasticidade paralelo às fibras das camadas do painel de CLT e K_1 o fator de composição para a geometria do problema em análise mostrada abaixo:

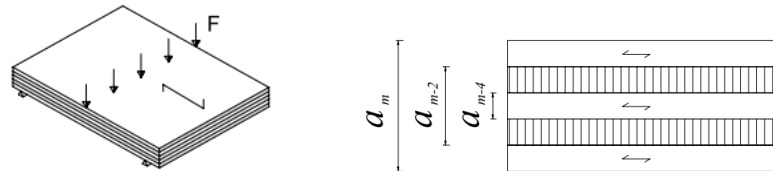


Figura 3: Configuração e geometria do painel de CLT para cálculo de K_1 . Nesta figura, $m=5$.
Fonte: [7]

Para as configurações estudadas, o fator de composição K_1 é calculado conforme a expressão abaixo:

$$K_1 = 1 - \left(1 - \frac{E_{90}}{E}\right) \cdot \frac{a_{m-2}^3 - a_{m-4}^3 + \dots \pm a_1^3}{a_m^3} \quad (6)$$

Sendo E o módulo de elasticidade paralelo às fibras das camadas do no painel de CLT e E_{90} o módulo de elasticidade perpendicular às fibras e é dado por $E_{90} = E/30$ e a_m , a_{m-2} e a_{m-4} , são as alturas da seção transversal de acordo com a Figura 3 e m o número de lâminas do painél.

Esse método entretanto não leva em consideração a deformação de cisalhamento das fibras na flexão.

2.3 Método Shear Analogy (Kreuzinger)

O método Shear Analogy considera os módulos de elasticidade transversal e longitudinal para todas as camadas do painel. A rigidez das camadas transversais é dada por $E_{90}=E/30$ assim como no método K. O painel de CLT é considerado como duas vigas virtuais posicionadas em suas extremidades para a homogeneização da seção transversal. A rigidez efetiva é dada pela expressão:

$$EI_{eff} = \sum E_i \cdot I_i + E_i \cdot A_i \cdot z_i^2 \quad (7)$$

Sendo a primeira parcela correspondente à primeira viga e a segunda à segunda viga virtual.

Este método leva em consideração a deformação de cisalhamento e está detalhadamente descrito em [4].

2.4 Norma canadense O86-14

Esse método corresponde a uma simplificação do método Gama explicado acima neste trabalho conforme [4]. O momento resistente, M_r , é calculado conforme a equação abaixo:

$$M_r = F_b \cdot \frac{I_{eff}}{0.5 \cdot h} \quad (8)$$

Sendo que a inércia efetiva I_{eff} é calculada conforme o método Gama.

3. RESULTADOS

As três configurações de vigas de CLT flexionadas e calculadas conforme os quatro métodos descritos acima apresentaram os resultados em relação à solução exata obtida do trabalho de [9] conforme o gráfico da Figura 4. Em [9], os valores obtidos para o momento resistente foi medido na ocorrência da primeira trinca da viga, e seus resultados foram de 6kN.m, 19.4kN.m e 115kN.m para o painel de 57x300mm, o painel de 132x250mm e o de 298x300mm respectivamente.

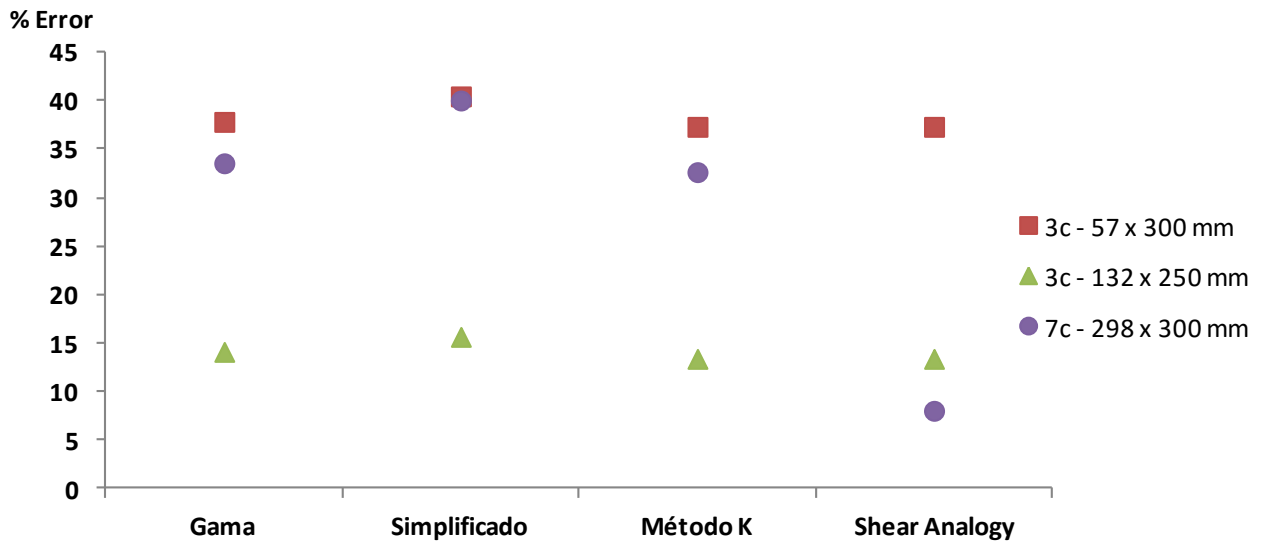


Figura 4: Porcentagem de erro dos métodos de dimensionamento para os painéis de CLT.
Fonte: Elaborada pela autora

No gráfico da Figura 4 verifica-se que os resultados dos cálculos conseguiram representar o comportamento do painel de CLT sujeito à flexão ensaiado no laboratório no trabalho de [9]. Os valores encontrados em todos os métodos de cálculo foram menores que os valores de referência utilizados.

Conforme a Figura 4, a viga de três lâminas de madeira e 132 mm de altura obteve uma boa precisão para todos os métodos de dimensionamento além do percentual de erro entre os métodos de cálculo para este painel ter sido bem próximo. Já o painel de três camadas e menor altura, de 57mm, teve um erro de aproximadamente 40% para os métodos de cálculo o que necessitaria a inclusão de um coeficiente de segurança no seu dimensionamento para esta espessura de painel.

Para a viga de maior altura de dimensões da seção transversal de 298x300mm, o método mais preciso foi o *Shear Analogy*. Este método leva em consideração as deformações de cisalhamento entre as laminais do painel e no caso da viga alta o efeito do cisalhamento é mais significativo que para as vigas de menores alturas. O método K despreza este fenômeno e o método Gama o incorpora através do coeficiente gama.

No geral nota-se que o método *Shear Analogy* corresponderia ao método com menor percentual de erro em relação à situação real e em seguida estaria o método K. Ambos os métodos incorporam a resistência e rigidez de todas as fibras na resistência do painel de CLT.

4. CONCLUSÕES

No trabalho foram apresentados os métodos de cálculo usuais para os painéis de CLT sujeitos à flexão e foram calculados os painéis de CLT e comparados com resultados experimentais encontrados na literatura utilizando cada um dos métodos. Os resultados encontrados conseguiram representar o comportamento dos painéis.

Dos métodos de dimensionamento apresentados, dois deles não consideravam a rigidez e resistência das lâminas transversais na determinação do momento. Apenas o método de Kreuzinger, *Shear Analogy*, considera a resistência e rigidez de todos os painéis de madeira do CLT.

Os resultados obtidos foram comparados e constatou-se que o método de maior precisão foi o que considerou a rigidez de todas as lâminas da placa de CLT além de considerar também as deformações de cisalhamento, o método *Shear Analogy*.

REFERÊNCIAS

- [1] S. Breneman, S. Technical, W. Wood, and P. Council, “A State of the Art Review of Cross-Laminated Timber Floor Systems,” pp. 1–5, 2014.
- [2] APA, “Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber.” ANSI/APA PRG 320., 2012.
- [3] EN (2004) Eurocode 5, “Design of timber structures. Part 1-1: General Common rules and rules for buildings.,” *Design*, pp. 1–123, 2003.
- [4] S. Gagnon and C. Pirvu, *CLT handbook: cross-laminated timber*. FPInnovations Québec, 2011.
- [5] P. G. & C. KG, “European Technical Approval ETA-11/0295,” *Pitzl GmbH Co. KG HVP concealed Connect.*, no. December 1988, pp. 1–43, 2013.
- [6] A. Thiel and G. Schickhofer, “CLTdesigner – A SOFTWARE TOOL FOR DESIGNING CROSS LAMINATED TIMBER ELEMENTS : 1D-PLATE-DESIGN,” 1995.
- [7] H. J. Blass and D. P. Fellmoser, “Design of solid wood panels with cross layers,” 2004.
- [8] L. Franzoni, A. Lebé, F. Lyon, and G. Foret, “Influence of orientation and number of layers on the elastic response and failure modes on CLT floors: modeling and parameter studies,” *Eur. J. Wood Wood Prod.*, vol. 74, no. 5, pp. 671–684, 2016.
- [9] I. P. Christovasilis, M. Brunetti, M. Follesa, M. Nocetti, and D. Vassallo, “Evaluation of the mechanical properties of cross laminated timber with elementary beam theories,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 122, pp. 202–213, 2016.