



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

JULIANA BELLO MUSSI ALENCAR

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE **PAINÉIS MLCC**
COMPOSTOS POR LAMELAS DE MEDULA DE
EUCALIPTO **COM EMENDAS DENTADAS**

Londrina
2024

JULIANA BELLO MUSSI ALENCAR

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE **PAINÉIS MLCC** COMPOSTOS
POR LAMELAS DE MEDULA DE EUCALIPTO COM **EMENDAS**
DENTADAS

Memorial da defesa da tese apresentada ao Programa Associado de Pós-graduação em Metodologia de Projeto de Arquitetura e Urbanismo das Universidades Estaduais de Londrina e Maringá para obtenção do título de Doutora.

**Prof. Dr. Jorge Daniel de Melo
Moura.**
orientador

Londrina
2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

A368a Alencar, Juliana.

Análise do Comportamento de Painéis MLCC compostos por Lamelas de Medula de Eucalipto com Emendas Dentadas / Juliana Alencar. - Londrina, 2024.

172 f. : il.

Orientador: Jorge Daniel Moura.

Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, 2024.

Inclui bibliografia.

1. Madeira lamelada colada cruzada (MLCC) - Tese. 2. Medula do Eucalipto - Tese. 3. Adesivos - Tese. 4. Emendas dentadas - Tese. I. Moura, Jorge Daniel. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

CDU 711/72

JULIANA BELLO MUSSI ALENCAR

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE PAINÉIS MLCC
COMPOSTOS POR LAMELAS DE MEDULA DE
EUCALIPTO COM EMENDAS DENTADAS**

Texto para defesa da tese aprovada como requisito para obtenção do grau de Doutora no Programa de Pós-graduação em Metodologia de Projeto, área de concentração em Arquitetura e Urbanismo do Centro de Tecnologia e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Jorge Daniel de
Melo Moura
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Banca: Prof. César Imai
Universidade Estadual de Maringá - UEM

Banca: Prof. Dr. Maurício Azuma
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Banca: Prof. Dr. André Luis Christoforo

Banca: Prof. Dr. Everaldo Pletz

Londrina, 30 de setembro 2024.

Dedico este trabalho a Deus e a
minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador não só pela constante orientação neste trabalho, mas sobretudo pela sua amizade, incentivo e paciência.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação pelo conteúdo ministrado com carinho e dedicação.

Ao Carlos Alberto Duarte e ao prof. Marcos Vinícios de Camargo por todo auxílio nos ensaios do laboratório de estruturas da UEL.

E principalmente agradeço a minha família pelo apoio, amor e compreensão em todos os momentos.

ALENCAR, Juliana Bello Mussi. Análise do Comportamento de **Painéis MLCC** compostos por Lamelas de Medula de Eucalipto com **Emendas Dentadas** 2024. 172 pag. Defesa para doutorado do Projeto Programa de Pós-graduação em Metodologia de Projeto, área de concentração em Arquitetura e Urbanismo, do Centro de Tecnologia e Urbanismo- Universidade Estadual de Londrina, Londrina.

RESUMO

A madeira engenheirada na construção civil, nos últimos anos, tem se destacado pelas inúmeras vantagens, desde o seu potencial sustentável, diante da renovação da matéria prima e captação de carbono da atmosfera pela madeira, até seu admirável potencial arquitetônico. A madeira lamelada colada cruzada (MLCC) ou *cross laminated timber* (CLT) é um sistema construtivo, que tem se equiparado, em relação a resistência e rigidez, aos materiais tradicionais como aço e concreto. Estes painéis de madeira lamelada colada e cruzada transversalmente uma a outra, são compostos de 3 a 11 camadas. A medula do eucalipto, parte central do tronco da árvore é considerado um defeito, portanto vedado para uso estrutural por determinação da norma NBR 7190 (2022), pois apresenta baixa densidade e resistência. No entanto, em estudos com esta matéria prima, tem-se notado resultados promissores, com índices acima dos valores mínimos, indicados pelas normas regulamentadoras para produção de painéis CLT. Um dos componentes indispensáveis na composição destes painéis, são as emendas dentadas ou *finger joints*, que fazem a união das lamelas para a produção de maiores dimensões. Entretanto, estas emendas dentadas produzem fragilidade estrutural nos painéis, sendo normalmente o ponto de ruptura nos ensaios. Diante deste fato, o objetivo deste estudo é avaliar o comportamento mecânico de painéis MLCC fabricados com madeira de medula de eucalipto unidas por emendas dentadas (*finger joints*), verificando sua aptidão para uso estrutural. O método utilizado envolveu a realização de ensaios de flexão, cisalhamento e delaminação em 37 painéis MLCC, sendo 32 fabricados com emendas dentadas de acordo com a NBR 7190 (2022) e os resultados comparados com as normas técnicas e a literatura. Foram analisados os módulos de elasticidade e ruptura, assim como a qualidade da colagem dos painéis MLCC. A inserção das emendas dentadas, além de possibilitarem a produção de painéis MLCC de maiores dimensões, aumentaram significativamente o aproveitamento da madeira de medula. Os resultados mostraram que, apesar da redução da capacidade estrutural devido as deficiências na colagem e a inclusão das emendas dentadas, os painéis MLCC apresentaram níveis de confiabilidade superiores em 36,86% para o módulo de elasticidade (MOE) e 61,08% para módulo de ruptura (MOR) aos exigidos pela norma ANSI/APA 320 (2019). A conclusão indica que a medula de eucalipto com emendas dentadas, pode ser viável para uso estrutural em painéis MLCC, expandindo as possibilidades de aproveitamento desse material na construção civil

Palavras-chave: Madeira lamelada colada cruzada (MLCC), Medula do Eucalipto, Adesivos, Emendas dentadas.

ALENCAR, Juliana Bello Mussi. Analysis of the Behavior of **CLT Panels** Composed of Eucalyptus Pith Lamella with **Finger Joint** 2024. 172 pages. Qualification for a doctorate in the Master's Degree in Project Methodology Postgraduate Program in Project Methodology, area of concentration in Architecture and Urbanism, at the Center for Technology and Urbanism - State University of Londrina, Londrina.

ABSTRACT

Engineered wood in civil construction, in recent years, has stood out for its numerous advantages, from its sustainable potential, given the renewal of raw materials and capture of carbon from the atmosphere by wood, to its admirable architectural potential. CLT or cross laminated timber is a wooden construction system, which has been on par, in terms of strength and rigidity, with traditional materials such as steel and concrete. These glued laminated wood panels crossed transversally to each other are made up of 3 to 11 layers, with the way these panels are transported being the limit on their dimensions. Eucalyptus pith is a material prohibited for structural use as determined by hardwood standards, as it has low density and resistance. However, in studies with this raw material, promising results have been noted, with rates above the minimum values indicated by regulatory standards for the production of CLT panels. One of the essential components in the composition of these panels are the toothed seams or finger joints, which join the lamellas together for larger production. However, these toothed seams produce structural fragility in the panels, normally being the breaking point in tests. Given this fact, the objective of this study is to evaluate the mechanical behavior of CLT panels manufactured with eucalyptus pith wood joined by toothed joints, verifying their suitability for structural use. The method used involved performing bending, shear and delamination tests on 37 CLT panels, 32 of which were manufactured with toothed joints in accordance with NBR 7190 (2022), and the results were compared with technical standards and the literature. The moduli of elasticity and rupture, as well as the quality of the gluing of the CLT panels, were analyzed. The insertion of the toothed joints, in addition to enabling the production of larger MLCC panels, significantly increased the use of pith wood. The results showed that, despite the reduction in structural capacity due to deficiencies in gluing and the inclusion of finger joints, the CLT panels presented reliability levels 36.86% higher for the modulus of elasticity (MOE) and 61.08% higher for the modulus of rupture (MOR) than those required by the ANSI/APA 320 (2019) standard. The conclusion indicates that eucalyptus pith with finger joints may be viable for structural use in CLT panels, expanding the possibilities of using this material in civil construction.

Key words: *Cross Laminated Timber (CLT), finger joints, adhesives, Eucalyptus pith.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Edifício mjøstårnet na noruega com 85.4m.....	22
Figura 2. Construção em mlcc.....	23
Figura 3. Construção em mlcc.....	23
Figura 4. Balanço de carbono incorporado de mlcc e subprodutos florestais. .	24
Figura 5. Direção das fibras das camadas de mlcc.....	25
Figura 6. Desdobro da tora de madeira de eucalipto.	26
Figura 7. Variação da densidade na direção medula-casca.....	27
Figura 8. Medição do nó na face.....	33
Figura 9. Ensaio a flexão.....	34
Figura 10. Distância mínima entre a emenda e o nó.....	35
Figura 11. Parâmetros geométricos das emendas dentadas.	36
Figura 12. Relação recomendada entre o comprimento do dente e a pressão aplicada.	37
Figura 13. Relação recomendada entre o comprimento do dente, a pressão e densidade aplicada.....	37
Figura 14. Modo de ruptura das emendas dentadas.....	39
Figura 15. Modo de ruptura dos ensaios de tração.	41
Figura 16. Modo de ruptura das emendas dentadas.	41
Figura 17. Modo de ruptura dos corpos de prova. Tipo 1 – 2 – 3 – 4.....	44
Figura 18. Modo de ruptura dos painéis ao redor dos nós	60
Figura 19. Painel mlcc detalhe da ruptura no nó.	62
Figura 20. Ruptura dos painéis nas emendas dentadas.	63
Figura 21. Painel mlcc detalhe da falha na linha de cola.	65
Figura 22. Emenda dentada unindo dois painéis mlcc na direção de maior resistência.....	66
Figura 23. Modo de ruptura do painel com 3 camadas. Fonte:	66
Figura 24. Corpo de prova 1500x840x60mm.	70
Figura 25. Corpo de prova 1500x560x60mm.	71
Figura 26. Corpo de prova 1500x560x60mm.	71
Figura 27. Exemplo de defeito retirado (rachadura).	72
Figura 28. Pesagem das tábuas.....	72
Figura 29. Grupos classificados de acordo com o moe das tábuas..	74
Figura 30. Defeitos retirados das tabuas.....	74
Figura 31. Peças reagrupadas e marcadas nos grupos de moe pós corte.	75
Figura 32. Fresa de emendas dentadas.....	75
Figura 33. Geometria da emenda dentada.....	76
Figura 34. Medidor da pressão da colagem das emendas.....	76
Figura 35. Aplicação do adesivo pu monocomponente na emenda.	77
Figura 36. Equipamento semiautomático de produção de emendas dentadas.	78
Figura 37. Peças emendadas e cortadas.....	78
Figura 38. Montagem dos painéis mlcc mesclando os grupos de módulo de elasticidade das tábuas.	79
Figura 39. Aplicação do adesivo.	80
Figura 40. Aplicação de cavilhas para travamento do painel na prensagem. ..	81

Figura 41. Painéis mlcc montados antes da prensagem.....	81
Figura 42. Prensagem dos painéis mlcc.	82
Figura 43. Painéis após a prensagem.....	82
Figura 44. Ensaio de flexão em 4 pontos (<i>third-point loading</i>)..	83
Figura 45. Gráfico força x deslocamento.....	84
Figura 46. Esquema do ensaio à flexão em 4 apoios.....	85
Figura 47. Ensaio cisalhamento.	87
Figura 48. Análise da porcentagem de fratura no corpo de prova.....	88
Figura 49. Corpos de prova para ensaios de delaminação.	89
Figura 50. Corpos de prova dentro da autoclave para os ensaios de delaminação.	90
Figura 51. Secagem em estufa dos corpos de prova dos ensaios de delaminação.	90
Figura 52. Resíduos proveniente da retirada dos defeitos das tábuas.....	92
Figura 53. Gráfico do coeficiente de relação entre os resultados de módulo de elasticidade e densidade das tábuas.....	94
Figura 54. Ciclo de ensaio de carregamento em flexão do painel ce4101.	94
Figura 55. Gráfico dos resultados de módulo de elasticidade dos painéis nos ensaios de flexão a quatro apoios comparados com a norma ansi/apa 320 (2019)..	97
Figura 56. Gráfico dos resultados de módulo de ruptura dos painéis nos ensaios de flexão a quatro apoios comparados com a norma ansi/apa 320 (2019)..	97
Figura 57. Resumo revisão de literatura dos resultados de moe dos ensaios de flexão em painéis mlcc.....	98
Figura 58. Resumo revisão de literatura dos resultados de mor dos ensaios de flexão em painéis mlcc.....	99
Figura 59. Resultados das médias de módulo de elasticidade (moe) e módulo de ruptura (mor).....	100
Figura 60. Gráfico do modo de ruptura dos painéis mlcc.....	102
Figura 61. Modo de ruptura dos painéis nos ensaios de flexão.	103
Figura 62. Resultados de mor dos painéis mlcc com emendas e 41cm de largura.....	105
Figura 63. Modo de ruptura dos painéis ce4106, ce4104 e ce4109.....	105
Figura 64. Resultados de moe dos painéis mlcc com emenda e 41cm de largura.....	106
Figura 65. Painel ce4103.	106
Figura 66. Resultados de mor dos painéis com emenda e largura de 56cm..	107
Figura 67. Resultados de moe dos painéis com emenda e largura de 56cm.	108
Figura 68. Painel ce5603 demonstrando ruptura na base da emenda e na madeira.....	109
Figura 69. Painel ce5604 demonstrando ruptura na base da emenda e na madeira.....	109
Figura 70. Resultados de mor dos painéis com emenda e 84 cm de largura.	110
Figura 71. Resultados de moe dos painéis com emenda e 84 cm de largura.	111
Figura 72. Painel ce8405 demonstrando ruptura na base da emenda.....	111

Figura 73 .painel ce8404 rompeu por descolamento de camada. Fonte: autor	112
Figura 74. Resultados de mor dos painéis sem emenda. Fonte: autor	113
Figura 75 .resultados de mor dos painéis com emenda e 84 cm de largura. .	114
Figura 76. Painel se4102 apresentando modo de ruptura no nó e na madeira.	114
Figura 77. Painel se4101 com ruptura na madeira e nos nós. Fonte: autor...	115
Figura 78. Painel se 5601 demonstrando modo de ruptura nos nós e na madeira.	115
Figura 79. Média dos resultados dos ensaios de cisalhamento. Fonte: autor	118
Figura 80. Resumo revisão de literatura dos resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento.....	119
Figura 81. Gráfico com os resultados dos ensaios de cisalhamento por grupo de painéis mlcc.....	120
Figura 82. Modo de fratura dos corpos de prova do ensaio de cisalhamento.	121
Figura 83. Resultado comparativo das médias de modo de ruptura do ensaio de cisalhamento.....	122
Figura 84. Resultado comparativo das médias de modo de ruptura do ensaio de cisalhamento com as médias de descolamento das camadas dos painéis nos ensaios de flexão.	123
Figura 85. Gráfico com os resultados dos modos de fratura dos corpos de prova dos painéis com emendas e 41cm de largura..	124
Figura 86. Gráfico com os resultados dos modos de fratura dos corpos de prova dos painéis com emendas e 56 cm de largura.	125
Figura 87. Gráfico com os resultados dos modos de fratura dos corpos de prova dos painéis com emendas e 84 cm de largura.	126
Figura 88. Gráfico com os resultados dos modos de fratura dos corpos de prova dos painéis sem emendas.	128
Figura 89. Gráfico com os resultados do ensaio de delaminação dos corpos de prova.....	130
Figura 90. Gráfico de comparação das médias dos resultados dos ensaios de delaminação.	131
Figura 91. Resumo revisão de literatura dos resultados dos ensaios de delaminação..	132
Figura 92. Gráfico de comparação entre os resultados de delaminação total dos corpos de prova, falha na linha de cola (cisalhamento) e o modo de ruptura por descolamento das camadas nos painéis mlcc dos ensaios de flexão.	133
Figura 93 .gráfico com os resultados da delaminação dos corpos de prova dos painéis com emendas e 41cm de largura..	134
Figura 94 . Corpos de prova retirados do painel ce4102 e ce4105 ensaiados a delaminação..	134
Figura 95. Corpos de prova retirados do painel ce4103 ensaiados a delaminação..	135
Figura 96. Corpos de prova retirados do painel ce4113 ensaiados a delaminação.	136

Figura 97. Análise da qualidade da colagem dos painéis com emenda e 41cm de largura.....	136
Figura 98. Gráfico com os resultados da delaminação dos corpos de prova dos painéis. Com emendas e 56 cm de largura..	137
Figura 99. Corpos de prova retirados do painel ce5603 e ce5606 ensaiados a delaminação..	138
Figura 100. Corpos de prova retirados do painel ce5609 ensaiados a delaminação..	139
Figura 101. Análise da qualidade da colagem dos painéis com emenda e 56 cm de largura.....	139
Figura 102. Gráfico com os resultados da delaminação dos corpos de prova dos painéis com emendas e 84 cm de largura..	140
Figura 103. Corpos de prova ensaiados a delaminação extraídos do grupo dos painéis sem emenda.....	141
Figura 104. Análise da qualidade da colagem dos painéis com emenda e 840cm de largura.....	142
Figura 105 gráfico com os resultados da delaminação dos corpos de prova dos painéis sem emendas.....	143
Figura 106. Corpos de prova ensaiados a delaminação extraídos do grupo dos painéis sem emenda.....	144
Figura 107. Análise da qualidade da colagem dos painéis sem emendas.	145
Figura 108 .corpos de prova ensaiados do painel se4102 e ensaiados a delaminação.	146
Figura 109 .gráfico da correlação entre os resultados dos ensaios de cisalhamento e delaminação e entre o modo de fratura de cisalhamento (falha na linha de cola) e a delaminação..	146
Figura 110. Comparativo entre as médias dos resultados dos ensaios dos painéis 1-ce41 2-ce56 3-ce84 4-se.....	147
Figura 111. Correlação entre os ensaios do painel ce 4103.	149
Figura 112. Correlação entre os ensaios do painel ce 5303.	150
Figura 113. Comparativo dos resultados dos painéis mlcc com e sem emendas.	151

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Propriedades das classes para folhosas.	28
Quadro 2. Dados obtidos de módulo de elasticidade e densidade.....	28
Quadro 3. Limite de área que o nó ocupa em relação à seção transversal da peça de madeira.	30
Quadro 4. Condições para classificação visual de peças estruturais de madeira tipo pinus.	32
Quadro 5. Resumo dos resultados encontrados na literatura.	44
Quadro 6. Adesivos de madeira categorizados de acordo com seu desempenho estrutural previsto em níveis da exposição ambiental.	46
Quadro 7. Resumo comparativo dos resultados de ensaios de cisalhamento e delaminação da revisão de literatura.	53
Quadro 8. Valores para módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE)..	54
Quadro 9. Resultados dos ensaios em painéis MLCC.	55
Quadro 10. Resumo comparativo dos resultados de ensaios em painéis mlcc da revisão bibliográfica.	67
Quadro 11. Resultados da classificação das tábuas.	92
Quadro 12. Resultado da classificação e agrupamento das peças de acordo com o módulo de elasticidade.	93
Quadro 13. Propriedade das classes para folhosas.	93
Quadro 14. Resultados dos ensaios de flexão a quatro apoios e modo de ruptura dos painéis MLCC.	96
Quadro 15. Resultado dos valores dos módulos de elasticidade das tabuas e dos painéis MLCC.	101
Quadro 16. Resultado dos ensaios de cisalhamento e modo de fratura dos corpos de prova.	117
Quadro 17. Resultado dos ensaios de delaminação.	130

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AITC	<i>American Institute of Timber Construction.</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials.</i>
ANSI/APA PRG	<i>American National Standard Institute/ The Engineered Wood Association</i>
CLT	<i>Cross Laminated Timber.</i>
EPI	Emulsão Polímero Isocianato
MLCC	Madeira Lamelada Colada Cruzada
MOE	Módulo de Elasticidade
MOR	Módulo de Ruptura
NBR	Norma Brasileira Registrada
PUR	Poliuretanos
SPIB	<i>Southern Pine Inspection Bureau.</i>
UF	Ureia-formaldeído.

SUMARIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 DELINEAMENTO DA PESQUISA	20
3 REVISÃO DE LITERATURA	21
3.1 MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA (MLCC) OU <i>CROSS LAMINATED TIMBER</i> (CLT)	21
3.2 MEDULA DO EUCALIPTO	26
3.3 CLASSIFICAÇÃO DA MADEIRA	29
3.3.1 CLASSIFICAÇÃO VISUAL	29
3.3.2 CLASSIFICAÇÃO MECÂNICA NÃO DESTRUTIVA	33
3.4 EMENDAS DENTADAS	35
3.5 ADESIVOS	45
3.6 RESISTÊNCIA DOS PAINÉIS MLCC (MÓDULO DE RUPTURA E MÓDULO DE ELASTICIDADE)	54
3.7 SÍNTESE DA REVISÃO DE LITERATURA	68
4 MATERIAL E MÉTODO DE PESQUISA	70
4.1 CLASSIFICAÇÃO	72
4.2 EMENDAS DENTADAS	75
4.3 PRODUÇÃO DOS PAINÉIS MLCC	79
4.4 ENSAIOS DOS PAINÉIS MLCC	83
4.5 ENSAIO DE CISALHAMENTO EM CORPOS DE PROVA	86
4.6 ENSAIO DE DELAMINAÇÃO	88
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	91
5.1 CLASSIFICAÇÃO VISUAL E NÃO DESTRUTIVAS DAS LAMELAS	91
5.2 Resultados dos Ensaios dos Painéis MLCC	94
5.2.1 Resultado dos ensaios de flexão dos painéis com emenda e 41 cm de largura	104
5.2.2 Resultado dos ensaios de flexão dos painéis com emenda e 56 cm de largura	107
5.2.3 Resultado dos ensaios de flexão dos painéis com emenda e 84 cm de largura	110
5.2.4 Resultado dos ensaios de flexão dos painéis sem emenda	112
5.3 ENSAIO DE CISALHAMENTO	116
5.3.1 ANÁLISE DO MODO DE FRATURA DOS CORPOS DE PROVA DO ENSAIO DE CISALHAMENTO	120

5.4 ENSAIO DE DELAMINAÇÃO	128
5.4.1 Resultados dos Ensaios de Delaminação dos corpos de prova dos painéis com emenda e 41cm de largura.....	133
5.4.2 Resultado dos ensaios de Delaminação dos corpos de prova dos painéis com emenda e 56 cm de largura.	137
5.4.3 Resultados dos Ensaios de Delaminação dos corpos de prova dos painéis com emenda e 84 cm de largura	140
5.4.4 Resultados dos Ensaios de Delaminação dos corpos de prova dos painéis sem emenda.....	142
5.5 COMPARATIVO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS	147
6 CONCLUSÃO	152
7 REFERÊNCIA	155
8 ANEXOS.....	161

1 INTRODUÇÃO

A madeira é utilizada como matéria prima para construção e apresenta um desempenho estrutural excelente, comparado a outros materiais como aço e concreto. No entanto, a limitação das dimensões do comprimento das toras, destinava a madeira ao uso de estruturas de menor porte.

Nos anos 90 este cenário foi alterado com a disseminação da madeira engenheirada. Os mais conhecidos exemplos são a Madeira Lamelada Colada (MLC), a Madeira Microlaminada ou *Laminated Vanner Lamber* (LVL) *Structural Insulating Panel* (SIP), *Dowel Laminated Timber* (DLT) e *Parallel Strand Lumber* (PSL) e a Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC) ou *Cross Laminated Timber* (CLT), sendo este último o objeto deste estudo.

Estas novas tecnologias permitiram que edificações exclusivamente de madeira com até 18 andares (85,4 m) e vãos com mais de 60m fossem executados, de acordo com HENRY e WOOD (2019). Desta forma, a madeira engenheirada pode ser equiparada, e em muitos casos, mais viável que outros sistemas, devido ao baixo peso da estrutura, rapidez na execução da edificação e sustentabilidade pelo caráter renovável da matéria prima.

A Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC) ou *Cross Laminated Timber* (CLT) é um material industrializado, composto por camadas ímpares de lamelas de madeira, coladas ortogonalmente entre si. No Brasil vem sendo produzido a partir de variedades de florestas plantadas das espécies pinus e eucalipto. Esta demanda da construção civil, para o uso destas florestas plantadas, colide com a absorção deste recurso natural pela indústria de celulose, demandando neste sentido estudos para o maior e melhor aproveitamento desta matéria prima, sem aumento de área de plantio.

Segundo relatório anual IBÁ E PÖYRY (2019), as plantações de árvores brasileiras são as mais produtivas do mundo. Em 2018, o Brasil apresentou uma produtividade média de 36,0 m³/ha.ano para os plantios de eucalipto, enquanto a dos plantios de pinus foi de 30,1 m³/ha.ano. Os plantios de eucalipto ocupam 5,7 milhões de hectares desse total, enquanto as áreas com pinus somam 1,6 milhão de hectares, aproximadamente 40% da madeira de

floresta plantada tem como destinação a produção de celulose, sendo o eucalipto 90% e pinus 10%. Da produção de eucalipto 43% são destinados à lenha e carvão e somente 7,6% são destinados à construção civil.

A madeira, em países europeus e na América do Norte é amplamente utilizada, mesmo apresentando um potencial produtivo muito abaixo dos países tropicais, devido ao crescimento lento das árvores, provocado pelas baixas temperaturas e disponibilidade de luz solar. No Brasil, o solo e as condições climáticas favoráveis, luz e umidade, propiciam a formação de florestas em poucos anos, produzindo madeira em períodos muito inferiores aos dos países citados.

A consequência do rápido crescimento para as espécies de coníferas, provenientes de florestas plantadas é que apresentam baixa densidade e muitos nós. Segundo SOARES (2019), no caso das folhosas o crescimento acelerado apresenta retração excessiva, o que ocasiona defeitos de secagem, tais como empenamentos e fendilamentos, sendo estes defeitos mais severos na zona ao redor da medula que tem menor densidade.

Ao longo da implantação e expansão desta nova tecnologia para utilização da madeira, estudos científicos se intensificaram, testando novas possibilidades e fragilidades do sistema. Pesquisas sobre o MLCC vão em diversas direções, como a eficiência energética, o conforto térmico e acústico, a resistência ao fogo, bem como estudos dirigidos a resistência estrutural do material. Sobre o comportamento mecânico e estrutural dos painéis MLCC abordam aspectos sobre colagem, conexões, interface com outros materiais como aço e concreto, durabilidade e emendas dentadas, sendo este último, foco deste estudo.

Outra questão abordada por pesquisas sobre MLCC é a análise do comportamento mecânico de diferentes espécies de madeira na composição dos painéis. A madeira é um material anisotrópico com comportamento físico característico, conforme orientação das fibras e localização no tronco. Apresenta maior resistência a tração e a flexão no sentido paralelo às fibras. Quanto à localização no tronco, a parte central ou medula, assim como o topo da árvore

são os que tem menores propriedades mecânicas. A medula é um produto da extração da madeira, que é considerado como defeito pela norma das folhosas NBR 9487 (1986). sendo vedado portanto, seu uso estrutural.

Na América do Norte, Europa e Ásia estão a maior concentração dos estudos publicados sobre MLCC, no entanto, pesquisas com medula de eucalipto, na composição de painéis MLCC, são incipientes e raras. Em estudo anterior, ALENCAR (2015), posteriormente revisados em ALENCAR e MOURA (2019), testando à flexão painéis MLCC, fabricados com medula de eucalipto, obteve resultados acima dos exigidos pela norma ANSI/APA 320 (2019). No entanto, este processo de validação do uso da madeira, oriundo da medula como componente estrutural em painéis MLCC, deve ser testado sob outros demais aspectos, como resistência ao cisalhamento, e a delaminação.

Emendas dentadas fazem a conexão logitudinal das lamelas, permitindo a fabricação de painéis com aproveitamento melhor da madeira de pequenas dimensões ou com defeitos. No entanto, essas emendas, assim como os nós, resultam em fragilidade estrutural nos painéis MLCC. Esta análise estrutural da emenda dentada, confeccionada em tábuas de medula de eucalipto, foco principal desta pesquisa, pretende corroborar a hipótese da viabilização e agregação de valor a este subproduto, assim como, o maior aproveitamento da área de plantio florestal.

2 DELINEAMENTO DA PESQUISA

Questão de pesquisa: Os painéis compostos por lamelas de medula de eucalipto com emendas dentadas podem ser utilizados como elementos estruturais na construção civil?

Hipótese de pesquisa: Emendas dentadas em lamelas de medula de Eucalipto em painéis MLCC tem comportamento mecânico e aptidão a colagem favoráveis a habilitação estrutural desta matéria prima para construção civil.

Objetivo geral: A partir da análise o comportamento mecânico, confirmar se os painéis MLCC utilizando lamelas de medula de eucalipto com emendas dentadas apresentam níveis de confiabilidade superiores aos exigidos pelas normas.

Objetivos específicos:

- Testar o desempenho estrutural dos painéis MLCC à resistência e rigidez por meio de ensaio à flexão em 4 apoios.
- Atestar a qualidade da colagem dos painéis MLCC por meio de ensaios de delaminação e cisalhamento para compreensão global do comportamento mecânico e físico dos painéis MLCC composto com medula de eucalipto.

Estratégias Metodológicas: Revisão de literatura com o objetivo de buscar premissas dos padrões, metodologia de fabricação, procedimentos de ensaios e análise dos resultados adotados em outras pesquisas e em normas reguladoras do MLCC para fins de comparação dos resultados obtidos no estudo com MLCC produzido com medula de eucalipto. Os aspectos sobre normas, dimensionamentos das peças, metodologia e análise de testes serão observados sob o aspecto geral dos painéis MLCC. A revisão sobre adesivos e as emendas dentadas terão o recorte sobre a madeira juvenil, medula do eucalipto e painéis MLCC.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA (MLCC) OU CROSS LAMINATED TIMBER (CLT)

O sistema construtivo em madeira lamelada colada cruzada (MLCC) ou *Cross Laminated Timber* (CLT), desenvolvido na Áustria e Alemanha na década de 1990 (patente francesa) é composto por painéis estruturais, elaborados a partir da colagem de tábuas em camadas ortogonais, em relação às fibras. O processo de fabricação de painéis MLCC inclui a seleção da madeira, agrupamento da madeira em classes, usinagem, aplicação do adesivo, prensagem e cortes de ajustes, conforme o projeto arquitetônico e estrutural.

De acordo com *FPInnovations* (2019), o MLCC devido às propriedades da madeira, demonstra um bom desempenho no isolamento térmico e acústico. Apresentando baixo peso, em relação ao aço e o concreto, construções que utilizam MLCC necessitam de fundações menos robustas, em comparação a construções convencionais, tornando-se mais competitivo economicamente. O MLCC pode ser utilizado em construções de forma exclusiva, como estrutura e vedação, bem como em combinação com outros métodos construtivos como concreto e aço, principalmente em prédios de mais de 2 pavimentos.

Em 2019, o maior edifício construído exclusivamente em madeira engenheirada (MLCC e MLC) foi executado na Noruega com 85.4m de altura (fig. 1).



Figura 1 Edifício Mjøstårnet na Noruega com 85.4m. Fonte: <https://www.remade.com.br/noticias/15809/major-prédio-construido-de-madeira-do-mundo-está-na-Noruega>

No Brasil, o sistema construtivo de madeira lamelada colada cruzada (MLCC) tem sido difundido em vários estados, tornando-se uma solução viável e excelente alternativa em relação ao sistema convencional de concreto armado e alvenaria. As figuras 2 e 3 mostram uma edificação residencial com 3 pavimentos, construída em MLCC, pela empresa Pisossul na cidade de Foz do Iguaçu, no Paraná. O projeto com 780m² era estimado em 30 meses, do início a conclusão da obra, para uma construção convencional em alvenaria e concreto armado. No entanto, a execução da obra no sistema MLCC mostrou uma redução de 50% do tempo estimado, em relação a uma obra convencional, sendo a edificação finalizada e entregue em 15 meses. O tempo de montagem da estrutura foi de 45 dias, com 5 funcionários e um operador do guindaste, (a autora acompanhou a execução da obra citada nas figuras 2 e 3).



Figura 2 Construção em MLCC. Fonte: <https://www.pisossul.com.br/xlam>



Figura 3 Construção em MLCC. Fonte: <https://www.pisossul.com.br/xlam>

A redução do tempo da execução da obra é uma das vantagens da construção em MLCC. Fatores como redução de emissão de carbono nas etapas da construção e redução da transmissão térmica e acústica tem sido considerados argumentos de extrema importância na decisão do sistema construtivo a ser adotado.

Segundo o documento elaborado pelo programa ambiental da ONU (*United Nations Environment Programme 2023*) (fig. 4), em uma projeção de 100 anos, em relação ao balanço de carbono (emissão e captação) o sistema construtivo MLCC é visto como um dos materiais emergentes, à base de madeira, que oferecem potencial para equilibrar este balanço.

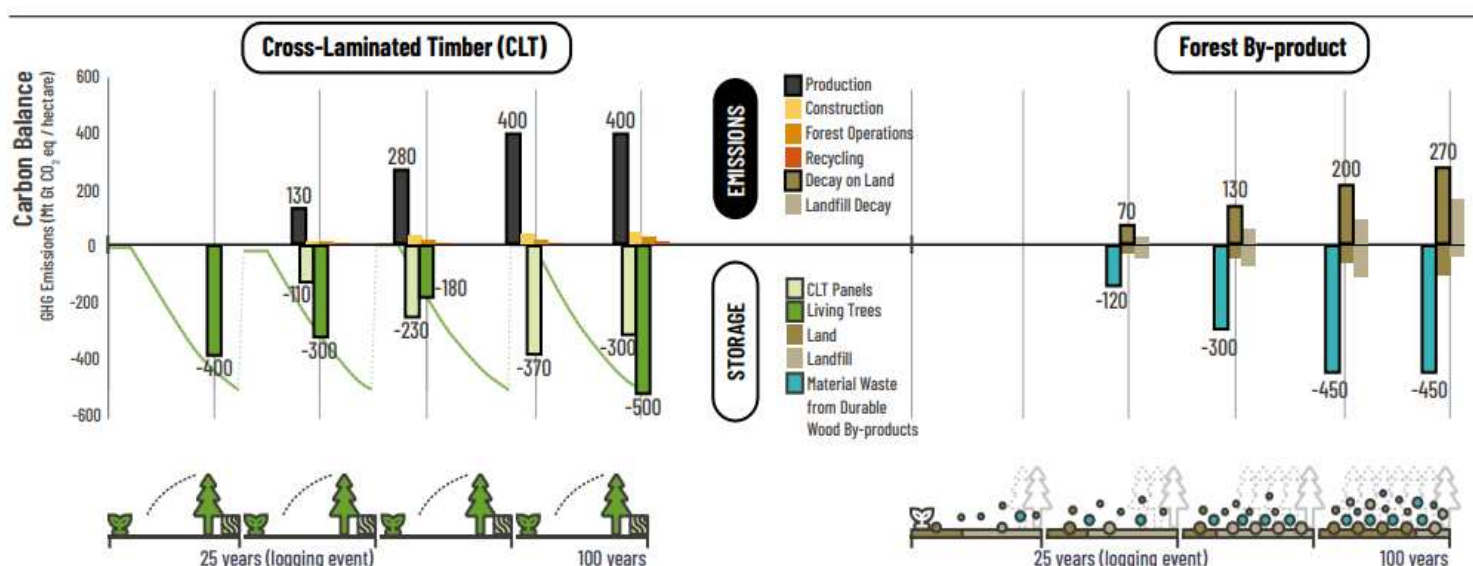


Figura 4 Balanço de carbono incorporado de MLCC e subprodutos florestais. Fonte: United Nations Environment Programme (2023)

Painéis MLCC são produzidos em camadas ímpares, entre 3 a 7 camadas (fig. 5). Segundo VILELA (2020) *apud* JELEČ *et al* (2018), a menor espessura comumente verificada de MLCC é a de 51 mm, com 3 camadas de 17 mm cada, sendo esta espessura de MLCC mais utilizada em algumas paredes com baixo carregamento e elementos não-estruturais. Frequentemente são utilizadas espessuras de lamelas de 160±6 mm para paredes e pisos com vão ≤ 5,50 m, variando conforme carregamento e utilização. A máxima espessura conferida ao MLCC é de 400 mm com 11 camadas, que é aplicada

em casos especiais, como lajes com vãos, carregamentos maiores e tabuleiro de ponte. De acordo com a NBR 7190 (2022), a espessura final de qualquer camada de MLCC, deve ser maior ou igual a 6 mm e menor ou igual a 60 mm.

Em configurações especiais, duas camadas consecutivas podem ser coladas na mesma direção, produzindo uma camada dupla, obtendo-se desta forma capacidades estruturais específicas, (FPINNOVATIONS, 2019). A colagem cruzada das camadas de tábuas (fig. 5) confere maior rigidez e estabilidade estrutural, em comparação a colagem das camadas na mesma direção da fibra, como por exemplo vigas de madeira lamelada colada MLC.

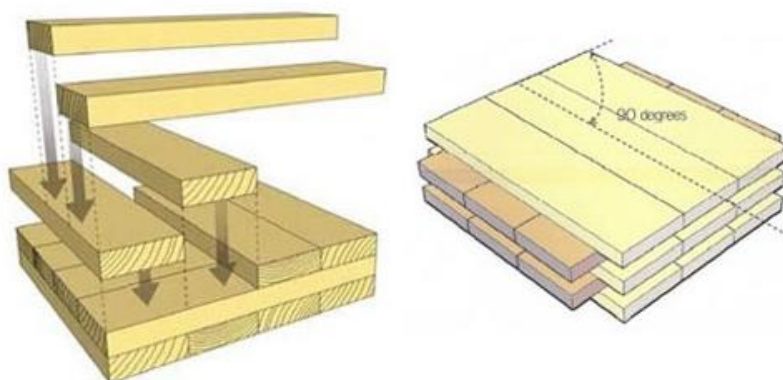


Figura 5 Direção das fibras das camadas de MLCC. Fonte: <http://www.remade.com.br/noticias/14810/madeira-laminadacolada-cruzada:-producao-e-desenvolvimento>

O processo da produção dos painéis MLCC, inicia-se com a preparação das lamelas, que são secas em estufa, até atingirem a umidade relativa de 12%, com variação de $\pm 2\%$. Em seguida, realiza-se a classificação visual das peças, excluindo defeitos como torção, rachaduras e encanoamento, que diminuem a área de contato no processo de colagem dos painéis. Em relação aos nós a avaliação é feita, afim de se garantir que não haja presença excessiva de nós em uma determinada lamela, ou então, nós com dimensões capazes de comprometer o desempenho mecânico da lamela. Nós soltos, cariados ou com dimensões maiores que 3 cm são substituídos por emendas dentadas.

Após esta classificação visual, é feita a classificação mecânica

não destrutiva das lamelas, com o objetivo de aferir a resistência das peças e posicioná-las na composição do painel, conforme a capacidade de carga. Concluída esta primeira etapa do processo, inicia-se a fase de montagem dos painéis de MLCC, na qual uma camada de lamelas é posicionada longitudinalmente e outra camada de lamelas é posicionada transversalmente, aplicando-se entre as camadas o adesivo estrutural.

3.2 MEDULA DO EUCALIPTO.

A medula do eucalipto, parte central do tronco, (fig. 6) que apresenta baixa densidade e qualidade mecânica inferior à madeira madura não é permitida para uso estrutural pela norma NBR 7190 (2022) que a classifica como defeito.



Figura 6 Desdobro da tora de madeira de eucalipto. Fonte: <https://www.custom-conference-tables.com/about/case-studies/solid-wood-slab-table-tops-introduction/>

Esta região da tora, normalmente é matéria prima destinada a produção de carvão e lenha. O desdobro paralelo das toras de eucalipto faz com

que a medula seja excluída na composição das tábuas e outros perfis.

No estudo realizado por BOSCHETTI *et. al* (2020), em madeira de *Eucalipto grandis* com idades diferentes, em uma mesma posição no sentido medula-casca, a densidade pode variar em até 0,27 g/cm³, como é possível observar em regiões mais próximas da casca (fig.7). Entretanto, é possível observar neste estudo que a densidade aumenta nesta região da medula com o amadurecimento da espécie, como mostra o gráfico da espécie *Eucaliptus grandis*, com 18 anos plantada em Anhembí-SP em comparação com as mais jovens.

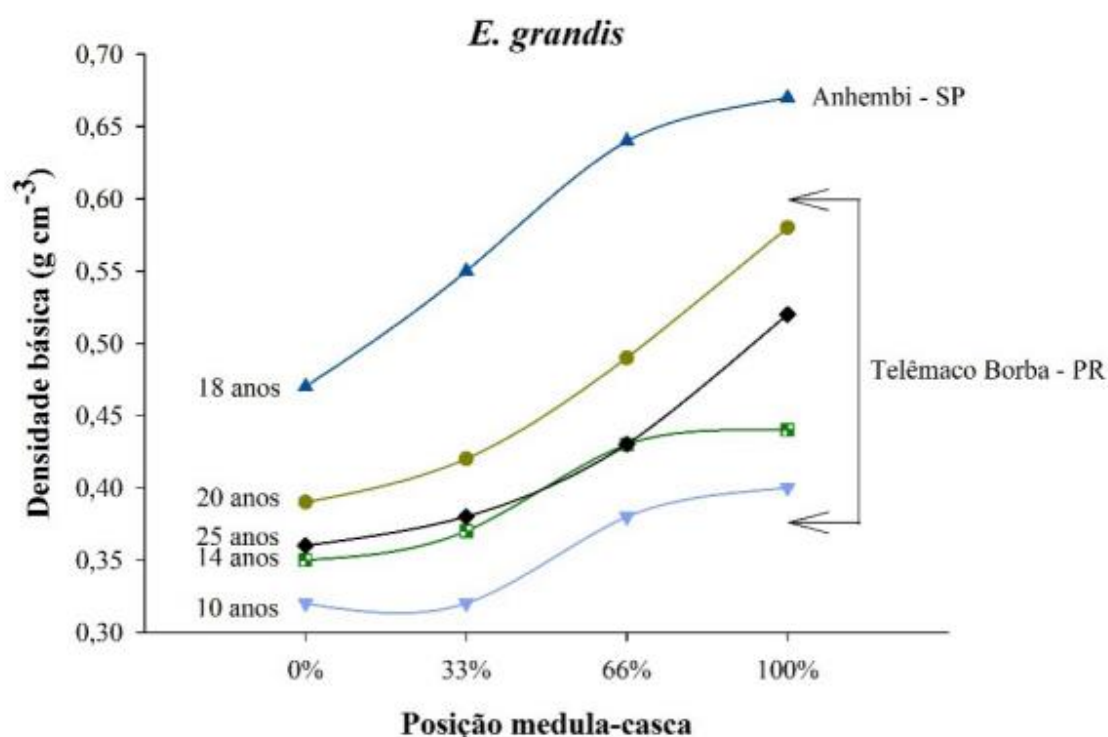


Figura 7 Variação da densidade na direção medula-casca. Fonte: BOSCHETTI *et al* (2020)

MELO *et. al* (2015) *apud* JUNIOR *et. al* (2019) destaca que a densidade é diretamente influenciada pela idade da árvore, principalmente em espécies florestais de rápido crescimento e quando são usadas ainda jovens. Para estes casos a influência quase sempre é direta, ou seja, a densidade básica aumenta com a idade da árvore.

Segundo a NBR 7190 (2022) a seleção das folhosas é dividida em classes, conforme demonstra quadro 1, que considera a densidade das peças, resistência e rigidez, assim como a resistência à compressão e ao cisalhamento.

Propriedade	D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Densidade média (g/cm ³)	0,475	0,485	0,530	0,540	0,560	0,620	0,700	0,900
Módulo de elasticidade médio E _{med} (MPa)	9.500	10.000	11.000	12.000	13.000	14.000	17.000	20.000
Resistência característica ao cisalhamento f _{v,k} (MPa)	3,4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5	5,0

Quadro 1 Propriedades das classes para folhosas. Fonte: adaptado NBR 7190 (2022)

No estudo realizado por ALENCAR e MOURA (2019) foi feita a classificação estrutural não destrutiva em 147 tábuas de medula de eucalipto. Os valores encontrados de módulo de elasticidade estáticos foram em média 8.915 MPa com coeficiente de variação de 20%, como demonstra o quadro 2.

Espécie		Densidade aparente $\rho_{\text{apa } 12\%}$ (kg/m ³)	MOE _{estático}
eucalipto	máximo	0,74	14.460
	mínimo	0,37	6.025
	Média	0,51	8.915
	CV (%)	16	20

Quadro 2 Dados obtidos de Módulo de Elasticidade e densidade. Fonte: ALENCAR e MOURA (2019)

Observa-se que os valores máximos e mínimos de MOE_{estático} são diretamente proporcionais a densidade. Em relação a densidade enquadra-se entre as classes D24 e D30, no entanto, a média do módulo de elasticidade é abaixo do valor mínimo estipulado pela NBR 7190 (2022) (quadro 1).

Contudo, os resultados da avaliação mecânica dos painéis MLCC fabricados com medula de eucalipto do estudo de ALENCAR e MOURA (2019) obtiveram valores de Módulo de elasticidade médios superiores (10.270 MPa) aos exigidos na norma ANSI/APA 320 (2019) (8.300 MPa).

Portanto a possibilidade do aproveitamento deste material na construção civil é uma forma de agregar valor a esta matéria prima e otimizar o aproveitamento da floresta plantada por m² de plantio.

3.3 CLASSIFICAÇÃO DA MADEIRA

A madeira, como matéria prima para a construção civil, em países europeus e na América do Norte, é amplamente utilizada, mesmo apresentando um potencial produtivo muito abaixo dos países tropicais, devido ao crescimento lento das árvores, devido a baixa incidência solar e invernos rigorosos. No Brasil, o solo e as condições climáticas favoráveis, luz e umidade, propiciam a formação de florestas em poucos anos, produzindo madeira ,em períodos muito inferiores aos daquele hemisfério.

De acordo com ROSA *et. al* (2020) a consequência do rápido crescimento das espécies, provenientes de florestas plantadas, é a baixa densidade e baixas propriedades mecânicas, assim como o aumento de defeitos, devido à alta porcentagem de madeira juvenil. No caso das folhosas, devido o aumento das tensões de crescimento ocorre o aumento da anisotropia da retração, o que ocasiona defeitos de secagem, tais como empenamentos e fendilhamentos, sendo estes defeitos mais severos na zona ao redor da medula com menor densidade.

3.3.1 CLASSIFICAÇÃO VISUAL

A norma ASTM D 245 (1993) (*Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber*)

determina os critérios para a limitação dos defeitos descritos em todas as regras de classificação visual em vigor na América do Norte. Esta norma não fornece as regras de classificação, mas estabelece critérios de como medir os defeitos.

A norma brasileira NBR 7190 (2022), não abrange os procedimentos para a classificação estrutural de peças de madeira. No entanto a qualidade da madeira é levada em consideração para o dimensionamento estrutural. Este coeficiente influencia os valores de cálculo das propriedades da madeira, em função da classe de carregamento da estrutura, da umidade admitida e do tipo de classificação realizada na peça, se somente visual ou realizada também de forma não destrutiva. Esta mesma norma, distingue as coníferas e as folhosas entre classes de acordo com a densidade.

De acordo com ROSA *et. al* (2020), para a determinação das classes visuais das lamelas, os nós da madeira devem ser medidos nas faces radial e tangencial e classificados conforme a proporção de área que ocupam na seção transversal da peça. Conforme as premissas da ASTM D 245 (2006) apud ROSA (2020) , a proporção da área que os nós ocupam na secção transversal da peça foram utilizadas para determinar as categorias de classificação visual da madeira, ou seja, Classe Estrutural Especial (SE), Classe nº 1 (S1), Classe nº 2 (S2) e Classe nº 3 (S3). As proporções das áreas admissíveis para os nós foram obtidas com base nas equações para a limitação dos nós e nas razões de resistência à flexão, descritas no apêndice da mesma norma (quadro 4).

Posição dos nós	SE	S1	S2	S3
Face e canto do lado	20%	25%	33%	50%
Centro da face	35%	45%	50%	75%

Quadro 3 Limite de área que o nó ocupa em relação à seção transversal da peça de madeira. Fonte: ROSA *et. al* (2020)

Segundo a NBR 7190 (2022), os defeitos que são considerados na classificação visual de peças de madeira serrada são: presença de medula, nós, inclinação excessiva das fibras, fissuras passantes e não passantes,

distorções dimensionais (encurvamento, arqueamento, encanoamento, torcimento, esmoado), ataques biológicos, danos mecânicos ou bolsas de resina. Em função dos defeitos presentes e de suas severidades, atribui-se uma classe visual à peça serrada de madeira de florestas plantadas: Classe 1, Classe 2 ou Classe 3.

Segundo CARREIRA e DIAS (2005), as classes de densidades para a madeira são definidas em função da taxa de crescimento da mesma, que se refere à quantidade de anéis presentes em 2,5 cm de comprimento (uma polegada), medidos em uma linha radial representativa. Para ser considerada densa, a madeira deve apresentar seis ou mais anéis de crescimento, peças consideradas com média densidade apresentam quatro ou mais anéis de crescimento e com menos de quatro são consideradas com baixa densidade.

Ainda segundo este autor, a classificação visual é baseada na premissa de que, as propriedades mecânicas de uma peça estrutural diferem das propriedades mecânicas de corpos-de-prova, isentos de defeitos, pelo fato da presença das características do crescimento da madeira, como por exemplo, os nós. Estes defeitos podem ser identificados através da classificação visual normatizada, para selecionar a madeira em classes de qualidade.

O SPIB (*Southern Pine Inspection Bureau*), que regula as normas de qualidade para a indústria de *Southern Pine*, e nas quais se encontram o *Pinus spp*, estima que mais de 95% da produção industrial de pinus nos Estados Unidos é classificada e comercializada em conformidade com estas normas.

Segundo CANDIAN (2007), o método de classificação desenvolvido por CARREIRA e DIAS (2005) permitiu verificar que o método de classificação visual, descrito nas regras do SPIB é adequado para ser aplicado na madeira, proveniente de florestas de *Pinus spp*, plantadas no Brasil.

Como a NBR 7190 (2022) não especifica a metodologia de classificação visual, que deve ser empregada, para o enquadramento das classes de coníferas e folhosas, a utilização de outras referências, como a norma ATSM D 245 (1993), torna-se importante. A norma recomenda a análise

das quatro faces e as duas extremidades de cada peça.

O manual de classificação visual desenvolvido por MOURA *et al.* (2012) para uso estrutural da madeira, da espécie pinus, considera o comprimento das peças, a localização e natureza dos nós, o desvio de grã, os empenamentos e as fendas, sendo que, de acordo com a quantidade de defeitos observados é atribuído um nível de qualidade para as peças. Esta classificação visual diferencia as peças em quatro classes: Estrutural especial (ES), Estrutural nº 1 (S1), Estrutural nº2 (S2) e Estrutural nº 3 (S3). Quanto a densidade de anéis da madeira: Densa (D) e Não Densa (ND) (quadro 4).

Defeitos	Classes			
	ES	S1	S2	S3
Rachaduras	60 cm	60cm	90 cm ou $\frac{1}{4}$ do comprimento da peça	$\frac{1}{6}$ do comprimento da peça, sem limitações se atravessar a largura da peça
Nós Cariado, Nó solto, Nó vazado e Nó de Gravata	Não admissível	Não admissível	$\frac{1}{3}$ (limite do diâmetro dos nós na largura da seção transversal)	$\frac{1}{2}$ (limite do diâmetro dos nós na largura da seção transversal)
Nó firme e Nó espora	$\frac{1}{6}$ (limite do diâmetro dos nós na largura da seção transversal)	$\frac{1}{4}$ (limite do diâmetro dos nós na largura da seção transversal)	$\frac{1}{3}$ (limite do diâmetro dos nós na largura da seção transversal)	$\frac{1}{2}$ (limite do diâmetro dos nós na largura da seção transversal)
Nó de quina	Não admissível	$\frac{1}{4}$ (limite do diâmetro dos nós na largura da seção transversal)	$\frac{1}{3}$ (limite do diâmetro dos nós na largura da seção transversal)	$\frac{1}{2}$ (limite do diâmetro dos nós na largura da seção transversal)

Quadro 4 Condições para Classificação Visual de Peças Estruturais de Madeira tipo pinus. Fonte: adaptado de MOURA *et al* (2012).

Segundo a NBR 7190 (2022), os nós avaliados na classificação

visual são somente os nós firmes. A ocorrência de nós cariados, soltos ou vazados em uma peça é motivo de seu descarte para uso estrutural. Os nós são avaliados exclusivamente nas duas faces e nas duas bordas da peça, excluindo-se o topo. É mensurado somente o nó mais crítico, aquele cujo diâmetro (D), avaliado na direção perpendicular, ao eixo principal da peça, ocupa a maior porcentagem da largura (h), da face da peça (fig. 8) ou a maior porcentagem da espessura da borda. A ocorrência do nó é expressa em termos da relação entre o seu diâmetro (D) e a dimensão da face ou borda considerada e expressa em $\text{mm}.\text{mm}^{-1}$

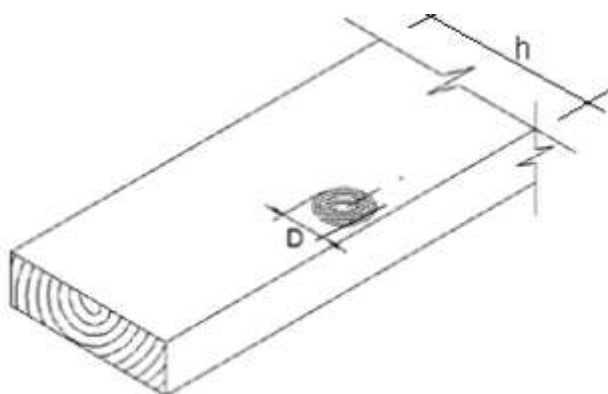


Figura 8 Medição do nó na face. Fonte: NBR 7190 (2022).

Um conjunto de nós é medido como um nó individual. Adota-se como o diâmetro de um conjunto de nós aquele definido por limites mais extremos do conjunto. Dois ou mais nós próximos, mas com fibras inclinadas em torno de cada nó, devem ser considerados isoladamente. Quando a ocorrência de nós próximos se der em uma mesma seção transversal, o diâmetro é obtido pela soma dos diâmetros individuais.

3.3.2 CLASSIFICAÇÃO MECÂNICA NÃO DESTRUTIVA

A determinação do módulo de elasticidade (MOE) tem como objetivo identificar e classificar as peças de medula de eucalipto, de acordo com a rigidez para que os corpos de prova dos painéis MLCC sejam compostos de maneira homogênea, em termos de características mecânicas. A classificação das lamelas de eucalipto, será realizada, segundo as orientações da norma

ASTM D 4761 (2002). As peças são dispostas em dois cavaletes metálicos, distanciados 2,40m. Uma peça de madeira é utilizada como apoio para marcar o centro das peças e medir a altura da flecha inicial e final. A flecha medida é a correspondente ao eixo de menor inércia (*flatwise*). Após a peça ser colocada no cavalete é marcado o centro e a altura da face inferior até a peça de apoio, obtendo-se a flecha inicial, logo em seguida é aplicada a uma carga no centro da tábua e medida a altura resultante da face inferior da peça até a referência, determinando a flecha final (fig. 9).

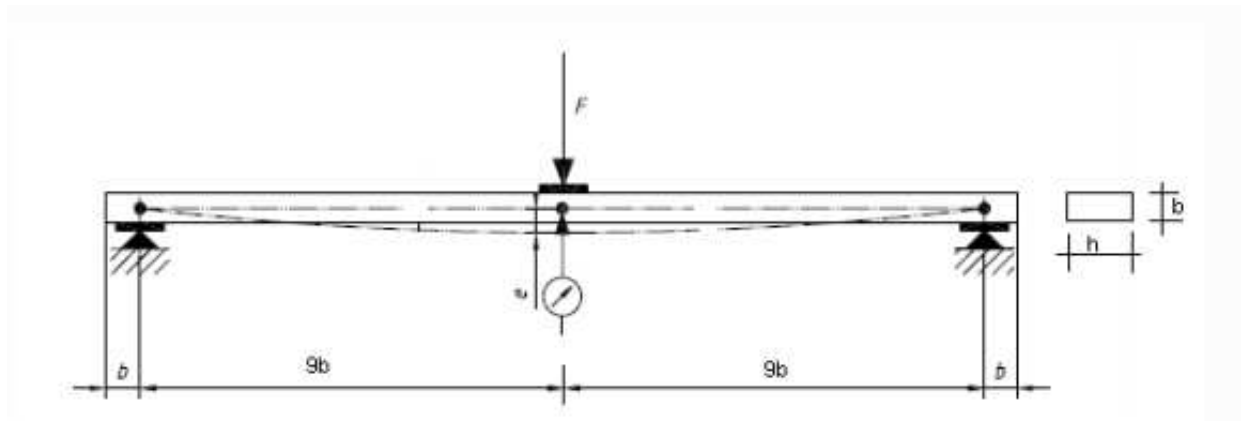


Figura 9 Ensaio a flexão Fonte: NBR 7190 anexo 7 (2022).

O resultado final obtido pela subtração da flecha inicial da final, determina a flecha resultante da peça analisada, sendo o valor utilizado para determinação do Módulo de elasticidade estático, através da Eq. (2).

$$MOE_{est} = \frac{FL^3}{48\Delta VxI} \quad \text{eq.(2)}$$

Onde:

MOE_{est} = módulo de elasticidade Estático (MPa);

F= Carga (N);

L = vão da tábua (mm);

ΔV = deslocamento ou flecha final (mm)

I = momento de inércia da seção transversal (mm⁴).

3.4 EMENDAS DENTADAS

Emendas dentadas fazem a ligação longitudinal das lamelas, permitindo a fabricação de painéis com maiores dimensões. Contudo, essas emendas, assim como os nós, resultam em fragilidade estrutural na lamela e conseqüentemente no painel MLCC que compõe. Esta análise estrutural da emenda dentada, confeccionada em tábuas de medula de eucalipto, objeto focal desta pesquisa, pretende corroborar a hipótese da viabilização deste subproduto, assim como, o maior aproveitamento da área de florestas plantadas.

O processo das emendas deriva da classificação visual e posterior eliminação de defeitos inadmissíveis pelas normas em materiais estruturais. A norma das folhosas NBR 7190 (2022) determina que torções, encanoamento, nós soltos, acima de 3cm e medula sejam excluídos das peças estruturais. Os elementos de madeira preparados, que foram classificados e otimizados para a produção de madeira colada, são fresados para obter juntas de comprimento de dente (finger joint) variando de 15 a 20 mm.

Segundo recomendações da NBR 7190 (2022), a distância mínima entre a emenda e o nó é três vezes seu diâmetro como ilustra a figura 10.

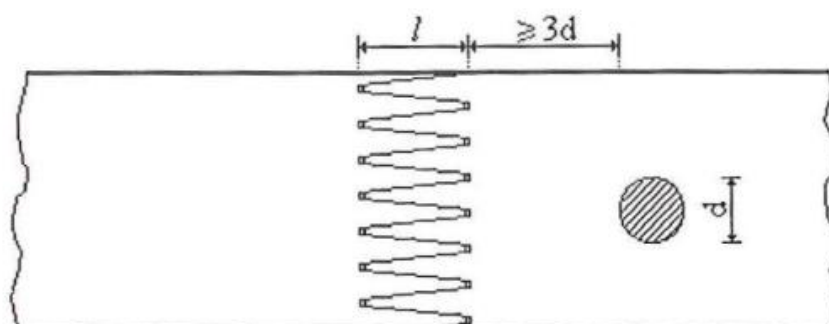


Figura 10 Distância mínima entre a emenda e o nó. Fonte: NBR 7190 (2022)

A Norma brasileira NBR 7190 anexo 6 (2022) estabelece os

parâmetros geométricos das emendas dentadas. (fig. 11).

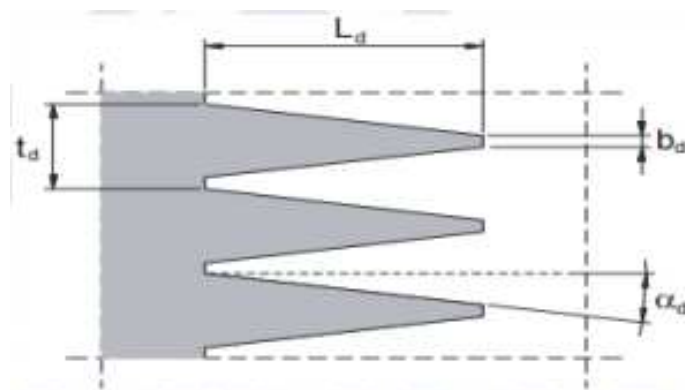


Figura 11 Parâmetros geométricos das emendas dentadas. Fonte: NBR 7190 anexo 6 (2022)

Legenda

L_d comprimento do dente

t_d passo do dente

b_d largura do dente

α_d ângulo de inclinação

De acordo com a NBR 7190 (2022), os adesivos utilizados nas emendas longitudinais, devem ser estruturais e apresentar propriedades compatíveis às condições ambientais, a que os elementos estruturais serão submetidos durante a sua vida útil. A quantidade de adesivo e os demais parâmetros de colagem devem atender às especificações técnicas, conforme indicação dos fabricantes do adesivo. A pressão total deve ser mantida pelo menos 2s. A determinação da pressão aplicada deve ser feita por meio da curva, conforme a figura 12, para evitar rachaduras e fissuras na zona de compressão dos dentes, assim como pela densidade das peças (fig. 13).

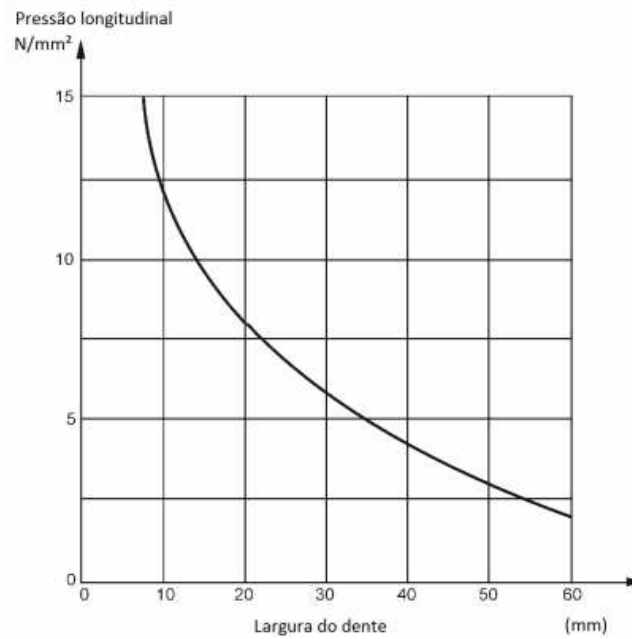


Figura 12 Relação recomendada entre o comprimento do dente e a pressão aplicada. Fonte: NBR 7190-6 (2022)

L_d mm	Pressão de colagem MPa	
	Densidade $\leq 0,50$ kg/m ³	Densidade $> 0,50$ kg/m ³
10	12	14
20	8	10
30	6	8
40	4,5	6,5
50	3	5
60	2	4

Figura 13 Relação recomendada entre o comprimento do dente, a pressão e densidade aplicada. Fonte: NBR 7190-6 (2022)

A resistência à tração paralela às fibras das emendas denteadas de lamelas de MLC ($f_{gt,0}$) é dada convencionalmente pela razão entre a máxima força de tração aplicada, a um corpo de prova alongado, e a área do trecho da emenda. A resistência à tração paralela às fibras é calculada conforme a seguinte equação:

$$f_{t,0} = \frac{F_{rupt}}{bh}$$

eq.(3)

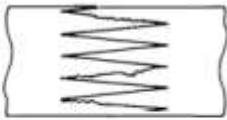

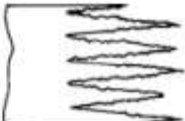


onde:

F_{rupt} é o valor da força de ruptura aplicada (força última);

b é a largura da seção transversal do corpo de prova;

h é a altura da seção transversal do corpo de prova

A norma ASTM D 4688 – Standard Test Method for Evaluating Structural Adhesives for Finger Jointing Lumber (1999), sugere seis modos de ruptura em ensaios de tração paralela. Na figura 14, encontra-se a descrição de cada um dos modos.

Modo	Descrição	Exemplo
0	Tensão máxima de ruptura atingida, porém sem rompimento da madeira.	
1	Ruptura ao longo das superfícies da linha de cola com poucas falhas (ruptura na madeira < 70%).	
2	Ruptura ao longo das superfícies da linha de cola com considerável ruptura por cisalhamento (ruptura na madeira > 70%).	
3	Ruptura ao longo do perfil da emenda, mas com alguma ruptura na base dos entalhes. Considerável ruptura por cisalhamento em toda a superfície do perfil.	
4	Ruptura na base das emendas. Poucas falhas ao longo do perfil.	

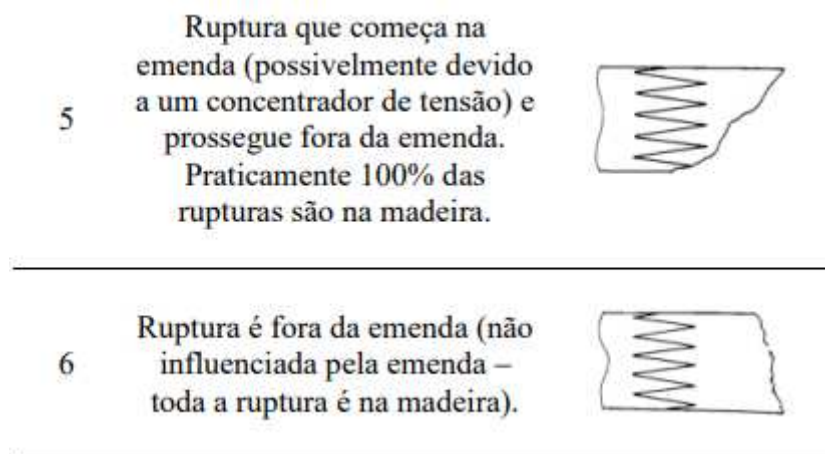


Figura 14 Modo de ruptura das emendas dentadas. Fonte: ASTM D 4688 (1999)

BOURSCHEID *et. al* (2015), testaram a resistência ao cisalhamento na linha de cola e a tração paralela as fibras de emenda dentadas em eucalipto, sem classificação, utilizando adesivo poliuretano monocomponente (PU) com gramatura de 250 g/m², para confecção de vigas MLC. O valor médio obtido nos ensaios de cisalhamento foi de 6,74 MPa apresentando em todos os corpos de prova fratura na madeira. Os resultados médios obtidos para os ensaios de tração foram de 43,1 MPa com taxas elevadas de ruptura na linha de cola. Quando comparados com *Eucalyptus grandis* maciço da NBR 7190 (2022), os valores obtidos no ensaio foram significativamente abaixo da média de 70,2 Mpa. Os resultados médio dos ensaios dos corpos de prova submetidos a delaminação foram de 33,63%.

Considerando a norma DIN 68 – 140 (1971), que descreve que, ao serem empregados emendas dentadas em lâminas que serão submetidas a elevados graus de esforços admite-se uma perda de resistência de 18%, devido ao grau de enfraquecimento que esse modelo de emenda promove em vigas de MLC. Segundo BOURSCHEID *et. al* (2015), nos ensaio houve perda de 38% de resistência nas emendas em comparação a madeira maciça.

SHUKLA *et. al* (2020), ensaiaram a resistência e a flexão de lamelas, com e sem emendas dentadas, de *Eucalypto grandis*. Os valores de Módulo de ruptura das peças sem emendas foram em média 91,1 MPa. As lamelas com emendas dentadas e adesivo Uréia Formaldeído (UF), obtiveram

valores médios de 58,9 MPa, ou seja, 35,5% de redução de resistência, devido as emendas dentadas. Os autores testaram as emendas com adesivo de acetato de polivinila (PVA) e obtiveram resultados de Módulo de ruptura médio de 47,6MPa, reduzindo a resistência em 52,2% em relação ao corpo de prova sem emendas dentadas.

No estudo elaborado por PEREIRA *et. al* (2016) analisaram a resistência à tração paralela às fibras e o modo de ruptura de corpos de prova de *Eucalypto lyptus*, com e sem emendas dentadas. Esta madeira tem uma densidade média de 0,75 g / cm³. Foram testadas amostras com 2 metros de comprimento. O valor de resistência à tração característica encontrado para a amostra com emendas dentadas foi de 24,21MPa e para amostras sem emendas dentadas foi de 50,37 MPa, ocorrendo uma redução de resistência de 47%. Segundo o autor, amostra sem emenda obtém maior resistência , devido ao fato de que suas fibras não foram quebradas, transmitindo as cargas de tração com maior eficácia em comparação as emendas coladas.

Quanto ao modo de ruptura, as amostras apresentaram resultados indicando que 50% das amostras romperam ao longo da linha de cola, ou seja, os esforços não foram transmitidos de forma eficiente. Quando as amostras cujas fibras de madeira se romperam, o adesivo também foi rompido. Além disso, a cola era menos resistente que a madeira em todos os casos, como mostra a Figura 15.





Figura 15 Modo de Ruptura dos ensaios de tração. Fonte: PEREIRA *et. al* (2016)

MEETHAWORN e SRIVARO (2017), realizaram estudo em emendas dentadas na espécie indiana rubberwood (seringueira), com densidade de $0,66 \text{ g/cm}^3$ e obtiveram valores de módulo de ruptura (MOR) médio de 66,5 MPa para as emendas verticais. Em comparação aos testes em corpos de prova sem emendas, com resultados médios de 103 MPa, a redução da resistência causada pelas emendas dentadas foi em torno de 60%. A ruptura na ligação dentada acontece normalmente de três maneiras, sendo (a) ruptura ao longo da superfície da cola devido a inaptidão da colagem (a), combinação de fratura na base e na superfície da colagem da emenda (b) e (c) fratura na madeira, distante da emenda, demonstrando maior resistência da colagem da ligação que o próprio material. Os resultados dos testes de tração paralela as fibras com emendas apresentaram 60% das fraturas tipo a (fig. 16), que caracteriza falha na linha de cola.

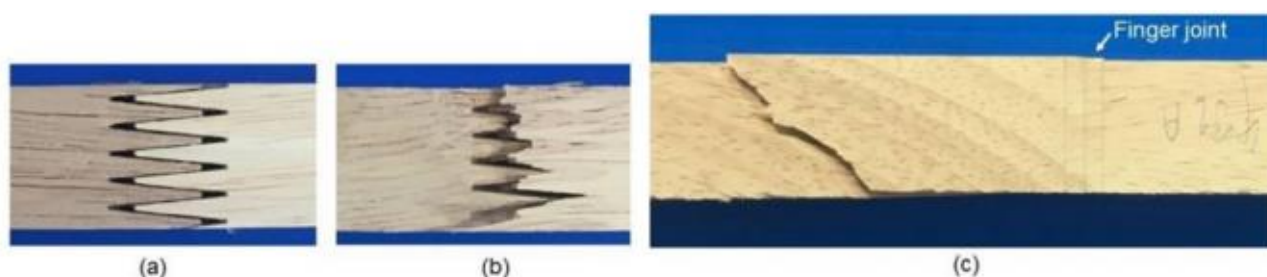


Figura 16 Modo de ruptura das emendas dentadas. Fonte: MEETHAWORN e SRIVARO (2017)

O estudo elaborado por MACEDO (1996) analisou a tração paralela às fibras na madeira com emenda dentada da espécie *Eucalypto grandis*, com densidade média de 0,60 g/cm³. Os resultados obtidos neste estudo (fig. 17) mostram que a resistência à tração nas emenda alcançou em média 6,09 KN/cm². Sobre o modo de ruptura 47,6% das amostras testadas romperam na linha de cola e 13% na linha e na madeira, demonstrando a fragilidade estrutural que a emenda dentada confere a estrutura. Estes valores serão utilizados como padrão de comparação no estudo presente.

De acordo com ANSELL (2015) *apud* STUPP (2016), o comprimento do entalhe influencia significativamente na eficiência da emenda múltipla. Baseando-se na norma alemã DIN 68140 relataram que, o desempenho ótimo de emendas por entalhes múltiplos foi obtido com um comprimento de entalhe de 18 mm e pressão de 8 MPa para madeiras de baixa densidade e 12 MPa para a de média densidade.

No estudo realizado por STUPP (2016), foram testadas peças de eucalypto com densidade de 0,42 g/cm³ em ensaios de tração, paralela às fibras em 77 corpos de prova, com e sem emendas dentadas, utilizando adesivo poliuretano (PU), conforme a norma NBR 7190 (2022), obtendo-se valores médios de 53,33 MPa de módulo de ruptura (MOR) para a madeira maciça e média de 23,98 MPa (MOR) para os corpos de prova com emendas dentadas, ou seja, uma redução de 55% na resistência da peça.

SERRANO (2009), em ensaio de tração paralela às fibras em eucalypto com densidade média de 0,64 g/cm³ e utilizando adesivo Cascophen (resorcinol-formol), obteve resistências médias de 50,04 MPa de (MOR) para amostras com emendas dentadas e 68,39 MPa para amostras maciças, 26,88% a mais de resistência. Nos testes de cisalhamento em corpos de prova os valores observados foram em média de 6,23 MPa.

Segundo a NBR 7190 (2022), as propriedades de resistência definidas em ensaios de peças estruturais a tração paralela às fibras para as folhosas, com a variação da classe D18 a D70, estipulada em 11 MPa a 42MPa

de (MOR) respectivamente. Ainda segundo a norma, devem ser empregadas lamelas com densidade aparente entre 0,40 g/cm³ e 0,75 g/cm³. No caso de peças com densidade superior a 0,75 g/cm³, deve ser feita uma avaliação criteriosa do comportamento das juntas coladas

No estudo realizado por BOCANEGRA *et al.* (2017), foi analisada a resistência e modo de ruptura das emendas dentadas em peças de eucalipto, com densidade média de 0,77 g/cm³, utilizando adesivo poliuretano (PU). Os valores de resistência do módulo de ruptura (MOR) encontrados nas peças com e sem emendas foram em média 87 MPa e 107 MPa respectivamente.

Foi possível observar neste estudo, que não houve uma boa correlação entre a resistência, a ruptura e a densidade das peças, pois tanto os grupos das amostras com baixas e altas densidades, obtiveram resultados inferiores de resistência a ruptura. No entanto, a correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico (MOE_{din}) e o módulo de ruptura (MOR).

Em relação ao modo de ruptura das peças do estudo acima citado, a maior incidência foi do tipo 1 (58%), como demonstra a figura 17. Este tipo de fratura ocorreu ao longo da linha de cola da emenda dentada e foi observada em todas as categorias de amostras, desde os mais baixos, aos mais altos valores de módulo de elasticidade dinâmico e densidades. O tipo 2 de falha ocorreu em 25% do total, também foi distribuído de forma equânime por quase toda as faixas de valores de MOE_{din} e densidade. No entanto, os tipos 3 e 4, que são caracterizadas por múltiplas falhas nas raízes das emendas e falhas de madeira, juntas responderam por 17% do total de falhas e ocorrem apenas em valores de baixos MOE_{din} e densidade (MOE_{din} de aprox. 14.000 MPa a 20.000 MPa e densidade na faixa de 0,55 a 0,70 g/cm³).



Figura 17 Modo de ruptura dos corpos de prova. Tipo 1 – 2 – 3 – 4. Fonte: BOCANEGRA *et. al* (2017)

autor	Densidade aparente g/cm ³	MOR (MPa) resistência a tração paralela as fibras com emenda dentada	MOR (MPa) resistência a tração paralela as fibras sem emenda dentada	Tipo de fratura
BOURSCHEID <i>et. al</i> (2015)	0,60	43,1 (PU)	59,47	Majoria na linha de cola
SHUKLA <i>et. al</i> (2020)	-	58,9 UF 47,6 PVA	91,1	-
PEREIRA <i>et. al</i> (2016)	0,75	24,21	50,37	50% na linha de cola
MACEDO (1996)	0,60	60,9	60	47% na linha de cola
MEETHAWORN <i>et. al</i> (2017)	0,66	66,5	103	65% falha na linha de cola
ANSELL (2015) <i>apud</i> STUPP (2016)	0,42	54 (PU)	-	-
SERRANO (2009)	0,64	50,04 (resorcinol-formol)	68,39	Predominante falha na raiz do dente
BOCANEGRA <i>et. al.</i> (2017)	0,77	87 (PU)	107	58% falha na linha de cola
NBR 7190 (2022)	D18 D70	11 42	-	-

Quadro 5 Resumo dos resultados encontrados na literatura. Fonte: Autor

3.5 ADESIVOS

Outro fator que altera a resistência dos painéis MLCC é o tipo de adesivo utilizado na fabricação. A norma ANSI/APA PRG 320 (2019), requer que os adesivos utilizados para a fabricação dos painéis sejam regulamentados pela norma AITC 405, no entanto somente para condições de uso interno ou seco. Segundo a NBR 7190 (2022), os adesivos empregados nas emendas de continuidade, seja na fabricação das peças estruturais de MLC ou de MLCC, devem ser estruturais e apresentar propriedades compatíveis às condições ambientais a que os elementos estruturais são submetidos durante toda a sua vida útil, conforme as EN 301, EN 15425 e EN 16254, a depender do tipo de adesivo utilizado. Os adesivos utilizados com mais sucesso no MLCC são do tipo Fenólico: Fenol-resorcinol-formaldeído, Emulsão Polímero Isocianato (EPI) e os Poliuretanos (PU).

Os adesivos estruturais, geralmente, são mais rígidos que a madeira, segundo USDA (2010) alguns exemplos incluem fenol, resorcinol, melanina, uréia e caseína. Adesivos estruturais que mantêm sua resistência e rigidez sob saturação de água e a secagem cíclica mais severa são considerados adesivos inteiramente exteriores, chamados de estruturais. Adesivos rígidos que perdem sua habilidade de transferir mais rapidamente a carga que a madeira em condições de serviço, no que diz respeito a umidade, são considerados adesivos para uso interior, os não-estruturais. Os adesivos que mantêm a resistência e a rigidez na água em curto prazo, mas se deterioram mais rapidamente que a madeira, são os semi-estruturais, podem ser usados externamente, mas protegidos da umidade, como demonstra o quadro 6.

Tipos de adesivos	Local de uso	Adesivo Utilizados
Estrutural	Uso exterior, sem restrições	Fenol-formaldeído
		Resorcinol-formaldeído
		Fenol - resorcinol-formaldeído
		Polímero de emulsão/isocianato
		Melanina-formaldeído
	Uso exterior, com restrições	Melanina-ureia-formaldeído
		Isocianato
		Epóxi
	Interior	Uréia-formaldeído
Caseína		
Semi-estrutural	Uso exterior, com limitações	Polivinil acetato
Não-estrutural	Interior	Poliuretanos
		Polivinil acetato
		Animal
		Elastômeros de construção
		Elastômeros de contato
		Hot-melt

Quadro 6 Adesivos de madeira categorizados de acordo com seu desempenho estrutural previsto em níveis da exposição ambiental. Fonte: USDA (2010)

A NBR 7190 (2022), estipula que na ausência de recomendação do fabricante do adesivo sobre quantidade, parâmetros de colagem ou comprovação de desempenho da qualidade, deve-se observar que na colagem das peças de MLC e MLCC, a junta de cola entre lamelas deve receber uma pressão mínima de 0,7 MPa para madeiras de densidade inferior ou igual a 0,5 g/cm³ e de 1,2 MPa para madeiras de densidade superior a 0,5 g/cm³.

A penetração do adesivo na madeira envolve a capacidade do adesivo em entrar pelos vazios da superfície (adsorção), como por exemplo, os lumens, ou de penetrar na própria parede celular, segundo PARIS *et al* (2015) *apud* CAVALHEIRO (2018). De acordo com a autora o desempenho de materiais ligados por adesivos, incluindo produtos de madeira, depende da capacidade do adesivo em transferir tensões mecânicas, através da interface comum. Como a madeira é um material natural, poroso, a natureza da interface é altamente variável e adesivos líquidos podem fluir e penetrar no substrato celular durante a ligação.

Ainda segundo CAVALHEIRO (2018), a densidade influencia a adesão. Até uma faixa de massa específica de 0,7 e 0,8 g/cm³ a resistência da

linha adesiva tende a aumentar, no entanto, a partir deste ponto há uma tendência de diminuir a resistência à ligação colada. A porcentagem de falhas que ocorrem em ensaios de cisalhamento é inversamente proporcional à massa específica da madeira, portanto, quando a madeira apresenta massa específica elevada, o grau de dificuldade de adesão aumenta. Neste caso, a madeira apresenta menos espaços vazios (poros), dificultando a penetração do adesivo no interior da madeira e diminuindo o ancoramento feito pelo adesivo.

Tanto a porosidade como permeabilidade afetam a adesão, porém, se ocorrer penetração excessiva, em profundidades maiores, uma ligação fraca pode ser gerada. Isto explicaria em parte os valores baixos encontrados da resistência de emenda de topo, onde existe um número grande de vazios, com penetração excessiva do adesivo, gerando ligações fracas LATORRACA *et al.* (2005) *apud* CAVALHEIRO (2018).

Para que ocorra um contato íntimo e contínuo entre um adesivo e um substrato é necessário que o adesivo umidifique a madeira, para tanto deve ocorrer a migração do adesivo para dentro da estrutura submicroscópica da parede celular, expulsando ar, água e outros componentes. Esta umidificação depende da natureza molecular do adesivo, qualidade da superfície, mobilidade molecular do adesivo, pressão e tempo de colagem.

SEGUNDINHO *et. al* (2018), avaliaram as propriedades físicas e mecânicas da madeira de Eucalyptus com densidades médias de $0,65 \text{ g/cm}^3$, para a produção de elementos de MLC colados com adesivos à base de resorcinol-fenol-formaldeído (RFF) e poliuretano (PU), com gramatura de 300 g/m^2 para ambos. A partir de corpos de prova com de elementos de MLC, obtiveram valores de resistência mecânica aos esforços de compressão, paralela às fibras de $50,9 \text{ MPa}$ para o adesivo PU e $48,15 \text{ MPa}$ para o adesivo RFF. Os valores resultantes dos testes de compressão normal às fibras e cisalhamento nas linhas de cola foram $10,61 \text{ MPa}$ e $12,68 \text{ MPa}$ respectivamente para o adesivo PUR e $8,68 \text{ MPa}$ e $10,40 \text{ MPa}$ para RFF.

No entanto, na avaliação da eficiência das linhas de cola, por meio de ensaio de delaminação e penetração dos adesivos na madeira, o

adesivo PU obteve um desempenho inferior ao adesivo RFF. A proporção média de delaminação para o adesivo poliuretano (PU) foi de 34,4% e para o adesivo RFF foi de 5,02%. Este resultado, segundo os autores, foi consequência da diferença de espessura dos adesivos. Foi observado que o valor maior de delaminação ocorreu na espessura menor da linha de cola do PU, enquanto os resultados de menor delaminação podem ser associados a maior espessura de linha de cola do RFF, 70% mais espessa que a linha de cola do PU.

DUGMORE *et. al* (2019) desenvolveram uma pesquisa para avaliar a qualidade da colagem em painéis MLCC produzidos com 5 camadas de eucalipto e utilizando adesivo PU com gramatura de 180 g/m². O painéis foram divididos em dois grupos de acordo com a densidade média das lamelas, sendo 60 painéis com média de densidade acima de 0,54 g/m³ e 60 painéis abaixo deste valor. A densidade mais elevada da madeira apresentou um efeito positivo na resistência ao cisalhamento com média de 4,35 MPa, para as baixas densidades o valor observado foi de 3,88 MPa. No entanto, a densidade mais baixa apresentou médias de delaminação de 17,57%, resultado inferior ao das densidades mais elevadas (25,60%). Observou-se que aplicação de uma alta pressão de prensagem (0,7 MPa) foi benéfica para a qualidade da colagem, especialmente quando utilizada com madeiras de alta densidade, pois ajudou a reduzir a delaminação e aumentar a resistência ao cisalhamento.

BIANCHE *et. al* (2017), avaliaram a resistência ao cisalhamento na linha de cola de juntas de eucalipto, com densidade de 0,67 g/cm³, coladas com diferentes adesivos e diferentes gramaturas. Os valores observados para a resistência ao cisalhamento, utilizando o poliuretano bicomponente à base de mamona foi de 7,51 MPa, 7,61 MPa e 8,10 MPa para as gramaturas de 150, 200, e 250 g/m² respectivamente. O percentual de falha na madeira observada pelos autores, não foi proporcional ao aumento da gramatura como ocorreu com resistência ao cisalhamento, sendo 81,61% (150 g/cm³), 40,14% (200 g/cm³) e 71,10% (250 g/cm³), ou seja, o aumento da gramatura não contribuiu para aumentar a resistência do adesivo na madeira.

SILVA *et. al* (2023), estudaram a viabilidade do uso de clone de eucalipto, uma madeira de rápido crescimento para a produção de MLC, com

densidade média de 0,46 g/cm³ e módulo de elasticidade médio (MOE) de 13.009 MPa. O adesivo utilizado foi poliuretano (PU) com gramatura de 225 g/m². Segundo os autores, a ligação adesiva é diretamente influenciada pelas propriedades da madeira, visto que as principais propriedades que interferem no processo de construção e desempenho da ligação adesiva são as propriedades anatômicas, físicas, químicas e mecânicas, fato que explica as folhosas apresentarem mais dificuldade de colagem em relação às coníferas.

Os valores de resistência média ao cisalhamento da madeira maciça foi de 9,3 MPa e da linha de cola da MLC de 8,3 MPa. Sobre o modo de ruptura, o adesivo poliuretano à base de mamona, foi eficiente na colagem do clone de eucalipto, pois fratura dos corpos de prova nos testes de cisalhamento ocorreu na madeira.

YUSOH *et. al* (2020) investigaram os efeitos das espécies de madeira, pressão de prensagem e taxa de aplicação de cola nas propriedades de aderência da madeira lamelada colada cruzada (MLCC) fabricada a partir de quatro espécies de madeiras tropicais: batai (*Paraserianthes falcataria*), sesendok (*Endospermum malaccensis*), rubberwood ou seringueira (*Hevea brasiliensis*) e kedondong (*Canarium sp.*) O estudo analisa como esses fatores influenciam a resistência da ligação e a delaminação das amostras de MLCC. O adesivo utilizado foi o resorcinol formaldeído (PRF) aplicados em 3 gramaturas 300, 250 e 200 g/m². Os resultados observados nos ensaios de cisalhamento e delaminação dos corpos de prova extraídos dos painéis MLCC foram de 3,10MPa e 6,09% para espécie batai (0,43 g/cm³), 3,67 MPa e 5,99% para espécie sesendok (0,48 g/cm³), 6,85 MPa e 4,50% para a espécie seringueira (0,70 g/cm³) e 5,81MPa e 6,36% para espécie kedondong (0,77 g/cm³). A delaminação foi influenciada principalmente pela espécie de madeira, com espécies de maior densidade mostrando maior tendência à delaminação.

LOBÃO *et. al* (2006), realizaram ensaios de cisalhamento em eucalipto, com densidade média de 0,82 g/cm³, com aplicação de adesivo na proporção de 300 g/m² de resorcinol-formaldeído em face dupla e pressão de 1 MPa. Os resultados de resistência média encontrada foram de 9,7 MPa. Segundo estes autores, combinar duas espécies de densidades diferentes no

processo de adesão, produz juntas com resistência menor que a madeira menos densa, ocorrendo ruptura sempre na madeira com menor densidade.

FARIA *et. al* (2020), investigaram o comportamento mecânico da madeira laminada colada de *Hevea brasiliensis* (seringueira), com densidade média de $0,62 \text{ g/cm}^3$, produzida com adesivo poliuretano monocomponente (PU), aplicado com gramatura de 350 g/m^2 . Os valores médios encontrados nos ensaios e flexão estática foram de 77,93 MPa para módulo de ruptura (MOR) e 6.793,77 para módulo de elasticidade (MOE). Nos ensaios em corpos de prova submetidos ao cisalhamento, os valores médios de resistência encontrados foram de 7,65 MPa.

Nos ensaios realizados por VITAL *et. al* (2006), com juntas de três regiões do tronco da espécie de *Eucalyptus grandis*, com aplicação de adesivo resorcionol-formaldeído na proporção de 300 g/m^2 em face dupla de colagem, observou-se que para a medula do eucalipto com densidade de $0,58 \text{ g/cm}^3$, um resultado de resistência ao cisalhamento de 7,9 MPa.

CHERRY *et. al* (2023), desenvolveu uma pesquisa comparando a produção de painéis MLCC utilizando duas espécies de pinus *Pinus elliottii elliottii* (Engelm) e *Pinus caribaea hondurensis* (Sénéclauze) (PEE×PCH) com densidades médias de $0,740 \text{ g/cm}^3$ em amostras contendo nós e medula. O adesivo utilizado foi o poliuretano monocomponente (PU). A qualidade da ligação dessa madeira foi avaliada usando testes de delaminação e cisalhamento, comparando madeira sem defeitos com madeira contendo resina, nós e medula. A presença de resina, nós e medula impactou significativamente o desempenho da ligação. Resina e nós, em particular, levaram a maiores taxas de delaminação e menores porcentagens de falha de madeira, sugerindo que esses defeitos enfraqueceram a linha de ligação. Em relação a medula, por apresentar baixa resistência e fibras circundantes, que tem a função de transferir tensões de forma eficaz por meio da ligação adesiva, teve como resultado a falha prematura da madeira ao invés da falha na linha de cola.

Os valores médios observados neste estudo para o ensaio de cisalhamento foram de 2.4 MPa no sentido transversal as fibras (MLCC) e com

83% de falha na madeira (fratura profunda). Acerca da delaminação houve uma diferença considerável entre os corpos de prova sem defeitos 7,2% e os que continham nós 42,9%.

De acordo com CHERRY *et. al* (2023), testes de delaminação e cisalhamento são comumente usados para avaliar a resistência de ligação e a qualidade da linha de cola. O teste de delaminação analisa linhas de ligação e porcentagens de falha da madeira e é usado para avaliar a capacidade da madeira para resistir ao encolhimento e às tensões de dilatação sob condições climáticas, assim como a capacidade do adesivo de resistir à degradação pela umidade. O teste de cisalhamento, por outro lado, avalia a capacidade do adesivo de transferir tensão entre as camadas de madeira coladas, sob a tensão de cisalhamento. Esses testes fornecem informações sobre qual é o elo mais fraco na ligação, se a interface madeira-adesivo, o adesivo ou a madeira. Ainda de acordo com o autor, como esses testes fornecem informações diferentes, é recomendado que ambos os testes sejam utilizados para uma melhor compreensão.

IWAKIRI *et. al* (2021), analisaram o uso da madeira de *Eucalyptus badjensis* com densidade média de 0,475 g/cm³ para produção de painéis de *Edge Glued Painel* (EGP), painéis de madeira colados lateralmente, utilizando adesivo Poliacetato de vinila (PVA) e Emulsão Polimérica de Isocianato (EPI), nas gramaturas de 160, 180 e 200 g/m². Os maiores valores obtidos nos ensaios de resistência ao cisalhamento foram de 12,66 MPa para juntas coladas com adesivo EPI com gramatura de 180 g/m². Os resultados observados pelos autores em relação a falha da madeira foram de percentagens inferiores a 40%, para o adesivo EPI, no entanto, nenhum dos tratamentos com adesivo PVA atendeu a este requisito, referente às falhas na madeira, indicando uma baixa qualidade de colagem.

A norma NBR 7190 (2022) estabelece valores mínimos para ensaios de cisalhamento em espécies folhosas com densidade média de 0,570 g/m³ (D40) de 4,0 MPa.

Autores	Espécie	Densidade aparente g/cm³	Adesivo	Gramatura g/m²	MOR (MPa) resistência ao cisalhamento	Delaminação %
SEGUNDINHO <i>et. al</i> (2018)	eucalipto	0,650	PU RFF	300	12,68 PU 10,40 RFF	34 PU 5,02 RFF
BIANCHE <i>et. al</i> (2017)	Eucalipto	0,670	PU Base mamona	150 200 250	7,51 7,61 8,10	81,61 40,14 71,10
SILVA (2023)	Eucalipto	0,460	PU	225	8,3	-
LOBÃO <i>et. al</i> (2006)	Eucalipto	0,820	Resorcinol- formaldeído	300	9,7	-
FARIA <i>et. al</i> (2020)	Seringueira (<i>Hevea brasiliensis</i>)	0,620	PU	350	7,65	-
VITAL <i>et. al</i> (2006)	Eucalipto	0,580	Resorcinol- formaldeído	300	7,90	-
SERRANO (2009)	Eucalipto	0,640	Cascorez	250	6,23	-
IWAKIRI <i>et. al</i> (2021)	<i>Eucalyptus badjensis</i>	0,475	EPI	180	12,66	-
AZAMBUJA <i>et. al</i> (2023)	<i>Yellow-Poplar</i> 5 camadas	0,430	Isocianato	340	5,1	-
BOURSCHEID	Eucalipto	0,600	PU	250	6,74	33,63

<i>et. al</i> (2015)						
YUSOH <i>et. al</i> (2020)	batai (<i>Paraserianthes falcataria</i>), sesendok (<i>Endospermum malaccensis</i>), rubberwood ou seringueira (<i>Hevea brasiliensis</i>) e kedondong (<i>Canarium sp.</i>)	0,430 0,480 0,700 0,770	Resorcinol- formaldeído	200	3,10 3,67 6,85 5,81	6,09 5,99 4,50 6,36
SIKORA <i>et. al</i> (2016)	<i>Irish Sitka Spruce</i>	0,437	PU	160	2,08 (3 camadas) 1,03 (5 camadas)	-
DUGMORE <i>et. al</i> (2019)	Eucalipto 5 camadas MLCC	$\leq 0,540$ $\geq 0,540$	PU	180	3,88 4,35	17,57 25,60
CAVALCANTE (2022)	Eucalipto MLCC	0,59	PU	160 180	3,76	42,14 28,91
CHERRY <i>et. al</i> (2023)	<i>Pinus Ellioti</i> / <i>Pinus Caribbean</i>	0,740	PU	180	2,40	7,2 sem defeito 42,9 com nós

Quadro 7 Resumo comparativo dos resultados de ensaios de cisalhamento e delaminação da revisão de literatura. Fonte: Autor

3.6 RESISTÊNCIA DOS PAINÉIS MLCC (MÓDULO DE RUPTURA E MÓDULO DE ELASTICIDADE)

A norma ANSI/APA PRG 320 (2019), determina valores mínimos para módulo de elasticidade e módulo de ruptura para painéis constituídos com espécies canadenses e americanas. Estas espécies são avaliadas através de classificação tanto visual como de forma mecânica (destrutiva e não destrutiva), obtendo-se também valores de compressão e cisalhamento, nas duas direções das fibras, paralelo e perpendicular ao eixo do painel.

Os valores mínimos de referência, segundo a norma ANSI/APA PRG 320 (2019) para resultados obtidos em módulos de ruptura e módulo de elasticidade para painéis MLCC, fabricados com espécies *Spruce-pine-fir*, *Douglas-fir-Larch* e *Eastern Softwoods* classificadas visual e mecanicamente não destrutiva (E) e somente classificada visualmente (V), são observados no quadro 8. Estes valores são referentes a esforços de cargas aplicados no sentido longitudinal do painel.

Espécies de madeira	MOR (MPa)	MOE (MPa)
E1	28,2	11.700
E2	23,9	10.300
E3	17,4	8.300
V1	10	11.000
V2	11,8	9.500

Quadro 8 Valores para módulo de Ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE).
Fonte: ANSI/APA PRG 320 (2019).

O estudo realizado por ALENCAR e MOURA (2019), testou a resistência e rigidez de 16 painéis MLCC com 3 camadas, elaborados com pinus em todas as camadas (PPP), medula de eucalipto em todas a camadas (EEE) e meclando medula de eucalipto com pinus (EPE) e (PEP), com densidades

médias de 0,52 g/cm³ para ambas espécies. Os painéis foram agrupados em 3 classes de acordo com a média dos módulos de elasticidades das tábuas, sendo um grupo de painel elaborado com tábuas sem classificação. O adesivo utilizado foi o melanina uréia formaldeído (MUF) com gramatura de 200 g/m². No quadro 9, pode-se observar que os resultados obtidos nos painéis EEE, foram encontrados resultados para (MOE), em média de 10.270 MPa e para (MOR) em média de 22 MPa.

Painel	EEE (MPa)		EPE (MPa)		PPP (MPa)		PEP (MPa)	
	MOE	MOR	MOE	MOR	MOE	MOR	MOE	MOR
1(subgrupo MOE)	10873	25	10202	24	8604	36	8604	44
2 (subgrupo MOE)	10391	26	10337	22	8355	38	6854	42
3 (subgrupo MOE)	9546	21	9894	25	7373	22	6261	32
Sem classificação	10116	22	10402	25	8632	33	6266	19
média	10270	24	10144	24	8111	32	7240	39
Desvio padrão	672	3	227	2	651	9	1218	7
COV%	6,5	11,4	2,2	7,3	8,0	27,0	16,8	16,9

Quadro 9 Resultados dos ensaios em Painéis MLCC. Fonte: ALENCAR e MOURA (2019)

Estes valores são superiores aos mínimos exigidos pela norma regulamentadora ANSI/APA 320 (2019) 10MPa (MOR) e 8.500MPa (MOE). Os painéis elaborados com a composição pinus (EPE e PEP) mostraram resultados inferiores de módulo de elasticidade, no entanto para módulo de ruptura obtiveram médias de valores iguais para os painéis elaborados com medula do eucalipto nas camadas externas 24MPa (EPE) e superiores quando localizado na camada central dos painéis 39 MPa (PEP).

A diferença é expressiva para módulo de ruptura entre as peças que são classificadas apenas visualmente V1 (10MPa) (quadro 7), para as que são classificadas também de forma não destrutiva E1 (28,2 MPa) para a mesma espécie. No entanto esta diferença é baixa, em relação ao módulo de elasticidade, 11.000 MPa para V1 e 11.700MPa para E1.

LIAO *et. al* (2017), testaram painéis MLCC com 3 camadas elaborados com madeira juvenil de eucalipto, com densidade média de 0,58 g/cm³, e com MOE_{din} médio da lamelas de 13.800 MPa. Para a confecção dos painéis foi utilizado o adesivo poliuretano monocomponente (PU), com gramatura de 160g/m². Os resultados observados pelos autores foram em média de 11.466 MPa para módulo de elasticidade (MOE) e 24,5 MPa para módulo de ruptura (MOR), que apresentam características estruturais próximas a medula do eucalipto em painéis MLCC, com resultados acima dos estipulados nas normas que regulamentam o MLCC. No entanto, estes estudos com madeira juvenil e medula não abordam a aptidão, a colagem e o comportamento mecânico das emendas dentadas nas lamelas.

Painéis MLCC podem ser produzidos de diversas dimensões e espessuras, sendo elementos estruturais definidos, de acordo com a solicitação estrutural. As tábuas que compõem os painéis, normalmente tem o comprimento de 3 metros, portanto quando há necessidade de comprimentos superiores podem ser empregadas emendas dentadas, no entanto de acordo com estudo de STUPP (2016) o grau de enfraquecimento médio da resistência entre peças de madeira maciça de eucalipto em ensaios de tração, com emendas foi de 18% em comparação as peças sem emendas.

WANG *et. al* (2014) realizaram testes mecânicos em painéis MLCC combinando espécies diferentes. Foram utilizadas três espécies, *Douglas fir*, *Pinus radiata* e *Populus euroamericana*. Os defeitos encontrados nas peças das espécies *Populus euroamericana* e na *Douglas fir* foram retirados e para obtenção dos comprimentos necessários, estas peças foram emendadas.

Foram fabricadas 5 tipos de combinações de painéis MLCC com 3 camadas, utilizando-se adesivo poliuretano (PU), com dimensões de 2,1 m de comprimento por 1 m de largura. Destes 5 tipos de painéis, 3 foram fabricados usando a espécie *Populus euroamericana*, com densidade de 0,45 g/cm³ na camada transversal, dois tipos com espécies *Pinus radiata*, com densidade de 0,47 g/cm³ e *Douglas fir*, com densidade de 0,41 g/cm³ nas camadas longitudinais e um inteiramente fabricado com esta espécie. As outras

combinações foram dois tipos totalmente elaborados com as espécies *Pinus radiata* e *Douglas fir*.

Os valores mais expressivos obtidos pelos autores nestes ensaios de flexão realizados em painéis MLCC foram de 44,5 MPa para módulo de ruptura (MOR) nos painéis elaborados inteiramente de *Pinus radiata* e 8.690 MPa para módulo de elasticidade (MOE) para os painéis elaborados somente com a espécie *Douglas fir*. Os painéis compostos inteiramente pela espécie menos densa, *Populus euroamericano* mostram resultados de 41,6 MPa para módulo de ruptura e 5.970 MPa para módulo de elasticidade.

Os valores menores foram observados nos painéis compostos pelas espécies *Douglas fir* nas camadas longitudinais e *Populus euroamericano* na camada transversal, 31,5 MPa para MOR e 8.070 MPa para MOE. Em comparação aos resultados encontrados nos painéis elaborados somente com *Douglas fir* (34,7 MPa para MOR e 8.690 MPa para MOE), o que se percebe é que esta espécie menos densa (*Populus euroamericano*) na camada central fez com que o painel se tornasse menos resistente e menos rígido. Mesmo resultado observado para as combinações contendo *Pinus radiata* com *Populus euroamericano* na camada transversal (41,23 MPa para MOR e 6.210 MPa para MOE) em comparação com os painéis elaborados somente com *Pinus radiata* (44,5 MPa para MOR e 6.350 MPa para MOE).

Neste estudo, os autores observaram que as falhas ocorriam nas peças longitudinais, que continham emendas dentadas. Os maiores resultados de MOR foram observados nos painéis elaborados com peças sem emendas dentadas, concluindo que este tipo de ligação realmente diminui a resistência dos painéis.

WANG et. al (2017) analisa as propriedades de cisalhamento perpendicular (*rolling shear*) (GR) e resistência ao cisalhamento (fR) da madeira de álamo de crescimento rápido utilizada em painéis de madeira lamelada colada cruzada (MLCC) em relação as características mecânicas da influência da presença da medula. A medula teve um impacto substancial na densidade da madeira apresentando densidade média (0,457 g/m²) 19,64% mais baixa que as

peças sem medula.

As tábuas com medula apresentaram os menores valores médios de 119 MPa (GR) e 2,09 MPa (fR), que foram significativamente inferiores aos valores das tábuas sem medula, 177 MPa (GR) e 2,24 MPa (fR). A presença da medula causou uma diminuição nas propriedades de cisalhamento rolante devido à menor densidade e à presença de rachaduras associadas à medula. Sobre o modo de falha, nas tábuas com medula, a falha ocorreu tipicamente ao redor da medula, com rachaduras que se propagaram ao longo dos anéis de crescimento ou dos raios da madeira, refletindo a menor resistência mecânica nessa região. De acordo com WANG *et. al* (2017), os resultados foram superiores aos que as normas estipulam como mínimas, a ANSI/ APA (2019) prediz 50 MPa (GR) e 0,5 MPa (fR) em madeiras macias (*softwoods*) e a norma EN 1635:2015 estipula 50 MPa (GR) e 0,7 MPa (fR).

GUTIERREZ *et. al* (2023), avaliou a resistência e rigidez de painéis MLCC com 3, 5 e 7 camadas, desenvolvidos com eucalipto, com densidade média de 0,57 g/cm³. Foram utilizados dois tipos de adesivos, para as emendas o poliuretano monocomponente (PU) e para a fabricação dos painéis o adesivo isocianato com 180 g/m² de gramatura. As lamelas com e sem emendas dentadas foram classificadas de forma não destrutiva e destrutiva, obtendo valores médios de MOR de 87MPa e MOE de 13.646 MPa para as peças maças e média de 60,6 MPa de MOR para as lamelas com emendas. Não houve diferença entre os valores obtidos de MOE das peças com e sem emendas. Foram produzidos painéis MLCC com emendas dentadas de 15mm e 10mm de comprimento sendo que as emendas mais longas aumentaram a resistência dos painéis em 17%.

O valor médio da resistência à flexão para os painéis MLCC de três, cinco e sete camadas e com emendas de 10mm de comprimento foram, respectivamente, 31,3 MPa, 26,0 MPa e 26,8 MPa de MOR. Os resultados mostraram que não houve relação entre a resistência à flexão e a espessura do painel. Segundo os autores a qualidade e a resistência das emendas dentadas são essenciais para o desempenho do MLCC, pois ocupam um papel significativo na resistência final dos mesmos. Deve haver o controle da geometria

das emendas, da quantidade de adesivo, do tipo de aplicação e tempo de pressão para atingir a resistência desejada.

A pesquisa desenvolvida por SIKORA *et. al* (2016) investiga os efeitos da espessura dos painéis de madeira lamelada colada cruzada (MLCC) feitos de Irish Sitka Spruce (*Picea sitchensis*), com densidade de 0,437 g/m³, no desempenho mecânico, *especialmente* em relação à flexão e ao cisalhamento. Foram realizados testes em painéis de 3 e 5 camadas com diferentes espessuras para avaliar a rigidez e a resistência. O adesivo utilizado foi o poliuretano monocomponente (PU) com gramatura de 160 g/m².

Os resultados mostraram que, à medida que a espessura do painel MLCC aumenta, a resistência à flexão tende a diminuir. Os painéis mais finos apresentaram maior resistência à flexão. A resistência ao cisalhamento também diminuiu com o aumento da espessura dos painéis. Os valores médios de cisalhamento (*rolling shear*) variaram entre 1,0 MPa e 2,0 MPa. Os resultados dos ensaios de flexão observados nos painéis com 3 e 5 camadas e 20mm de espessura cada, foram 37,67 MPa e 33,91 (MOR) e 9.956 MPa e 12.238 MPa (MOE) respectivamente. Os valores dos ensaios de cisalhamento obtidos nos painéis com 3 e 5 camadas (20mm) foram 2,08 MPa e 1,03 MPa. Embora os painéis mais espessos ofereçam maior rigidez, eles têm menor resistência à flexão e ao cisalhamento, indicando que a espessura do MLCC desempenha um papel crucial no desempenho mecânico desses materiais.

Em um outro estudo realizado por SIKORA *et. al* (2016) com a mesma espécie, os autores avaliam a resistência ao cisalhamento e a durabilidade das juntas adesivas em painéis de MLCC utilizando dois adesivos, poliuretano (PU) e fenol-resorcinol-formaldeído (PRF). Foram realizados ensaios de cisalhamento e delaminação. Os resultados mostraram que o adesivo PU apresentou maior resistência ao cisalhamento em comparação ao PRF, que por sua vez, mostrou melhor desempenho em termos de durabilidade, especialmente após o envelhecimento acelerado. Foram produzidos quatro tipos de corpos de provas com pressão de 0,4 / 0,6 / 0,8 e 1 MPa. Observou-se nos resultados para o adesivo PU, que a delaminação menor (7%) ocorreu na maior pressão, no entanto nas demais pressões os valores foram próximos. Em relação

ao cisalhamento, os valores resultantes das pressões 0,4, 0,6 e 0,8 foram semelhantes (2,6, 2,7 e 2,9 MPa) e o maior valor foi para a pressão de 1 MPa (3,2 MPa), podendo-se concluir que o desempenho da colagem com o adesivo PU foi superior na pressão mais elevada.

PANG *et. al* (2020) avaliaram a influência dos nós na resistência e rigidez de painéis MLCC fabricados com *Pinus korainenses* sem emendas dentadas apresentando densidades média entre 0,35 e 0,40 g/cm³ e módulo de elasticidade (MOE) médio das tábuas de 8.000 MPa. O adesivo utilizado foi o fenol-resorcinol com gramatura de 250 g/m². A madeira usada foi classificada em grupos com base na classificação mecânica e na razão de área de nós *knot area ratio* (KAR). Foram fabricados quatro tipos de painéis de acordo com a classificação das tábuas, no entanto não houve diferença significativa do resultado entre os painéis.

Os resultados obtidos nos ensaios de flexão em quatro apoios foram de 28,15 MPa para módulo de ruptura (MOR) e 8.010 MPa para MOE. Foi observado que a resistência à flexão (MOR) é mais significativamente afetada pela KAR do que o módulo de elasticidade (MOE). No que se refere ao modo de ruptura dos painéis, a falha ocorreu próxima aos nós, que são considerados pontos de fragilidade estrutural, conforme demonstra a figura 18. A pesquisa mostrou que o KAR maior que 0,5 pode ainda estar dentro dos limites aceitáveis para certas aplicações, permitindo o uso de madeira de menor qualidade.

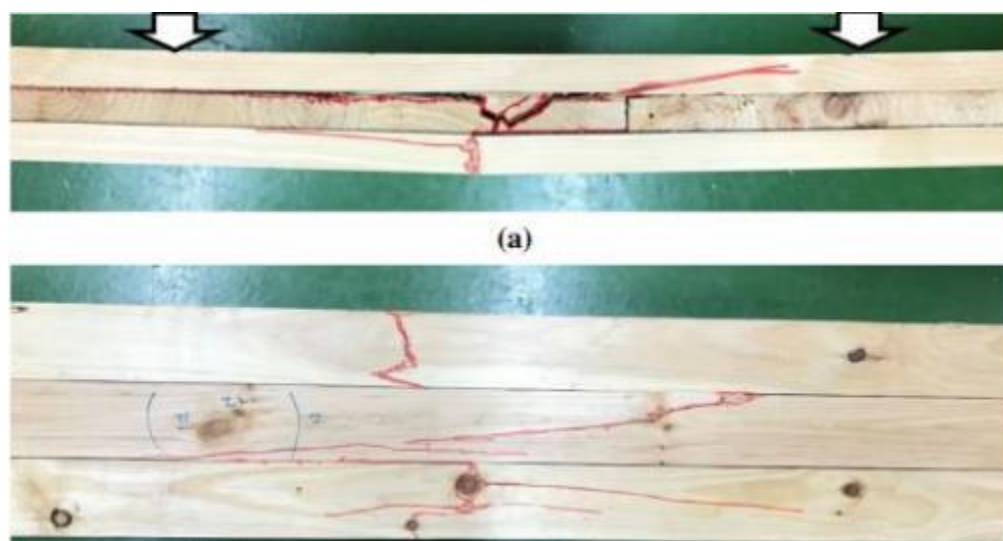


Figura 18 Modo de ruptura dos painéis ao redor dos nós. Fonte: PANG *et. al* (2020)

FLAIG *et. al* (2014), realizaram estudo que consistiu em testes de flexão e ruptura realizados em vigas MLCC, elaboradas com Norway spruce (*Picea abies*) com e sem emendas dentadas, utilizando adesivo, melanina uréica formaldeído (MUF). Este autores também realizaram uma simulação computadorizada com seis tipos diferentes de vigas MLCC, variando o número de camadas e a largura das tábuas. Os resultados dos testes de flexão mostraram valores médios para MOR com densidade média de 0,45 g/cm³ e sem emendas dentadas de 40 MPa e 12.800 MPa para MOE. Os resultados obtidos para densidade média de 0,40 g/cm³, foram de 32 MPa para módulo de ruptura (MOR) e 10.000 MPa para módulo de elasticidade (MOE). Ou seja a densidade exerce papel preponderante no comportamento mecânico do painel.

Nas vigas MLCC formadas por peças unidas com emendas dentadas observaram-se falhas nestas ligações em 21% dos testes realizados com madeira mais densa. Nas vigas MLCC formadas com peças menos densas a falha na ligação emendas dentadas foi de 7%.

Nas simulações por computador realizadas por FLAIG *et al* (2014), das 362 vigas MLCC produzidas com emendas dentadas, 264 resultaram em falhas nestas ligações. De acordo com essa simulação, a resistência à flexão não depende somente do número de camadas longitudinais, mas também da largura das tábuas que compõe cada camada. Foram simuladas vigas MLCC com 2 a 4 camadas longitudinais, assim como larguras entre 75 mm e 150 mm. Os resultados observados mostram que, quanto menores as larguras das tábuas e conseqüentemente maior o número destas peças nas camadas, maiores valores de resistência a flexão foram observados. Vigas MLCC com 4 camadas longitudinais e 8 tábuas com largura de 75 mm, o valor observado nesta simulação foi de 31,7 MPa para MOR, nesta mesma configuração com tábuas de 150 mm o valor obtido foi de 28,2 MPa.

AZAMBUJA *et. al* (2023) realizou um estudo investigando a viabilidade de produzir painéis de madeira lamelada colada cruzada (MLCC) a partir de madeira de baixa qualidade yellow-poplar (*Liriodendron tulipifera*) com densidade média de 0,43 g/cm³. Foram produzidos 10 painéis com 5 camadas de 19mm cada utilizando o adesivo isocianato com gramatura de 340 g/cm². Os

painéis apresentaram uma resistência média à flexão de 11,8 MPa (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) médio de 9.584 MPa. Os testes de delaminação mostraram que 9 dos 10 painéis apresentaram delaminação superior ao limite permitido de 5%, especialmente nas áreas externas dos painéis, indicando possíveis problemas de pressão desigual durante a prensagem. No entanto, os testes de cisalhamento mostraram que a resistência superou os requisitos da norma, com uma média de 5,1 MPa e falha média na madeira de 95%.

No estudo realizado por ALENCAR (2015) observou-se que houve a influência dos nós como pontos de fragilidade, em testes realizados em painéis MLCC como demonstra a figura 19.



Figura 19 Painel MLCC detalhe da ruptura no nó. Fonte: ALENCAR (2015)

Os resultados dos ensaios elaborados neste estudo mostraram que os painéis fabricados com medula de eucalipto alcançaram valores maiores que os exigidos pela norma ANSI/APA 320 (2019).

Assim como o resultado obtido nos ensaios de flexão em painéis MLCC realizado por CONCU *et. al* (2013), as peças que continham nós na região próxima ao centro do painel foram os locais onde ocorreram maiores incidências de colapso, ou seja, defeitos nas lâminas diminuem a resistência dos painéis, pelo fato da ruptura ocorrer no alinhamento dos nós.

No estudo realizado por VILELA (2020), foram testados 7 painéis MLCC fabricados de *pinus spp*, com média de densidade de 0,591 g/m³, média de resistência a flexão de 78,24 MPa (MOR) e média de módulo de elasticidade

de 14.029 MPa (MOE). Destes 7 painéis testados, 5 registraram ruptura a tração nas emendas dentadas, com média de 42 MPa (fig. 20). Outro aspecto relevante da pesquisa foi em relação ao adesivo estrutural utilizado, Purbond® HB S 709, que é um monocomponente à base de poliuretano, que foi aplicado nos painéis em gramaturas de 220 g/m² e 250g/m² de adesivo. O resultado observado foi que não houve diferenças significantes entre as gramaturas para a rigidez e resistência.

Segundo o autor as emendas dentadas no MLCC são responsáveis por manter o comportamento flexível do MLCC em um regime linear de deformações, antes que a madeira sob compressão venha produzir deformações plásticas.

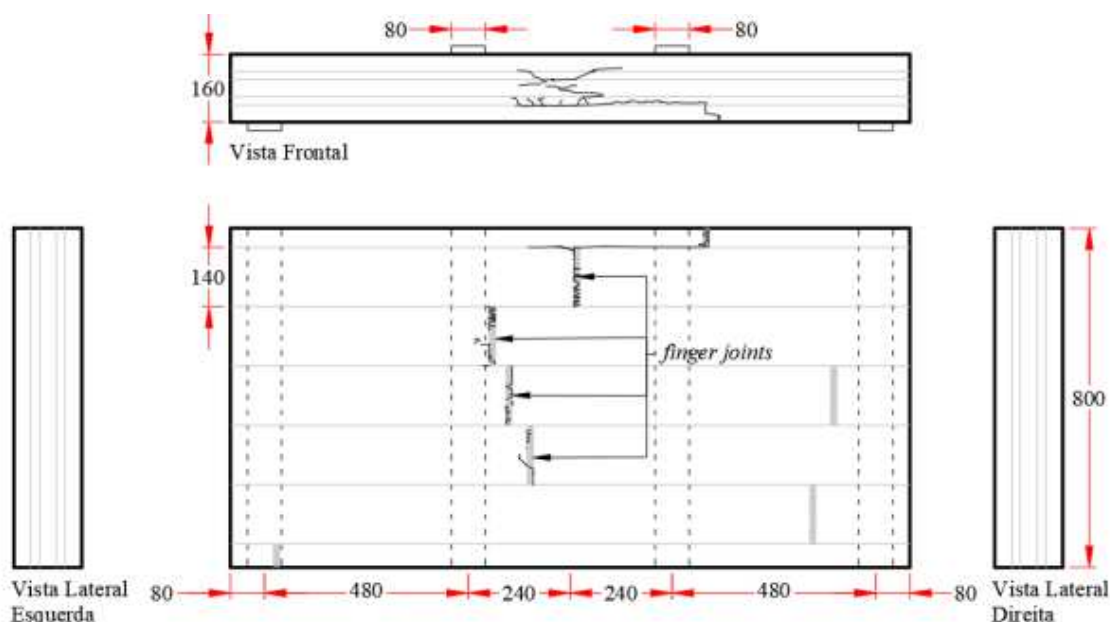


Figura 20 Ruptura dos painéis nas emendas dentadas. Fonte: VILELA (2020)

No estudo desenvolvido por CAVALCANTE (2022), foi testada a qualidade da linha de cola, por meio de ensaios de resistência ao cisalhamento e falha da madeira em painéis MLCC fabricados com 3 camadas de 16mm de eucalipto com densidade média de 0,59 g/cm³. O adesivo utilizado foi o PU (poliuretano monocomponente) com gramaturas de 160 e 180 g/m². Os resultados encontrados para resistência ao cisalhamento dos painéis foi de 3,76 MPa com percentual de falha na linha de cola em 24% das amostras. Para a delaminação o resultado dos corpos de prova de eucalipto, com gramatura de 160g/m² foi de 42,14% e para 180 g/m² foi de 28,91%, ou seja, uma melhor performance de colagem foi observada na maior gramatura de adesivo.

A norma britânica EN385 (2001), recomenda que as emendas dentadas estejam distantes de um nó, no mínimo 3 vezes o diâmetro do mesmo, a mesma regra aplica-se quando for removido este nó, desta forma pode-se questionar se há um aumento da resistência dos painéis MLCC, utilizando-se estas emendas ou se não há incrementos consideráveis que subsidiem este aumento de mão de obra e material para a fabricação dos painéis. No caso desta pesquisa não será este questionamento aprofundado.

Para uma melhor avaliação da colagem dos painéis, além dos ensaios mecânicos de cisalhamento, é importante serem realizados testes de delaminação em corpos de prova. Estes ensaios, conforme a norma canadense CSA 0112.10 (2006) consistem em submeter os corpos de prova a um ciclo em autoclave, alternando as peças a submersão em água e posteriormente a um vácuo sob pressão. Após 4 ciclos, que totalizam 8 horas, os corpos de prova são secos por 88h, este processo é repetido ao longo de 12 dias. Para os ensaios é feita a análise da qualidade da linha de cola, segundo CALIL (2012) a delaminação não deve exceder 1mm, acima deste valor de espaçamento é considerado falha na linha de cola.

No entanto, mesmo diante de resultados promissores quanto ao uso da medula do eucalipto em painéis MLCC, investigações acerca das propriedades físicas deste produto ainda são necessárias, principalmente os ensaios de cisalhamento para avaliação da linha de cola entre as lamelas. Como mostra a figura 21, o estudo de ALENCAR (2015) não aprofundou sobre as

hipóteses destas rupturas.



Figura 21 Painel MLCC detalhe da falha na linha de cola. Fonte: ALENCAR (2015)

Na pesquisa de KOMATSU *et. al* (2021), foram produzidos painéis MLCC com cedro japones (*Cryptomeria japônica* D. Don), com densidade média de $0,42 \text{ g/m}^2$ e utilizando adesivo isocianato, com pequenas dimensões (60x100cm) e depois conectados usando emendas dentadas, formando painéis MLCC de maior dimensão. Os resultados obtidos na configuração de 3 camadas foram de 25,23 MPa (MOR) e 5.780MPa (MOE). Apesar de apresentar valores de MOE abaixo dos requisitos mínimos exigidos pela ANSI/APA 320 (2019), que estipula 8.000 MPa, os valores de MOR foram acima dos 10MPa indicados pela mesma norma.

No entanto, ao contrário do que regimenta a norma NBR 7190 (2022) que indica o afastamento mínimo de 50 cm entre as emendas nas lamelas das camadas do painel MLCC, no estudo do autor acima citado, as emendas ficam alinhadas verticalmente (fig. 22), aumentando a área de fragilidade do painel MLCC como ilustra a figura 23, onde a ruptura acontece exatamente na emenda.

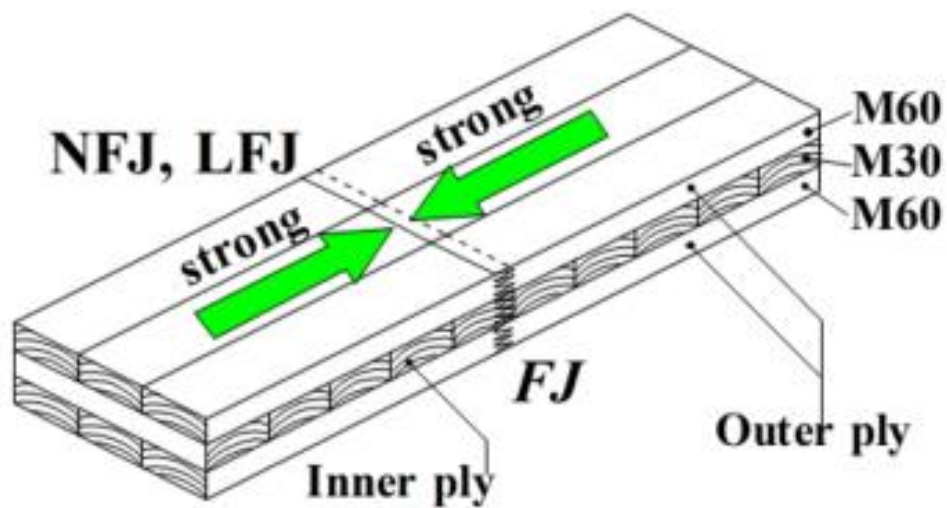


Figura 22 Emenda dentada unindo dois painéis MLCC na direção de maior resistência. Fonte: KOMATSU *et. al* (2021)



Figura 23 Modo de ruptura do painel com 3 camadas. Fonte: KOMATSU *et. al* (2021)

No quadro 10 é possível observar o resumo dos resultados observados pelos autores.

Autores	espécie	Adesivo/ gramatura	Densidad e (g/cm³)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
CONCU <i>et. al</i> (2014)	Pinus Sem emendas	-	0,49	7.913	26,1
LIAO <i>et. al</i> (2017)	Eucalipto Sem emendas	PU 160 g/m ²	0,58	11.466	24,5
WANG <i>et. al</i> (2014)	<i>Pinus radiata</i>	PU	0,45	6.350	44,5
	<i>Douglas fir</i> (sem defeito com emendas)	PU	0,47	8.690	34,7
	<i>Populus euroamericana</i> (sem defeito com emendas)	PU	0,41	5.970	41,6
FLAIG <i>et. al</i> (2014)	Vigas MLCC com emendas (<i>Picea abies</i>)	MUF	0,45	12.800	40
		MUF	0,40	10.000	32
GUTIERREZ <i>et. al</i> (2023)	Eucalipto 3 /5/7 camadas Com emendas	Isocianato 180 g/m ²	0,57	13.646	31,3 26,0 26,8
AZAMBUJA <i>et. al</i> (2023)	<i>Yellow-Poplar</i> 5 camadas Sem emendas	Isocianato 340 g/m ²	0,43	9.584	11,8
SIKORA <i>et. al</i> (2016)	<i>Irish Sitka Spruce</i> Sem emendas	PU 160 g/m ²	0,437	9.956 (3 camadas) 12.238 (5 camadas)	37,67 (3 camadas) 33,91 (5 camadas)
VILELA (2020)	Pinus Com emendas	PU 250 g/m ²	0,59	14.029	42
KOMATSU <i>et. al</i> (2021)	Cedro japonês Com emendas	isocianato	0,42	5.780	25,28
PAING <i>et. al</i> (2020)	<i>Pinus Korainenses</i> Sem emendas	Fenol resorcinol 250 g/m ²	0,35 e 0,40	8.010	28,15
ALENCAR e MOURA (2019)	Medula do eucalipto Sem emendas	MUF 200 g/m ²	0,51	10.270	24

Quadro 10 Resumo comparativo dos resultados de ensaios em painéis MLCC da revisão bibliográfica. Fonte: Autor

3.7 SÍNTESE DA REVISÃO DE LITERATURA

Com base nos parâmetros fornecidos pela revisão da literatura, a tese sobre o comportamento mecânico de painéis estruturais MLCC, fabricados com medula do eucalipto, com emendas dentadas, obteve subsídios para determinação da metodologia e análise dos resultados dos ensaios de rigidez, resistência, cisalhamento e delaminação. A publicação da revisão da norma NBR 7190 em 2022, foi importante para o cenário da produção da madeira engenheirada no Brasil, pois foram incluídas diretrizes para cálculos e dimensionamentos estruturais, assim como critérios e recomendações de ensaios para painéis MLCC. Portanto, tanto a norma NBR 7190 (2022), como os estudos dos autores revisados são primordiais como parâmetros para elaboração da tese.

A classificação visual e não destrutiva são metodologias eficientes para agrupar as peças analisadas em classes de valores de módulos de elasticidade, afim de poder relacionar e comparar estas características com as propriedades resultantes nos testes mecânicos não destrutivos e destrutivos, realizados nos painéis MLCC. A análise da literatura mostrou que a ruptura nas lamelas longitudinais ocorrem com maior incidência nos nós afetando os resultados de MOR, portanto a classificação visual para retirada dos defeitos é importante para um melhor resultado estrutural.

Segundo os autores revisados, lamelas de eucalipto menos denso com média de $0,40 \text{ g/cm}^2$ apresentaram uma boa aptidão a colagem e resultados acima dos parâmetros mínimos estipulados em normas para resistência e rigidez. No entanto a densidade da madeira afeta os resultados de módulo de elasticidade (MOE) e ruptura (MOR) em ensaios de flexão, cisalhamento, assim como os resultados dos ensaios de delaminação, cita que fraturas nas bases das emendas dentadas e na madeira ocorreram apenas corpos de prova com menores densidades e módulo de elasticidade.

Norma ANSI/APA PRG 320 (2019) determina valor mínimo de MOR é de 10 MPa, assim como de 8.300 MPa para MOE. Nos ensaios em painéis MLCC fabricados com madeira com baixa densidade ($0,35$ a $0,58 \text{ g/m}^3$)

observados na revisão de literatura, os valores de MOR e MOE mantiveram-se entre 24MPa e 44,5 MPa e 5.780 MPa e 14.029 MPa respectivamente. Foi notado, entretanto, que os maiores valores de MOR e MOE ocorriam nos painéis elaborados com peças sem emendas.

Os valores em média observados na revisão de literatura, para resistência ao cisalhamento, foi em torno de 9 MPa. Em relação a delaminação, o resultado observado foi consensual entre os autores, houve variações que foram influenciadas pela densidade e gramatura do adesivo, esta última, no entanto, não apresentou diferenças de resistência ao cisalhamento significativas entre 160 a 250 g/m².

A respeito das emendas dentadas os resultados observados na revisão de literatura, apontam para uma correlação direta entre a densidade e a resistência e rigidez das emendas dentadas. Outra característica significativa é a diminuição da resistência da lamela emendada em comparação a madeira maciça, entre 27% a 55%. Sobre o modo de fratura, vários aspectos, desde a geometria dos dentes, pressão aplicada e adesivo utilizado, resultavam em diferentes modos de fraturas, no entanto, peças com maiores densidades tenderam a romper em maior percentagem de descolamento das emendas. Em painéis MLCC as rupturas ocorrem com maior incidência nas emendas dentadas

No que se refere as emendas dentadas aplicadas nos painéis MLCC, a revisão da literatura assinala para uma fragilidade na estrutura, ocorrendo diminuição da resistência dos painéis, evidenciada nas formas de ruptura que percorrem e ligam as emendas nos ensaios, de acordo com FLAG *et. al* (2014) e VILELA (2020). Outro tópico relevante a ser observado é sobre a delaminação e a qualidade da colagem dos painéis, como pode ser notado nos estudos de referências, ruptura ocorre também por baixa qualidade da adesão das lamelas.

4 MATERIAL E MÉTODO DE PESQUISA

O estudo é dividido em três etapas, primeiro a classificação visual e não destrutiva das tábuas, produção das emendas dentadas e dos painéis MLCC. A segunda e terceira etapas serão realizados ensaios no laboratório da Universidade Estadual de Londrina (UEL), afim de obter os valores de resistência e rigidez dos painéis à flexão em 4 pontos e consecutivamente, ensaios de cisalhamento na linha de cola e delaminação em corpos de prova retirados dos painéis.

O anexo da 7 da NBR 7190 (2022) especifica que devem ser produzidos corpos de prova de painéis MLCC para ensaios a flexão, com três dimensões e quantidades diferentes, sendo 15 corpos de prova com largura até 60 cm, 10 corpos de prova com largura até 80cm e 7 corpos de prova com largura acima de 80cm. Portanto para o estudo foram fabricados 15 painéis de 41x150cm, 10 painéis de 56x150cm e 7 painéis de 84x150cm, todos compostos por 3 lamelas de 2cm, totalizando 6cm de espessura (fig. 24, 25 e 26). Para efeitos comparativos, foram fabricados 5 painéis sem emendas dentadas (2 painéis 41x150cm, 2 painéis 56x150cm e 1 painel 84x150cm).



Figura 24 Corpo de prova 1500x840x60mm Fonte: autor.

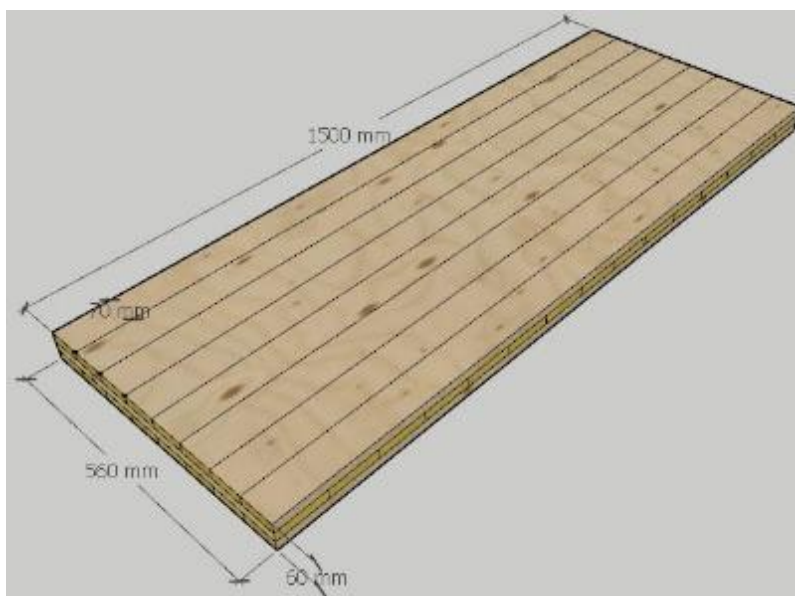


Figura 25 Corpo de prova 1500x560x60mm Fonte: autor.

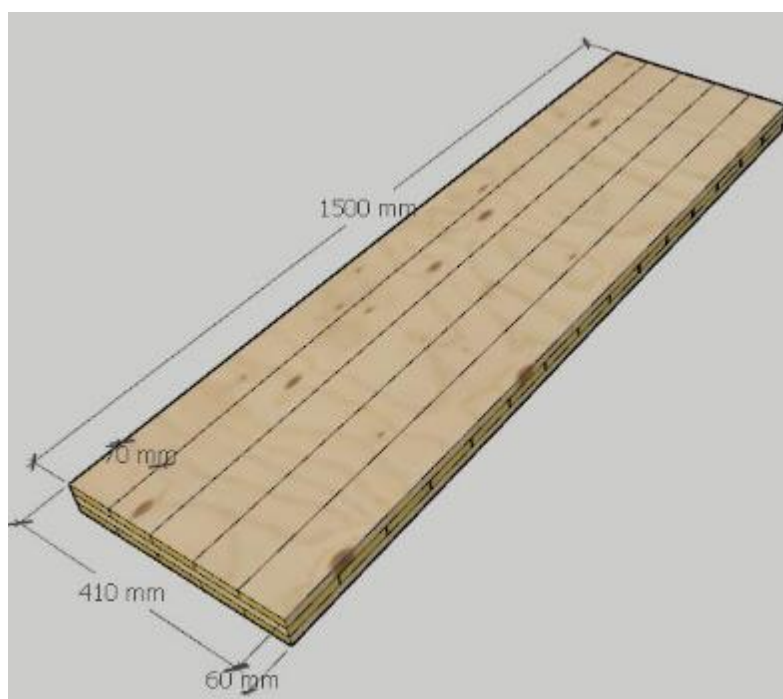


Figura 26 Corpo de prova 1500x560x60mm Fonte: autor.

Foram adquiridas da Serraria “Planeta Industrial da Madeira” situada na região de Telemaco Borba-PR, 577 tabuas de medula de *Eucalypto grandis* seco em estufa (12% de umidade), com dimensões em torno de 26x80x3000mm e com idade aproximada de 18 anos.

4.1 CLASSIFICAÇÃO

Na classificação visual das tábuas de medula de eucalipto, defeitos como torção e encanoamento que prejudicam a colagem foram eliminados, assim como, rachaduras acima de 30 cm (fig. 27) e nós soltos. Todas as tábuas foram classificadas visual e mecanicamente, por meio de pesagem (fig. 28), medição da flecha e determinação da umidade.



Figura 27 Exemplo de defeito retirado (rachadura). Fonte: Autor.



Figura 28 Pesagem das tábuas. Fonte: Autor

A determinação da flecha das tábuas de medula de Eucalipto, foi realizada, segundo as orientações da norma ASTM D 4761 (2002). As peças foram dispostas em dois cavaletes metálicos, distanciados 2,00m. A flecha medida é a correspondente ao eixo de menor inércia (flatwise). Após a peça ser colocada no cavalete, é marcado o centro e a altura da face inferior, obtendo-se a flecha inicial, logo em seguida é aplicada a uma carga no centro da tábua e medida a altura resultante da face inferior determinando a flecha final.

O resultado final obtido pela subtração da flecha inicial da final, deternimou a flecha resultante da peça analisada, sendo o valor utilizado para determinação do Módulo de elasticidade estático, através da Eq. (2).

$$MOE_e = \frac{FxL}{48x \Delta LxI} \quad \text{eq.2}$$

Onde:

MOE_e é o módulo de elasticidade estático (MPa)

F é a carga aplicada (N)

L é o vão entre os apoios (mm)

ΔL é o deslocamento ou flexa final (mm)

I é o momento de inércia da secção transversal (mm⁴)

Observou-se que painéis elaborados com lamelas classificadas com resultados de módulo de elasticidade mais altos alcançaram valores superiores de módulo de ruptura e de rigidez de acordo com ALENCAR e MOURA (2019). Portanto para que os todos os painéis contivessem valores médios de módulo de elasticidade próximos, foram criados 3 grupos de valores de MOE das tábuas após a classificação (fig. 29), sendo que cada painel foi elaborado com a mesma proporção de número de tábuas de cada grupo de MOE.



Figura 29 Grupos classificados de acordo com o MOE das tábuas. Fonte: Autor.

A etapa subsequente a classificação e a separação por grupos de MOE das tábuas foi o corte das peças no comprimento de 50 cm para confecção das emendas dentadas e para retirada dos defeitos das tábuas. Foram excluídos nós soltos, cariados e rachaduras. Peças com torções e abaulamentos após o corte em menores dimensões e realizadas as emendas dentadas obtiveram aproveitamento integral, diminuindo desta forma o volume de descarte. (fig. 30)



Figura 30 Defeitos retirados das tabuas. Fonte: Autor.

Após o corte as peças foram reagrupadas e marcadas em seus respectivos grupos de MOE, como mostra a figura 31.



Figura 31 Peças reagrupadas e marcadas nos grupos de MOE pós corte. Fonte: Autor

4.2 EMENDAS DENTADAS

A geometria das emendas dentadas foi elaborada de acordo com a NBR 7190 (2022), e a usinagem executada primeiramente em uma fresa para emendas (fig 32).



Figura 32 Fresa de emendas dentadas. Fonte: Autor

A densidade média obtida das tábuas foi de $0,574 \text{ kg/m}^3$ e o comprimento dos dentes das emendas 12mm (fig. 33), para os ensaios a pressão exercida para a colagem das emendas foi de 13 MPa por 10s como demonstra a figura 34.



Figura 33 Geometria da emenda dentada. Fonte: Autor



Figura 34 Medidor da pressão da colagem das emendas. Fonte: Autor

Na sequência da execução as emendas as tábuas foram produzidas em um equipamento para emendas dentadas semi-automático, onde somente a aplicação do adesivo foi efetuada manualmente. O adesivo utilizado na colagem das emendas dentadas foi o poliuretano monocomponente PU, Jowapur® 681.30, (fig. 35).



Figura 35 Aplicação do adesivo PU monocomponente na emenda. Fonte: Autor

O equipamento semiautomático de fabricação das emendas dentadas produzia as peças de maneira contínua em uma esteira rolante, de modo que após a aplicação do adesivo as tábuas são emendadas, pressionadas e cortadas nos tamanhos pré determinados para a produção dos painéis, como demonstram as figuras 36 e 37. Como determinação do fabricante do adesivo, o tempo de cura da colagem das emendas é 45 minutos.



Figura 36 Equipamento semiautomático de produção de emendas dentadas. Fonte: Autor



Figura 37 Peças emendadas e cortadas. Fonte: Autor

4.3 PRODUÇÃO DOS PAINÉIS MLCC

No prosseguimento da execução da preparação das tábuas para a montagem dos painéis, após a emenda e corte, as peças passaram por um processo de aplainamento nas faces superiores e laterais. Este processo teve como objetivo uniformizar a dimensão das peças tornando todas com a espessura de 20mm e a largura de 70mm, assim como retirar uma fina camada para abertura dos poros da madeira visando uma melhor absorção do adesivo.

A montagem nos painéis na prensa foi sobre uma lona para que não houvesse contato e risco de colagem com a base de madeirite. As peças foram mescladas proporcionalmente de acordo com os grupos de módulo de elasticidade, para que se pudesse obter painéis estatisticamente homogêneos em termos de propriedades mecânicas, como mostra a figura 38.



Figura 38 Montagem dos painéis MLCC mesclando os grupos de módulo de elasticidade das tábuas. Fonte: Autor

A gramatura do adesivo PU monocomponente (Jowapur® 681.30), para aplicação nas camadas foi de 200 g/m². O controle foi realizado

por pesagem em balança e a aplicação com pincel, como demonstra a figura 39.



Figura 39 Aplicação do adesivo. Fonte: Autor

A prensa utilizada para a fabricação dos painéis tem 2,40 m de largura por 12 m de comprimento, portanto para otimização das prensagens, foram feitas etapas de prensagem. Os painéis com largura de 41cm (fig. 47) e os com 84 cm foram derivados de 7 painéis de 170 de largura por 155 cm de comprimento. Os painéis com 56 cm de largura foram cortados de 5 painéis de 120 cm de largura por 155 cm de comprimento e os sem emendas foram prensados em um outro ciclo e retirados de painéis de 170 cm e 120 cm de largura e ambos com 155 cm de comprimento. Os painéis foram cortados na dimensão dos corpos de prova após 24 horas da finalização do processo de prensagem.

Afim de que não houvesse o “escorregamento” entre as camadas durante o processo de prensagem dos painéis, foi feito um travamento das tábuas aplicando cavilhas de madeira em uma abertura feita com furadeira nas bordas dos painéis, como demonstra a figura 40.



Figura 40 Aplicação de cavilhas para travamento do painel na prensagem. Fonte: Autor

Após a montagem e travamento, foi colocada uma cobertura plástica entre os painéis e o compensado naval, (fig 41) repetindo o mesmo procedimento sob os painéis, evitando desta forma a possibilidade de colagem das chapas com os corpos de prova.



Figura 41 Painéis MLCC montados antes da prensagem. Fonte: Autor

A prensa utilizada na fabricação dos painéis MLCC é composta por 12 cilindros hidráulicos que exercem a pressão homogênea de 0,7MPa por um período de 3 horas, conforme orientação do fabricante do adesivo PU monocomponente Jowapur® 681.30. (fig. 42).



Figura 42 Prensagem dos Painéis MLCC. Fonte: Autor



Figura 43 Painéis após a prensagem. Fonte: Autor

Posteriormente ao processo de prensagem dos painéis (fig. 43) os mesmos foram cortados nas larguras determinadas de cada corpo de prova e transportados para Universidade Estadual de Londrina (UEL) para a realização dos ensaios em laboratório.

4.4 ENSAIOS DOS PAINÉIS MLCC

Os testes de flexão são realizados por “cutelo”, em que a força é aplicada perpendicularmente à face do painel, de acordo com a norma NBR 7190 (2022), pelo método de carregamento em quatro pontos (*third-point loading*), como demonstra a figura 44. Segundo o anexo 7 da NBR 7190 (2022), os ensaios para determinar as características para carregamentos perpendiculares ao plano do painel, seguem praticamente a mesma metodologia adotada pela ASTM D198 (2009), de ensaios de flexão a 4 pontos, acrescentando porém o comprimento do corpo de prova (l) de acordo com a espessura (h), entre 24 a 30 vezes. (Fig. 44).

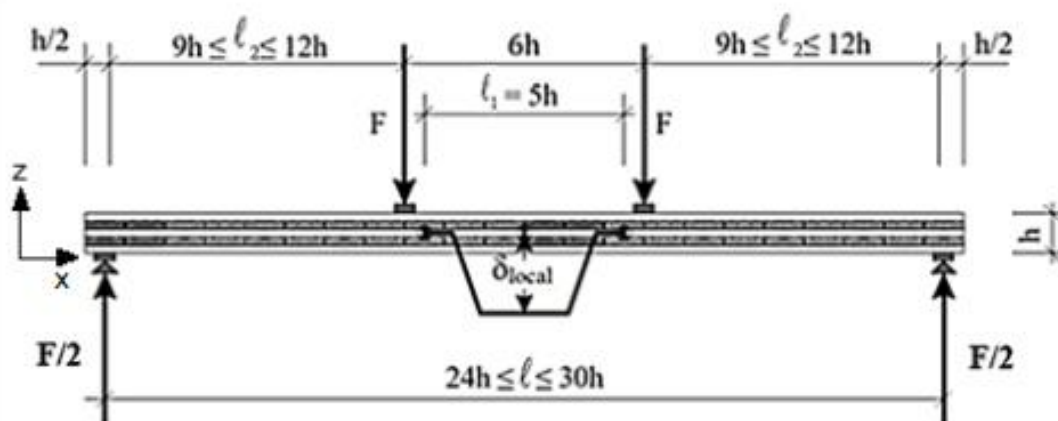


Figura 44 Ensaio de flexão em 4 pontos (*third-point loading*). Fonte: NBR 7190-7 (2022).

Sendo:

H= altura da somatória das lamelas

L= vão do corpo de prova

L1= distância entre os pontos para medição do deslocamento vertical

L2= distância entre os pontos de apoio

δ_{local} = deslocamento medido ao longo do comprimento de uma região livre de tensões de cisalhamento

Os corpos de prova devem ser simetricamente carregados em dois pontos, de acordo com a Figura 48. Utilizar a seção do diagrama de força x deslocamento entre $0,1 \cdot F_{\text{máx.,est}}$ e $0,4 \cdot F_{\text{máx.,est}}$ para análise de regressão (fig. 45).

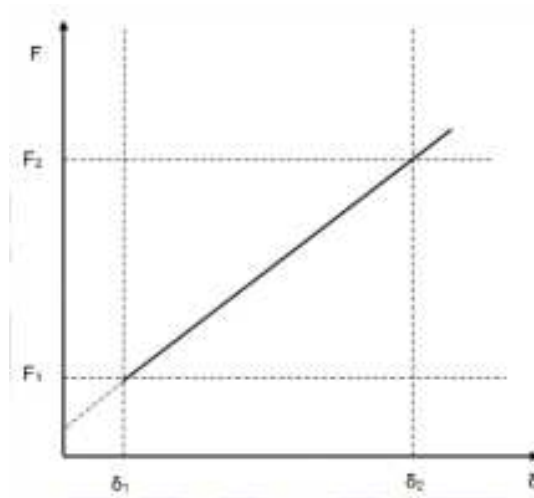


Figura 45 Gráfico Força x deslocamento. Fonte: NBR 7190 (2022).

δ_1 é a distância entre os pontos de fixação dos medidores;

δ_2 é a distância horizontal entre os pontos de apoio e de carregamento mais próximos.

Os painéis foram testados à resistência e rigidez a flexão em 4 apoios em um pórtico rolante com célula de carga de 50 toneladas. A distância dos apoios dos painés foi de 141cm e distribuição da carga foi em 47cm como mostra o esquema gráfico (fig 46).

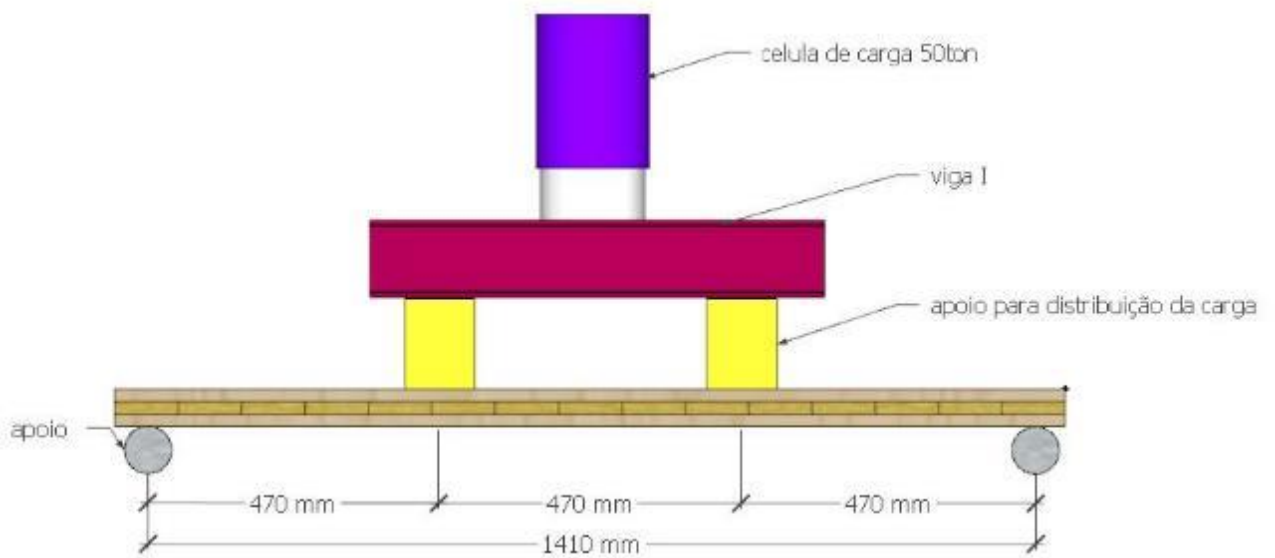


Figura 46 Esquema do ensaio à flexão em 4 apoios. Fonte: Autor

De acordo com a NBR 7190 (2022) o cálculo da inércia dos painéis MLCC deve ser corrigido e adotada a espessura útil, pois as camadas transversais aos apoios não atuam como componentes ativos nas forças de resistência e rigidez dos painéis.

$$M_{\text{inérciaútil}} = N \times \left(\frac{h^3 \times L}{12} + A_{\text{Lamela}} \right) \times D1 \quad \text{eq.3}$$

Onde:

$M_{\text{inérciaútil}}$ é o momento de inércia da lamela útil.

N é o número de lamelas.

h é a altura da lamela.

b é a base do painel

A_{lamela} é a área da lamela

D1 é distância do centro de gravidade da lamela até o centro de gravidade da secção.

O valor de módulo de elasticidade foi obtido por meio da equação.

$$MOE = \left[\frac{F \times L^3}{S \times I_{\text{útil}}} \right] \times \left[\left(\frac{1}{243} \right) + \left(\frac{1}{100} \right) + \left(\frac{1}{486} \right) \right] \quad \text{eq.4}$$

Onde:

MOE é o módulo de elasticidade

F é a carga aplicada

S é o deslocamento vertical

L é a distância entre os pontos de aplicação de carga

$I_{\text{útil}}$ é o momento de inércia útil.

Para o cálculo de módulo de elasticidade foi utilizado a regressão linear no gráfico carga x deslocamento entre os valores de 10% a 40% da carga máxima conforme descrito na NBR7190 (2022).

O módulo de ruptura foi calculado por meio da equação 5.

$$MOR = \frac{(F \times L) \times LN}{I_{\text{útil}}} \quad \text{eq. 5}$$

Onde:

MOR é o módulo de ruptura (MPa)

F é a carga máxima (N)

L é a distância entre os pontos de aplicação de carga (mm)

LN é a distância da base à linha neutra da seção transversal do painel (mm)

$I_{\text{útil}}$ é o momento de inércia útil da seção transversal (mm⁴)

4.5 ENSAIO DE CISALHAMENTO EM CORPOS DE PROVA

Após a realização dos ensaios para determinação da resistência e rigidez dos corpos de prova, foram realizados os ensaios de cisalhamento e delaminação, conforme descrição do anexo 7 da NBR 7190 (2022), com amostras extraídas dos painéis já testados (fig. 47).



Figura 47 Ensaio Cisalhamento. Fonte: Autor

Para os ensaios de cisalhamento na linha de cola foram elaborados 64 corpos de prova com dimensões de 5x5cm e testados na máquina universal de ensaios EMIC com célula de carga de 3 toneladas. Todos os corpos de prova foram identificados quanto a origem do painel retirado para posterior comparação.

O cálculo para resistência ao cisalhamento é por meio da equação:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{eq. 6}$$

Onde:

σ : resistência ao cisalhamento

F: é a carga em MPa

A: é a área em cm²

Outra análise fundamental para avaliação da colagem é o modo de fratura dos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento, que consiste na avaliação quantitativa do “arrancamento” de madeira. São tres níveis de fratura: profunda, rasa e a falha na linha de cola. Considerou-se fratura profunda o arrancamento de partes de madeira, assim como a falha rasa com presença visível de fibras na superfície da ruptura e falha na linha de cola quando não há

fibras de madeira visível ocorrendo o descolamento.

A análise da fratura é realizada conforme LOBÃO (2006) utilizando-se uma película transparente quadriculada para contagem da porcentagem do arrancamento de madeira nos corpos de prova, como mostra a figura 48.



Figura 48 Análise da porcentagem de fratura no corpo de prova.
Fonte: Autor

4.6 ENSAIO DE DELAMINAÇÃO

Os ensaios de delaminação segundo o anexo 7 da NBR 7190 (2022) consistem em um gradiente no teor de umidade, introduzido na madeira para acumular tensões internas, resultando em tensões de tração perpendiculares às linhas de cola, onde a qualidade inadequada da colagem resulta em delaminação da linha de cola.

De acordo com o procedimento para os ensaios de delaminação, indicado pela NBR 7190-7 (2022), as amostras devem ser extraídas dos painéis de MLCC em formato cilíndrico com diâmetro de (95 ± 5) mm ou em formato aproximadamente quadrado com dimensões laterais de (100 ± 5) mm e área da superfície superior a 10.000 mm^2 .

A medição da delaminação e a avaliação do resultado devem ser realizadas em até 1 h depois de finalizado o procedimento de secagem das

amostras. A delaminação total da linha de cola deve ser medida em milímetros, com o uso de paquímetro ou outro instrumento com mesma precisão.

Para os ensaios de delaminação foram produzidos 74 corpos de prova com dimensões de 10x10cm, todos identificados de acordo com o painel extraído, conforme demonstra a figura 49.



Figura 49 corpos de prova para ensaios de delaminação. Fonte: Autor

Após a pesagem dos corpos de provas as linhas de cola foram medidas e conferidas para identificação de descolamento precedente ao ensaio. Após esse procedimento, a metodologia do ensaio teve a sequência abaixo repetida tres vezes, conforme orientação da NBR 7190 (2022).

Primeiramente os corpos de prova foram submersos em água dentro da autoclave na temperatura entre 10 a 20° C e aplicado vácuo entre 70kPa a 85kPa por 30min. (fig. 50).



Figura 50 Corpos de prova dentro da autoclave para os ensaios de delaminação.
Fonte: Autor

Posteriormente o vácuo foi liberado e aplicou-se pressão entre 500kpa a 600kpa por 2h. Concluída esta etapa os corpos de prova foram secos em estufa por 12h na temperatura de 105° distanciados 5cm uns dos outros, conforme figura 51.



Figura 51 Secagem em estufa dos corpos de prova dos ensaios de delaminação.
Fonte: Autor

Antes de iniciar um novo ciclo os corpos de prova foram pesados. Após completar os 3 ciclos a espessura e comprimento da linha de cola no perímetro das camadas foi medida em 1h após a finalização da secagem do

último ciclo.

A delaminação total do corpo de prova é calculada conforme a seguinte equação 6:

$$Delam_{total} = 100 \frac{\ell_{tot,delam}}{\ell_{tot,linhacola}} \text{ em\%}$$

eq. 6

$\ell_{tot,delam}$ é o comprimento total das delaminações, expresso em milímetros (mm);

$\ell_{tot,linhacola}$ é a soma dos perímetros de todas as linhas de cola do corpo de prova, expressa em milímetros (mm).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos destes ensaios foram comparados com os da revisão de literatura e com os valores mínimos indicados em normas, para a avaliação da aptidão e viabilidade da medula do eucalipto, com emendas dentadas no sistema construtivo MLCC.

5.1 CLASSIFICAÇÃO VISUAL E NÃO DESTRUTIVAS DAS LAMELAS

Após a classificação visual das tábuas de medula de eucalipto houve uma produção de resíduos proveniente da retirada dos defeitos, estimada em 22% do total das peças. (fig. 52)



Figura 52 Resíduos proveniente da retirada dos defeitos das tábuas. Fonte: Autor

No estudo de ALENCAR (2015) o aproveitamento da medula do eucalipto posterior a classificação visual foi de 55% ou seja, houve a geração de praticamente metade das peças em resíduos devidos aos defeitos como rachaduras, torções, abaulamento e arqueamento. Este rendimento 30% maior observado na presente pesquisa resulta no fato das peças terem sido cortadas para fabricação das emendas dentadas em partes menores.

Os resultados obtidos após a classificação não destrutiva das tábuas para obtenção dos valores de módulo de elasticidade estático e densidade, (quadro 11) evidenciou-se uma variação proeminente entre os valores mínimos e máximos, no entanto como o número de amostras, 577 tábuas era considerável, essa variação era esperada.

	Densidade aparente $\rho_{\text{apa } 12\%}$ (g/cm³)	ΔF (cm)	MOE_{estático} (MPa)
máximo	0,904	1,9	22.937,39
mínimo	0,387	0,2	4.005,16
Média	0,574	0,8	9.902,04
Desvio padrão	0,08	26,40	2.702,68
CV (%)	14,03	89	27,29

Quadro 11 Resultados da Classificação das tabuas. Fonte: Autor

Posteriormente a classificação das tábuas, as mesmas foram divididas em grupos de MOE, como mostra o quadro 12.

Propriedades	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Valores mínimos e máximos de MOE (MPa)	10.835 - 38.049	8.470 - 10.835	4.005 - 8.455
Média de MOE (MPa)	13.045	9.444	7.305
Valores mínimos e máximos de densidade (g/cm ³)	0,444 - 0,907	0,421 - 0,798	0,385 - 0,867
Média de densidade (g/cm ³)	0,620	0,561	0,539

Quadro 12 Resultado da classificação e agrupamento das peças de acordo com o módulo de elasticidade. Fonte: Autor

De acordo com a classificação das espécie de *Eucalipto grandis* da NBR 7190 (2022) em relação a densidade média estariam enquadrados na classe D40, onde a média é 0,56 g/cm³, no entanto quanto ao Módulo de elasticidade, somente o grupo 1 estaria enquadrado na classe D18, que determina média de 9.500 MPa, os demais grupos 2 e 3 estão abaixo desta classificação, como demonstra no quadro 13.

PROPRIEDADE	D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Densidade média (g/cm ³)	0,475	0,485	0,530	0,540	0,560	0,620	0,700	0,900
Módulo de elasticidade médio E _{med} (GPa)	9.500	10.000	11.000	12.000	13.000	14.000	17.000	20.000

Quadro 13 Propriedade das classes para folhosas. Fonte: Adaptado NBR 7190 (2022)

Pode-se observar na figura 53, que não houve uma correlação alta (0,19) entre os valores de módulo de elasticidade com a densidade das peças.

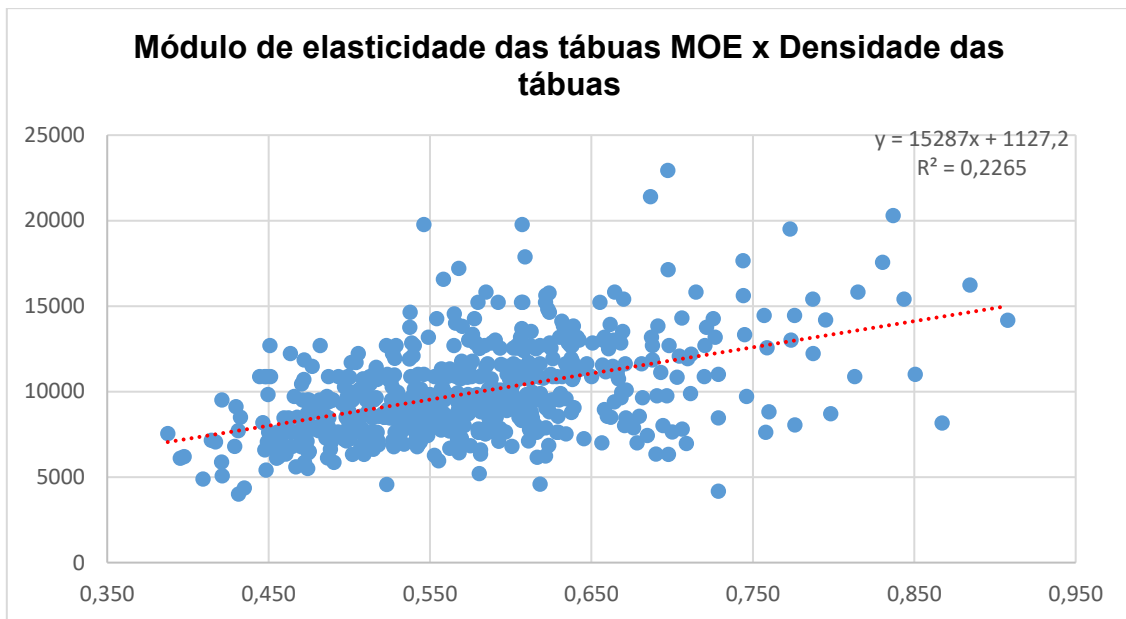


Figura 53 Gráfico do coeficiente de relação entre os resultados de módulo de elasticidade e densidade das tábuas. Fonte: Autor

5.2 Resultados dos Ensaios dos Painéis MLCC

Os painéis foram testados a flexão em quatro apoios conforme a NBR 7190 (2022) e os valores de módulo de elasticidade obtidos por meio de regressão linear no gráfico gerado com os resultados dos ensaios, como demonstra a figura 54. Os gráficos dos demais ensaios estão no anexo 1.

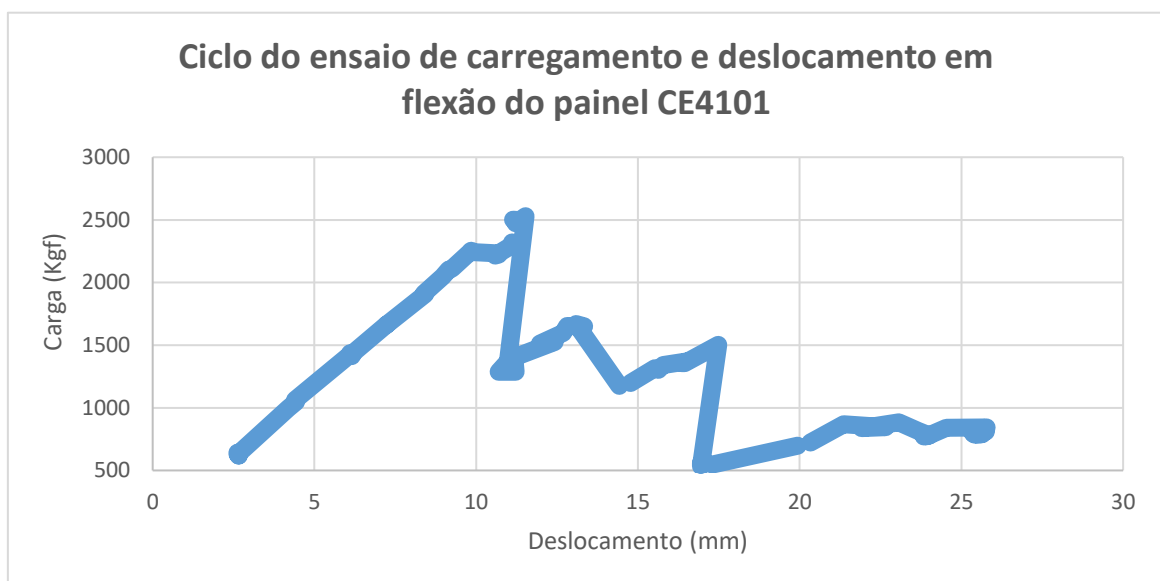


Figura 54 Ciclo de ensaio de carregamento em flexão do painel CE4101. Fonte: Autor

A madeira serrada sob flexão tem comportamento elasto-frágil, ou seja, rompe abruptamente, em contrapartida no sistema MLCC a ruptura ocorre de forma elasto-plástica, que é favorável à segurança da estrutura, evidenciado na figura 54.

Os resultados obtidos nos ensaios de Resistência e Rigidez dos painéis MLCC com emendas (CE) e larguras de 41, 56 e 84cm, assim como os painéis sem emendas (SE), estão demonstrados no quadro 14.

Painel MLCC com emendas	Módulo de Elasticidade MPa	Módulo de Ruptura MPa	Modo de Ruptura
CE4101	12.238	28,04	ruptura na base da emenda e descolamento na emenda
CE4102	10.590	18,04	descolamento da camada
CE4103	4.801	12,75	descolamento da camada
CE4104	13.724	26,89	ruptura base da emenda
CE4105	12.939	20,21	descolamento da emenda/ ruptura na madeira
CE4106	10.792	19,71	descolamento da emenda/ ruptura na madeira/ ruptura na base da emenda
CE4107	13.696	16,58	descolamento da camada
CE4108	13.835	25,71	ruptura na base da emenda
CE4109	8.710	10,63	descolamento da camada superior
CE4110	11.986	29,1	descolamento da camada/ ruptura no nó
CE4111	15.485	22,74	descolamento na emenda
CE4112	11.224	23,76	ruptura na base da emenda / descolamento da emenda
CE4113	13.645	18,12	descolamento da camada
CE4114	14.279	21,89	descolamento da emenda
CE4115	14.295	25,85	descolamento da camada
Média	12.149,27	21,33	33% ruptura na base da emenda 46% descolamento da emenda 46% descolamento da camada 13% ruptura na madeira 6,6% ruptura no nó
DP	2.605,527	5,29	
C.V.%	24,8	21,44	
CE5601	14.280	32,60	ruptura na base da emenda / ruptura na madeira
CE5602	17.977	32,67	descolamento de 2 tabuas da camada
CE5603	16.089	48,64	ruptura na base da emenda / ruptura da madeira
CE5604	12.016	36,46	ruptura na base da emenda/ descolamento da emenda / ruptura na madeira

CE5605	14.874	26,01	ruptura na base da emenda / descolamento da emenda/ ruptura na madeira
CE5606	14.180	36,79	descolamento de uma tabua no centro do painel
CE5607	14.775	29,75	ruptura na base da emenda/ ruptura na madeira
CE5608	15.940	30,50	descolamento da emenda/ ruptura na base da emenda/ ruptura na madeira
CE5609	15.550	36,45	ruptura na base da emenda/ruptura na madeira
CE5610	13.852	26,52	ruptura na base da emenda/ ruptura na madeira/ ruptura no nó
Média	14.953,30	33,64	80% ruptura na base da emenda 40% descolamento da emenda 20% descolamento da camada 80% ruptura na madeira 10% ruptura no nó
DP	1.506,393	6,21	
C.V.%	10,07	18,46	
CE8401	13.549	20,03	descolamento da camada
CE8402	12.039	17,33	descolamento da camada
CE8403	10.172	15,52	ruptura na base da emenda
CE8404	12.389	13,04	descolamento da camada
CE8405	12.444	32,97	ruptura na base da emenda/ descolamento da emenda
CE8406	12.213	28,56	ruptura na base da emenda / descolamento da emenda/ ruptura na madeira nó
CE8407	13.555	27,62	ruptura na base da emenda / ruptura na madeira
Média	12.337,29	22,15	57,14% ruptura na base da emenda 28,57% descolamento da emenda 42,85% descolamento da camada 28,57% ruptura na madeira 14,28% ruptura no nó
DP	1.052,753	6,99	
C.V.%	8,53	31,55	
Painel MLCC sem emendas	Módulo de Elasticidade MPa	Módulo de Ruptura MPa	Modo de Ruptura
SE84	14.108	39,11	descolamento da camada
SE4101	17.630	43,34	ruptura na madeira
SE4102	20.803	47,41	ruptura na madeira e nó
SE5601	14.485	44,67	ruptura madeira e nó
SE5602	14.662	43,55	ruptura na madeira e nó
Média	16.337,60	43,61	20% descolamento da camada 60% ruptura no nó 80% ruptura na madeira
DP	2.864,48	3,00	
C.V.%	17,53	6,87	

Quadro 14 Resultados dos ensaios de Flexão a quatro apoios e modo de ruptura dos painéis MLCC. Fonte: Autor

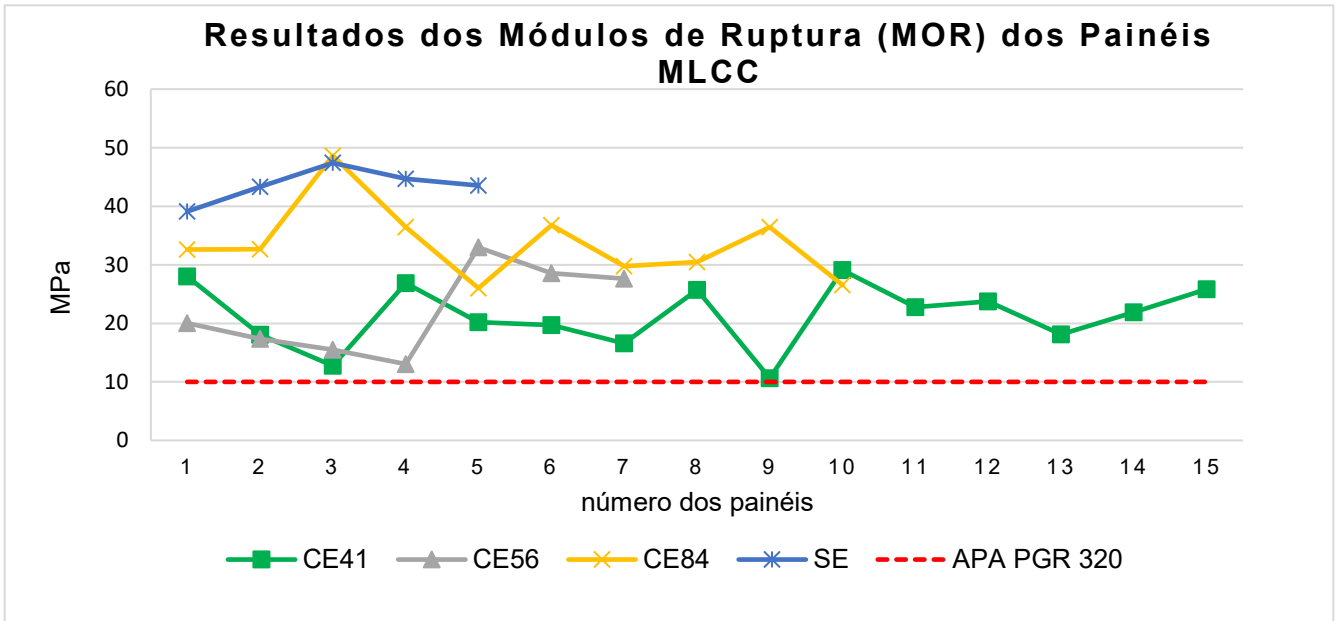


Figura 56 Gráfico dos resultados de módulo de ruptura dos painéis nos ensaios de flexão a quatro apoios comparados com a norma ANSI/APA 320 (2019). Fonte: Autor.

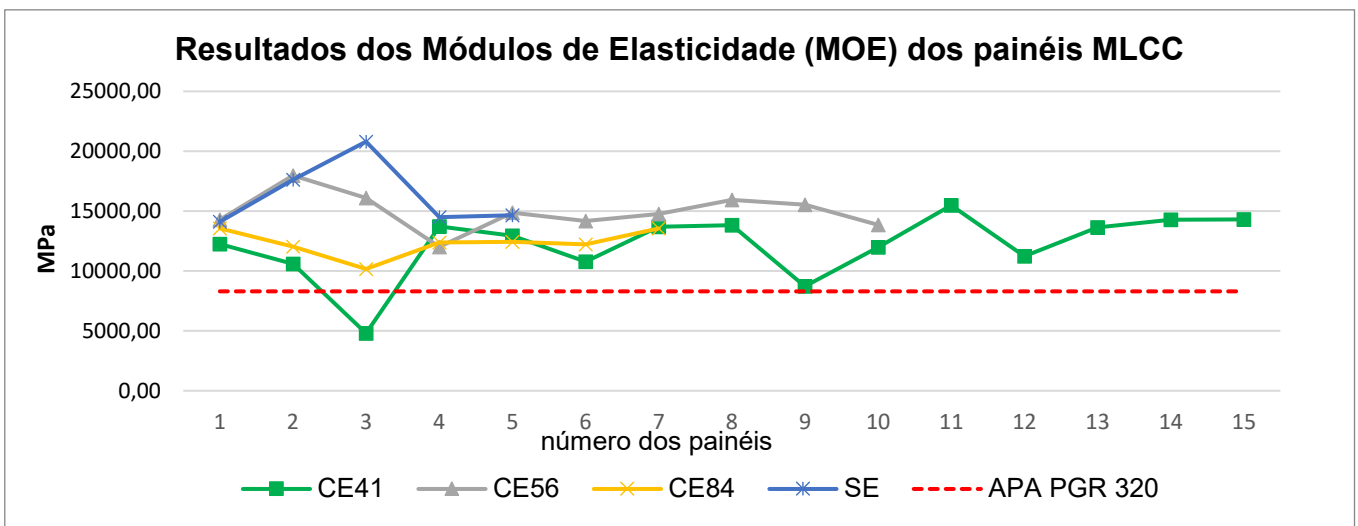


Figura 55. Gráfico dos resultados de módulo de elasticidade dos painéis nos ensaios de flexão a quatro apoios comparados com a norma ANSI/APA 320 (2019). Fonte: Autor.

Os resultados observados nos ensaios realizados nos painéis MLCC com emendas indicam uma média geral de MOE de 13.146,69 MPa e MOR de 25,70 MPa. Os valores relatados pelos autores LIAO *et. al* (2017), WANG *et. al* (2014), GUTIERREZ *et. al* (2023), SIKORA *et. al* (2016), PANG *et. al* (2020), AZAMBUJA *et. al* (2023), VILELA (2020), KOMATSU *et. al* (2021), para os módulos de elasticidade variaram entre 5.780 MPa e 14.029 MPa e os valores de módulo de ruptura relatados foram entre 11,8 MPa e 44,5 MPa, como

pode ser observado nas figuras 57 e 58.

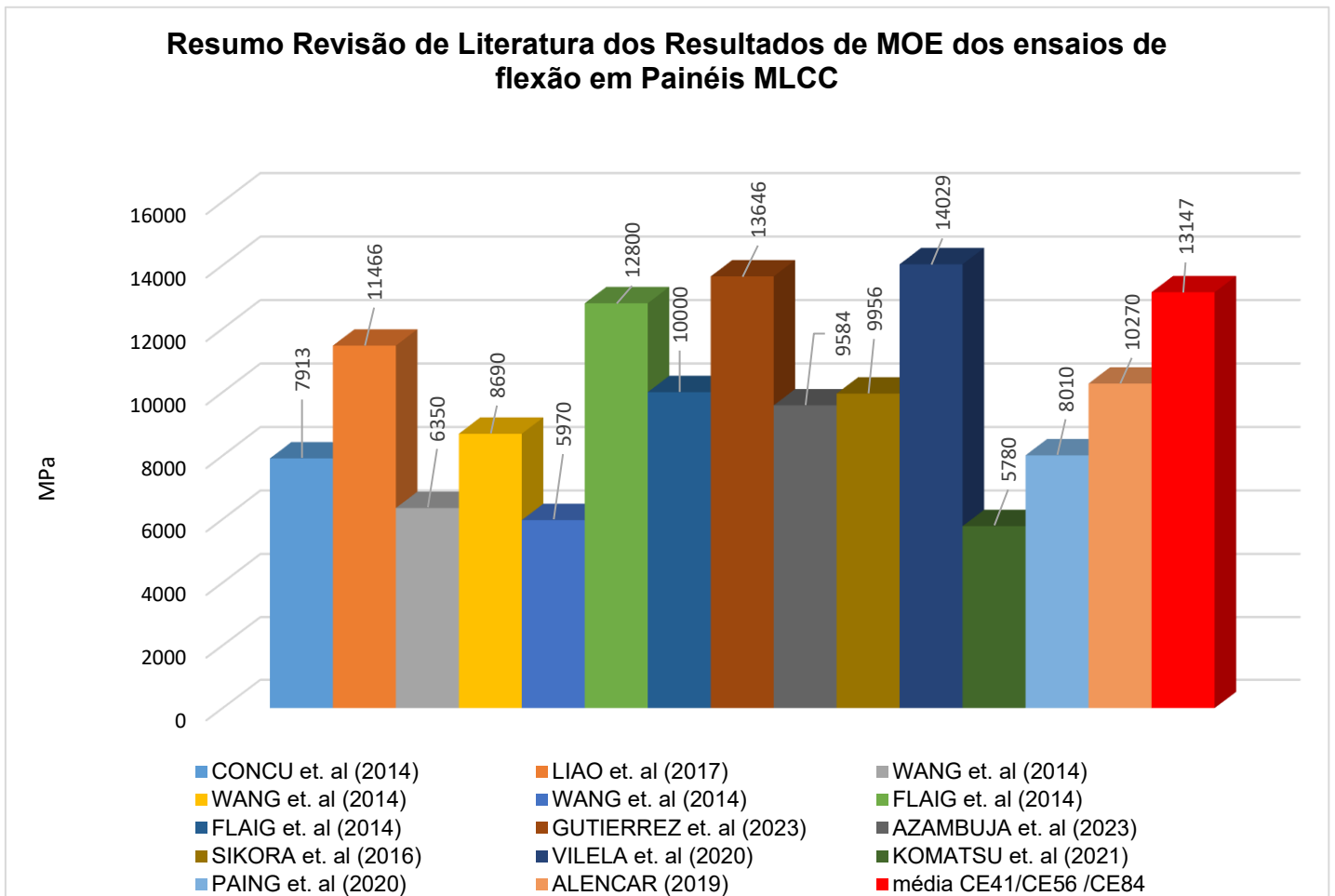


Figura 57 Resumo Revisão de Literatura dos Resultados de MOE dos ensaios de flexão em Painéis MLCC.
Fonte: Autor

Resumo Revisão de Literatura dos Resultados de MOR dos ensaios de flexão em Painéis MLCC

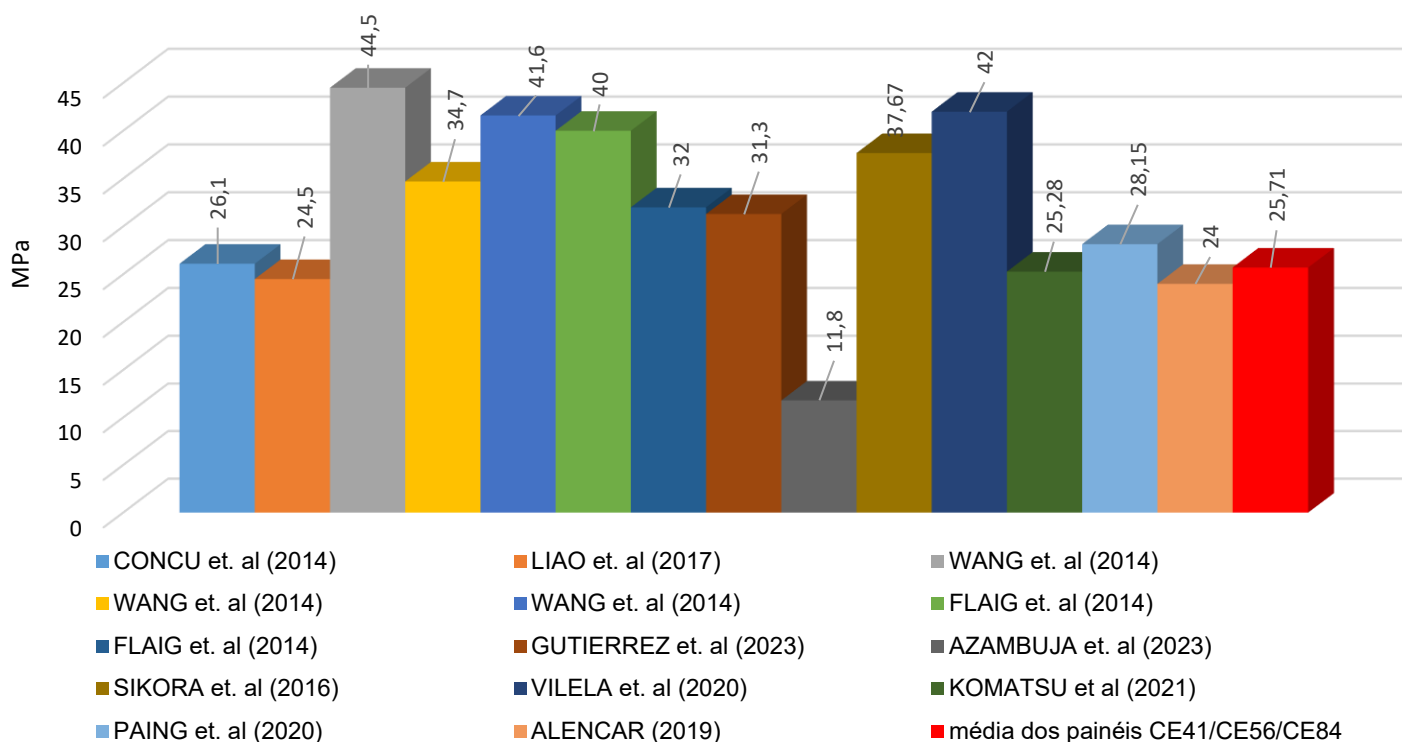


Figura 58 Resumo Revisão de Literatura dos Resultados de MOR dos ensaios de flexão em Painéis MLCC. Fonte: Autor

Houve uma variabilidade significativa entre as amostras com emendas, conforme demonstra o desvio padrão elevado (2.437,77 MPa para MOE e 25,35 MPa para MOR) e o coeficiente de variação (18,66% para MOE e 32,83% para MOR).

Comparando com a norma, ANSI/APA PRG 320 (2019), que estabelecem um mínimo de 10 MPa para MOR e 8.300 MPa para MOE, o resultado de MOE obtido no painel com emenda CE 4103 (4.801 MPa) foi o único que não alcançou o valor de referencia mínimo da norma. O painel com emenda CE 4109 também apresentou resultados abaixo da média dos painéis testados tanto para MOE (8.710 MPa) quanto para MOR (10,63 MPa), no entanto, ainda foram superiores ao preconizado pela norma.

O resultado das médias dos valores de MOE e MOR por grupos de painéis mostrou que os fabricados sem emenda obtiveram médias superiores

em relação aos com emenda de 19,53% no MOE e 41,05% no MOR. (Fig. 59)

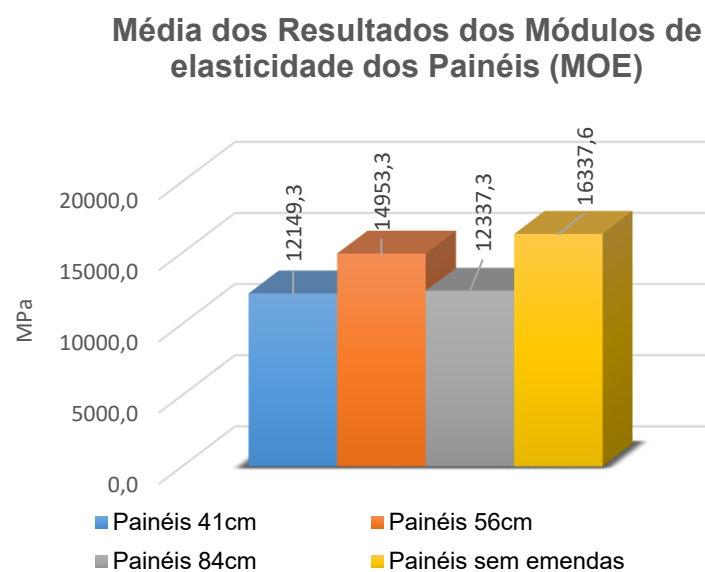
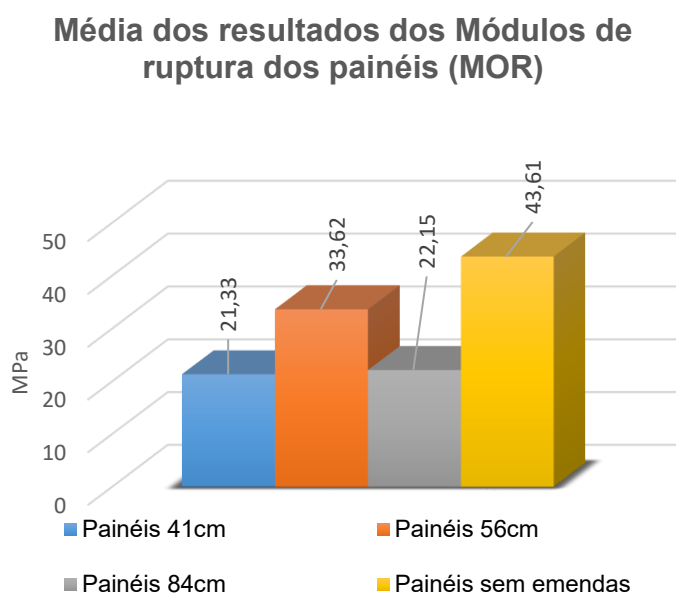


Figura 59 Resultados das médias de módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR).
Fonte: Autor

Nos resultados dos ensaios, nota-se que as emendas dentadas possivelmente reduziram a resistência dos painéis. Comparando-se estes resultados com a análise da literatura, FLAG *et. al* (2014), WANG *et. al* (2014), GUTIERREZ *et. al* (2023), VILELA (2020), PEREIRA *et. al* (2016), SHUKLA *et. al* (2020) e KOMATSU *et. al* (2021) corroboram com esse contexto demonstrando em seus estudo uma redução da resistência nos painéis com emendas, assim como uma maior incidência das rupturas nessas emendas. No entanto, em estudo anterior de ALENCAR e MOURA (2019), os painéis MLCC fabricados com medula de eucalipto sem emendas apresentaram resultados aproximados com a presente pesquisa, com MOR em torno de 24 MPa e MOE de 10.270 MPa

Entre os grupos dos painéis MLCC com emenda, o que obteve melhores resultados nos ensaios de flexão, foi o grupo com largura de 56 cm, os demais com 41 e 84cm, demonstraram resultados tanto de MOE como de MOR semelhantes, (figura 62). Ocorreu maior coeficiente de variação dos resultados de MOE e MOR no grupo CE41cm (24,8% e 21,44%) assim como maior incidência de descolamento das camadas e das emendas. No grupo CE84cm,

verificou-se um dos menores coeficientes de variação no MOE (8,53%) e o maior no MOR (31,55%) influenciado pelo resultado do painel CE8404 que apresentou ruptura por descolamento da camada.

Sobre o módulo de elasticidade obtido nos painéis MLCC os valores médios foram mais elevados 26,33% que a média do MOE das lamelas, no entanto em relação o valor máximo os observados nas lamelas foram mais elevados 45% em comparação ao valor máximo das lamelas. Notou-se também menor coeficiente de variação entre os valores dos MOE dos painéis. Este comparativo dos MOE (quadro 15) demonstra que a produção dos painéis mesclando os grupos de MOE das lamelas em interação com a colagem cruzada e o adesivo aumentou o módulo de elasticidade geral e diminuiu a diferença entre os valores máximos e mínimos observados na classificação das peças.

	MOE Lamelas (MPa)	MOE Painéis (MPa) Com e sem emendas
Mínimo - Máximo	4.005,16 – 22.937,39	4.801-20.803
Média	9.902,04	13.508,67
Desvio padrão	2.702,75	2.704,47
COV (%)	27,29	20,02

Quadro 15 Resultado dos valores dos módulos de elasticidade das tabuas e dos painéis MLCC. Fonte: Autor

A análise do modo de ruptura do modo de ruptura dos painéis foi fundamental para o entendimento dos resultados dos ensaios de flexão. Conforme demonstra o quadro 14, os grupos que apresentaram menores incidência de ruptura relacionada a colagem (descolamento de camada e descolamento de emendas) foram os que obtiveram melhores valores tanto de MOE quanto de MOR. O grupo de painéis CE56 cm foi o que apresentou melhor resultado entre os grupos com emendas (fig. 60) com maiores índices de ruptura na base das emendas dentadas e ruptura na madeira, assim como menor

ocorrência de descolamentos. Desta forma, pode-se afirmar que a colagem com maior qualidade aumentou a capacidade de carga dos painéis em torno de 33% entre as médias do grupo CE56 (33,62 MPa) e os demais grupos CE41 (21,33 MPa) e CE84 (22,15 MPa)

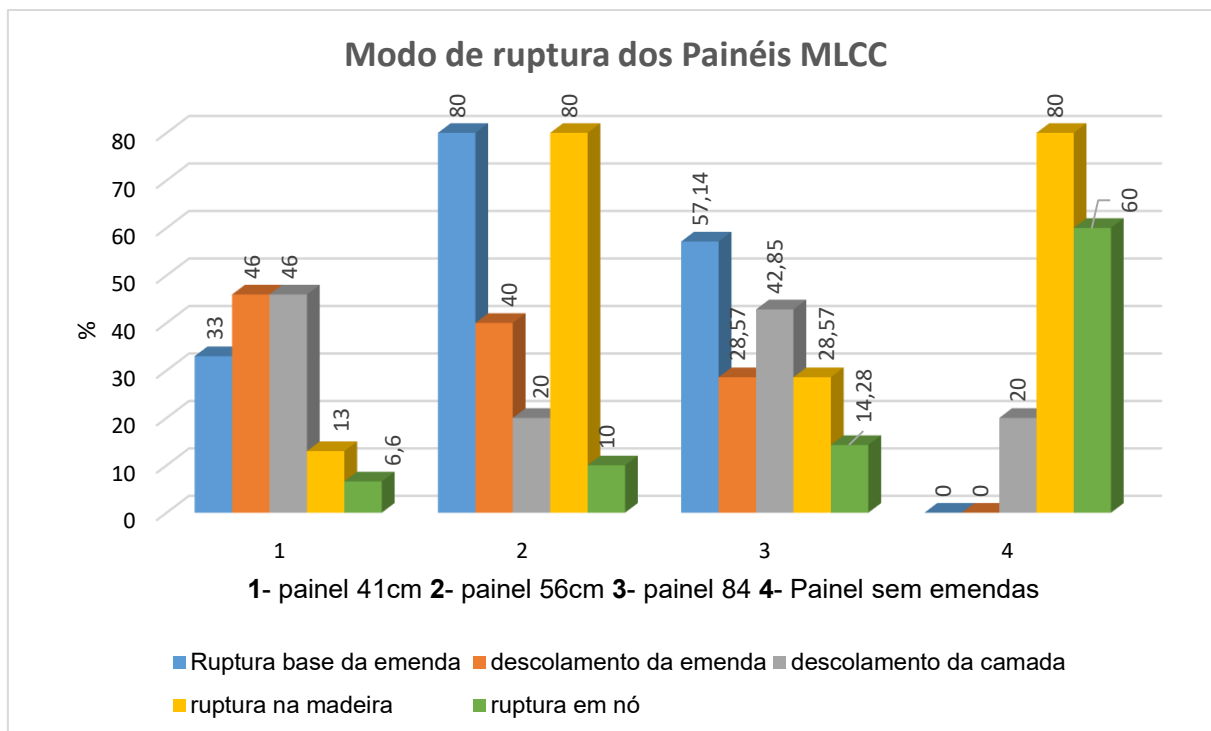


Figura 60. Gráfico do Modo de Ruptura dos Painéis MLCC. Fonte Autor.

Outro aspecto sobre o modo de ruptura dos painéis foi em relação a incidência de nós. Percebe-se na figura 61, que os painéis sem emendas apresentaram maiores indicadores de ruptura nos nós. Entre os grupos dos painéis MLCC com emendas a maior porcentagem de ruptura nos nós ocorreu no grupo dos painéis com 84 cm de largura (14,28%). Pode-se notar que houve um alinhamento na ruptura da base das emendas, assim como ocorreu nos ensaios de VILELA (2020). O grupo de painéis CE56 cm foi o que apresentou maior incidência de ruptura na madeira (80%) entre os grupos sem emenda, mesmo valor obtido no grupo sem emenda, demonstrando melhor qualidade de colagem dos painéis.



Figura 61 Modo de ruptura dos painéis nos ensaios de flexão. Fonte: Autor

De acordo com a literatura pesquisada, BOCANEGRA *et. al* (2017) percebe que a ocorrência de fratura na base da emenda e na madeira foi somente nas amostras com baixas e médias densidades entre 0,57 g/m³ e 0,77 g/m³, nas mais elevadas houve ruptura apenas por falha na linha de cola. No estudo de CHERRY *et. al* (2023) nas amostras que continham medula, a ruptura ocorria geralmente na madeira e não observou-se falha na linha de cola. Resultado semelhante também pode ser observado no estudo de FLAIG *et. al* (2014) onde 21% das falhas na linha de cola das emendas ocorreram nas peças com maiores densidade e somente 7% nas menos densas.

Como pode ser observado, a influência da densidade é relevante no modo de ruptura e na resistência e rigidez dos painéis, no entanto é preciso considerar que o coeficiente de variação da densidade das tábuas é de 14,03% com valores entre 0,387 e 0,907 g/cm³. Mesmo com a média geral da densidade em 0,570 g/cm³, como na montagem dos painéis houve a combinação entre os grupos de módulo de elasticidade das tábuas, para equivalência geral entre os painéis, um único painel pode conter diferentes densidades.

5.2.1 Resultado dos ensaios de flexão dos painéis com emenda e 41 cm de largura

Na análise dos resultados do grupo dos painéis com emenda e 41 cm de largura, observa-se que os valores de MOR mantiveram-se abaixo de 30 MPa com média acima de 15 MPa, como demonstra a figura 62. Este grupo foi o que apresentou maior índice de descolamento de camada (fig. 63) e os menores valores de MOR e MOE entre todos os grupos.

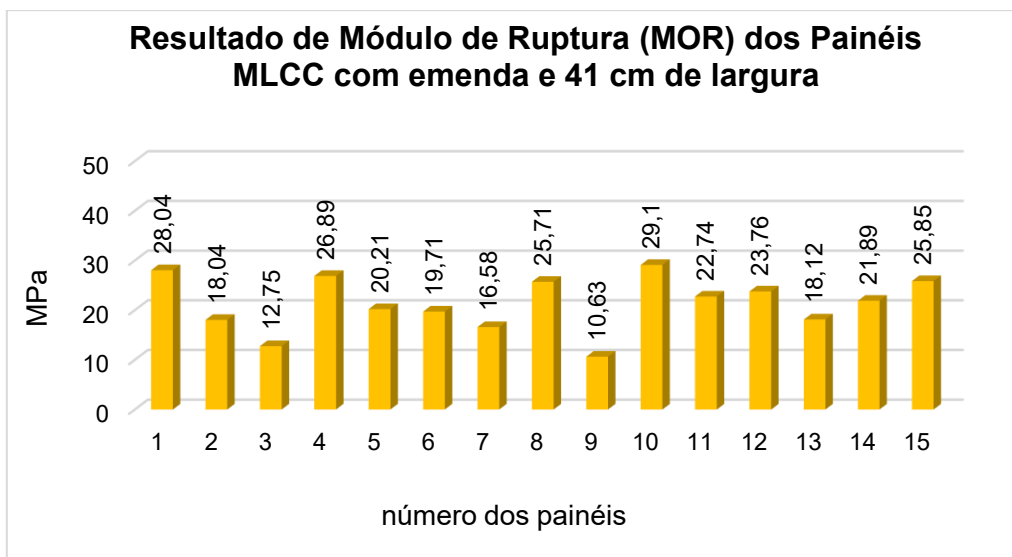


Figura 62 Resultados de MOR dos painéis MLCC com emendas e 41cm de largura.
Fonte: Autor



Figura 63. Modo de ruptura dos painéis CE4106, CE4104 e CE4109. Fonte: Autor

A correlação entre os valores dos resultados de MOR e MOE foi de 0,59, um dos mais altos dos grupos dos painéis, demonstrando que em altos valores de MOR encontramos altos valores de MOE e vice versa.

Os resultados de MOE observados no grupo dos painéis MLCC com emendas e 41 cm de largura foram em média inferiores aos demais grupos,

no entanto este índice foi influenciado principalmente pelo baixo desempenho do painel CE4103 (fig 64), que rompeu por descolamento de camada e não atingiu o valor mínimo (8.300 MPa) exigido pela norma ANSI/APA 320 (2019) como mostra a figura 65.

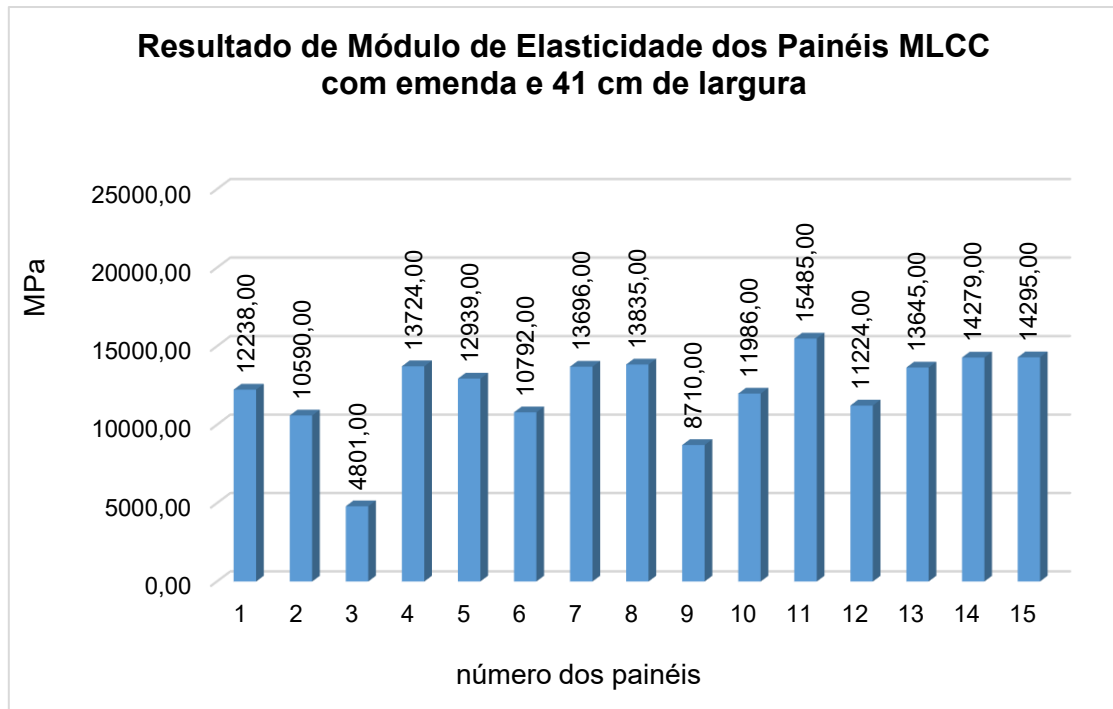


Figura 64 Resultados de MOE dos painéis MLCC com emenda e 41cm de largura. Fonte: Autor



Figura 65 Painel CE4103. Fonte: Autor

5.2.2 Resultado dos ensaios de flexão dos painéis com emenda e 56 cm de largura

O resultado dos ensaios de flexão do grupo dos painéis com emenda e 56 cm de largura apresentaram as maiores médias de valores de MOR (fig. 66) e MOE (fig. 67) entre os grupos dos painéis com emenda e o menor índice de descolamento por camada na avaliação do modo de ruptura. Nota-se que a colagem foi mais eficiente neste grupo e portanto, refletiu nos resultados de MOR e MOE.

Os painéis CE5602 e o CE5606 que apresentaram ruptura por descolamento de tábua na camada inferior submetida ao maior esforço de tração, obtiveram valores superiores a média geral dos painéis de 25,7 MPa. Os demais painéis não apresentaram descolamento tanto de camada como de emendas.

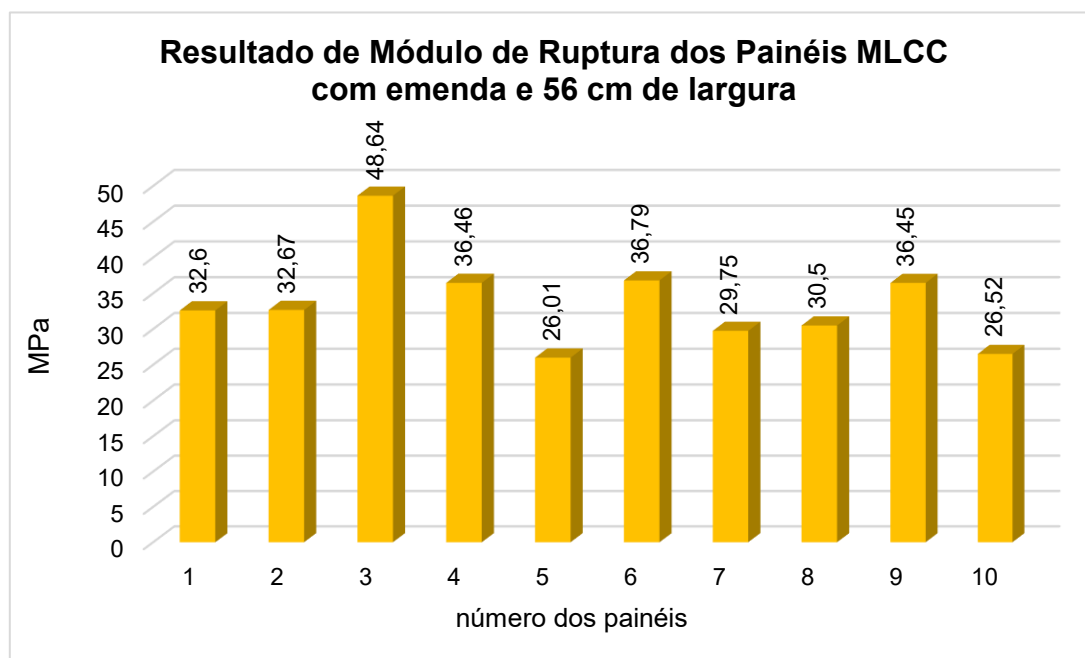


Figura 66 Resultados de MOR dos painéis com emenda e largura de 56cm. Fonte: Autor

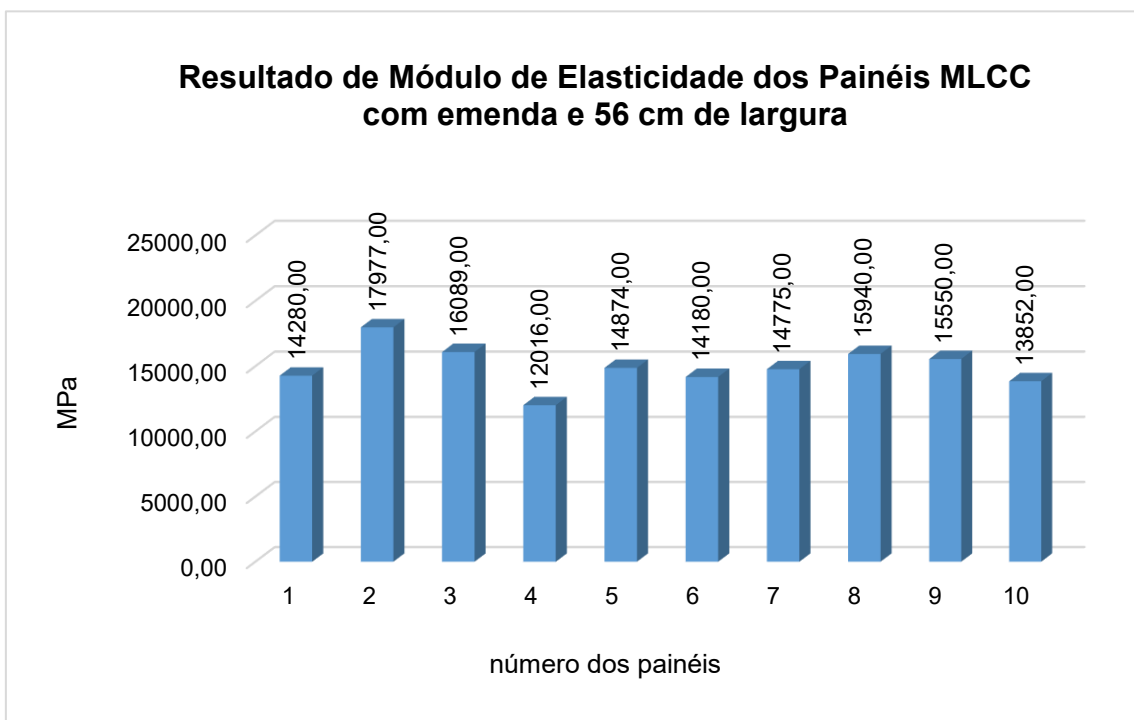


Figura 67 Resultados de MOE dos painéis com emenda e largura de 56cm. Fonte: Autor

Os resultados de MOE observados no grupo dos painéis com emendas e 56cm de largura (fig. 67) foram 6,74% superiores em relação a média geral de MOE de todos os grupos (13.944 MPa), com coeficiente de variação de 10,07%. A correlação entre os resultados de MOR e MOE deste grupo de painéis foi de 0,13, inferior aos demais grupos, ou seja, onde nota-se valores superiores de MOR, como por exemplo no painel CE 5603 (fig. 66), o resultado do MOE deste painel não é o maior do grupo. Do mesmo modo, no painel CE5604 (fig 67) que apresenta o menor valor de MOE do grupo o resultado observado de MOR é um dos mais altos. Como mostra as figuras 68 e 69 ambos painéis romperam na base da emenda e na madeira.



Figura 68. Painel CE5603 demonstrando ruptura na base da emenda e na madeira.
Fonte: Autor

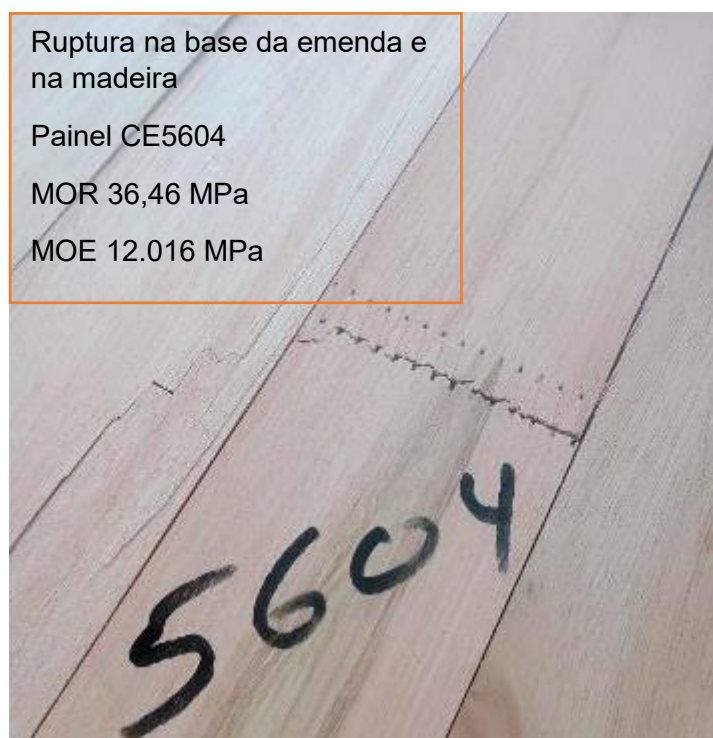


Figura 69 Painel CE5604 demonstrando ruptura na base da emenda e na madeira.
Fonte: Autor

5.2.3 Resultado dos ensaios de flexão dos painéis com emenda e 84 cm de largura

No grupo dos painéis com emendas e 84 cm de largura, a correlação entre os resultados obtidos de MOE e MOR foi de 0,38, apresentando o maior e o menor coeficiente de variação entre os grupos dos painéis com e sem emendas para os resultados de MOE 31,55% e MOR 8,53%. Nas figuras 70 e 71 nota-se esta curva de variáveis entre os valores de MOR e uma maior linearidade nos resultados de MOE.

O valor mais expressivo de MOR deste grupo foi do painel CE8405 e o menor valor do painel CE 8404, como pode ser observado na figura 70. O modo de ruptura destes painéis ocorreu de forma diferente, o painel CE8404 rompeu por descolamento de camada (fig 73) e o CE 8405 por ruptura na base da emenda e na madeira (fig 72), ou seja, a qualidade da colagem influenciou no resultado de MOR, entretanto, os resultados de MOE foram semelhantes entre estes painéis.

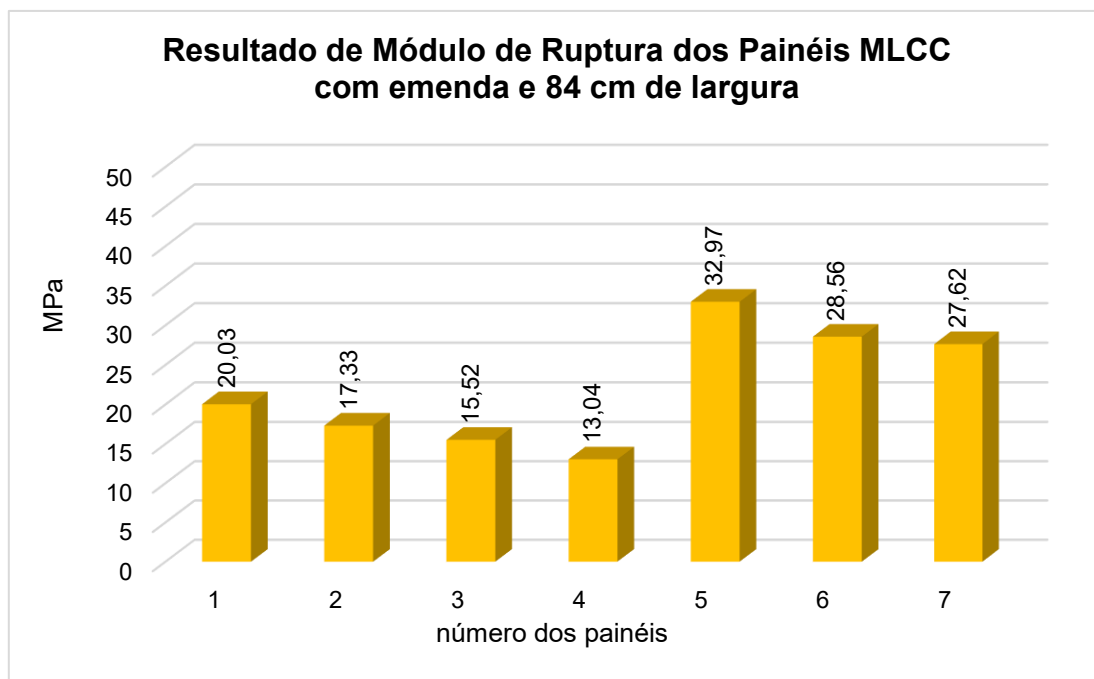


Figura 70 Resultados de MOR dos painéis com emenda e 84 cm de largura. Fonte: Autor

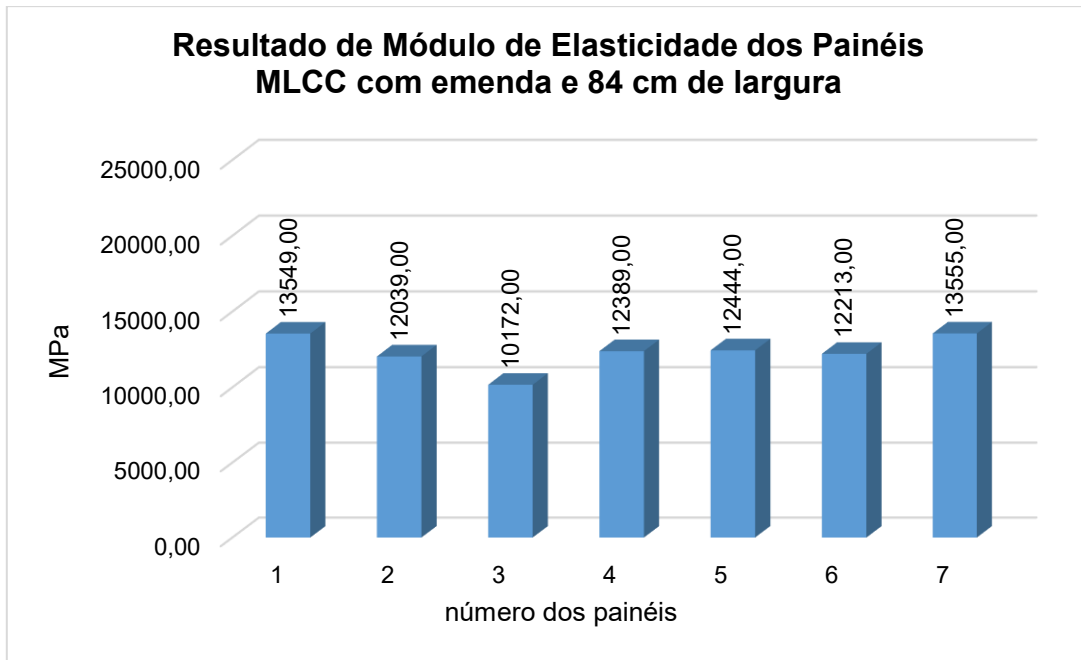


Figura 71 Resultados de MOE dos painéis com emenda e 84 cm de largura. Fonte: Autor

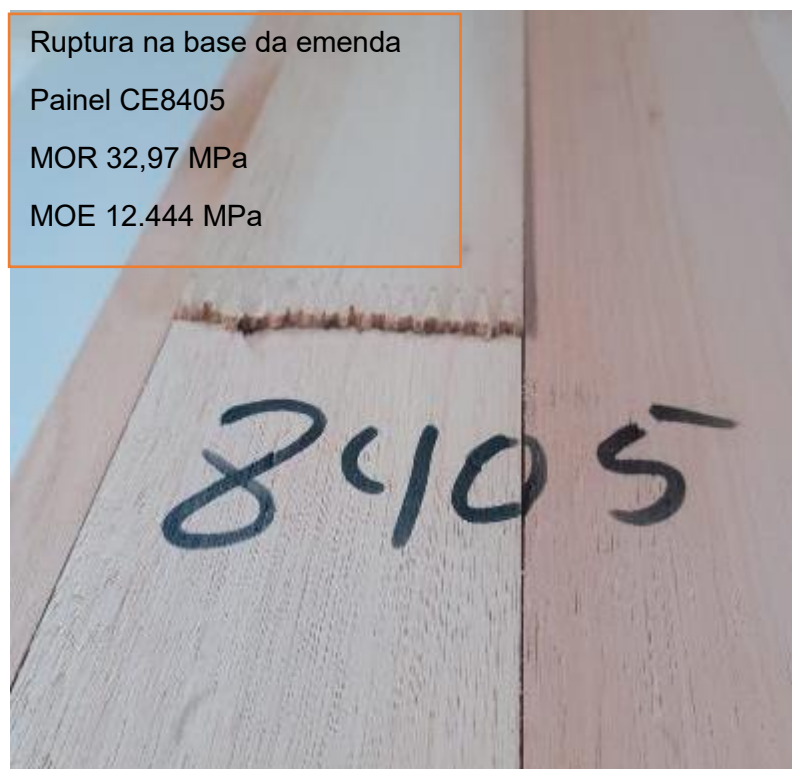


Figura 72 Painel CE8405 demonstrando ruptura na base da emenda. Fonte: Autor



Ruptura por
descolamento de
camada

Painel CE8404

MOR 13,04 MPa

MOE 12.389 MPa

Figura 73 Painel CE8404 rompeu por descolamento de camada. Fonte: Autor

5.2.4 Resultado dos ensaios de flexão dos painéis sem emenda

O grupo dos painéis sem emendas foi o que apresentou maiores valores de módulos de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) como mostra as figuras 74 e 75. Notou-se neste grupo uma correlação de 0,72 entre os valores MOE e MOR, a maior entre todos os grupos de painéis.

ALENCAR *et. al* (2019), em ensaios de painéis MLCC fabricados com medula de eucalipto sem emendas, utilizando adesivo melanina uréia formaldeído (MUF), obteve resultados médios de MOR de 24 MPa e MOE de 10.270 MPa, 45% e 37% respectivamente, inferiores aos resultados médios de MOR (43,61 MPa) e MOE (16.337,6 MPa) observados neste estudo.

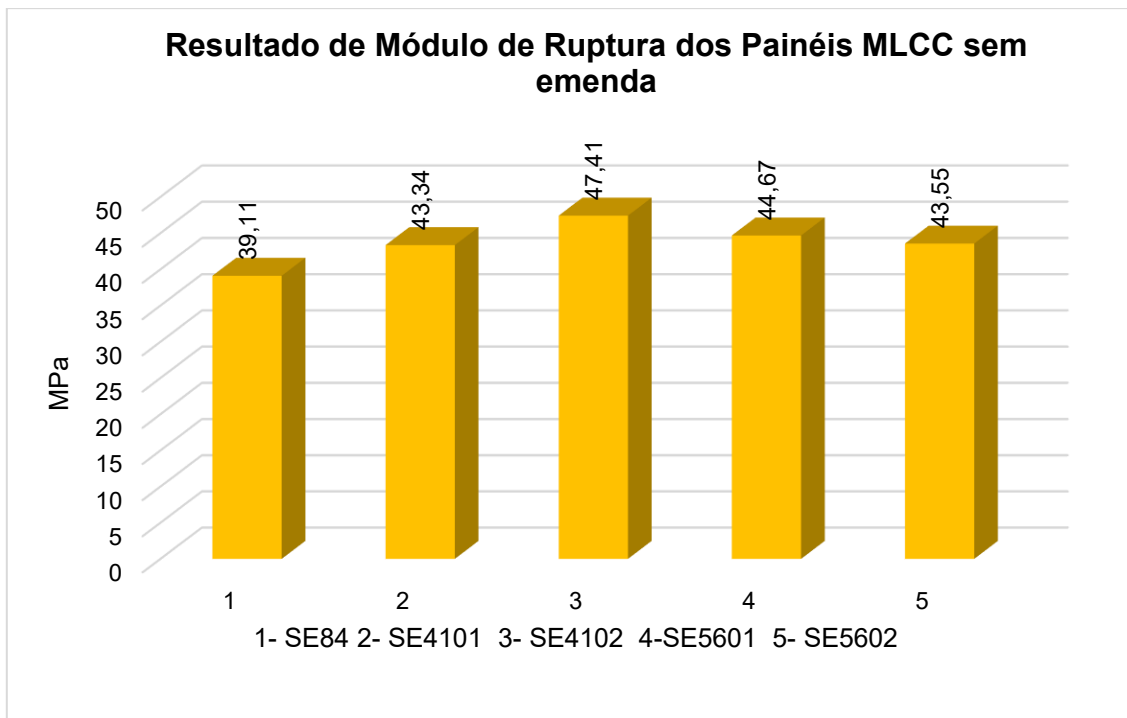


Figura 74 Resultados de MOR dos painéis sem emenda. Fonte: Autor

O coeficiente de variação dos resultados tanto de MOR como de MOE neste grupo foram menos expressivos que os demais, indicando maior similaridade dos resultados. O modo de ruptura na madeira foi predominante neste grupo com 80% de incidência, seguido por 60% de ruptura nos nós. Somente um painel deste grupo, o SE84, apresentou ruptura por descolamento de camada e neste mesmo painel foi onde observou-se os menores valores de MOR (39,11 MPa) e MOE (14.108 MPa) do grupo.

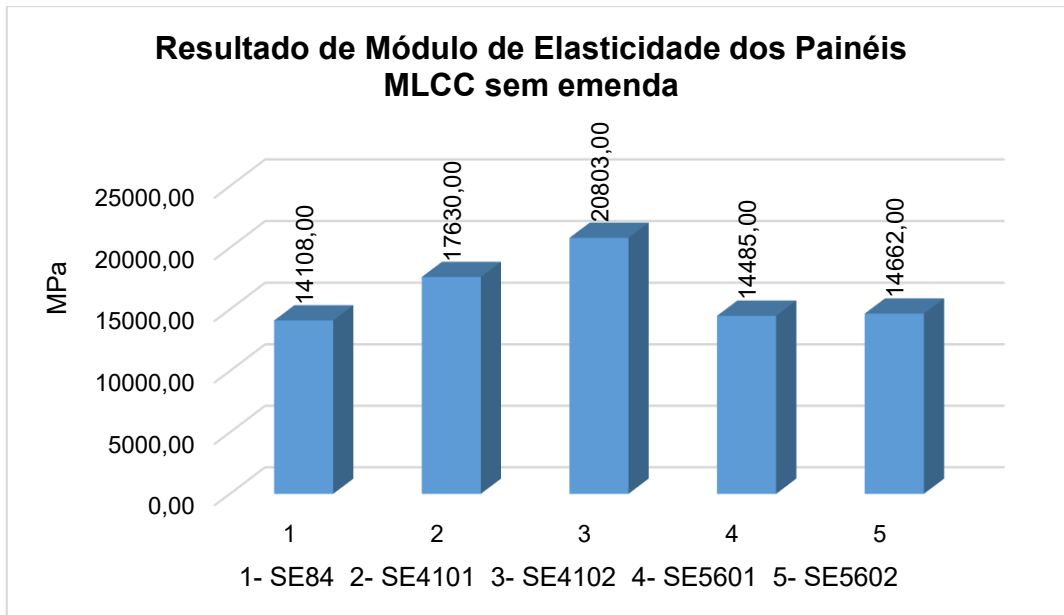


Figura 75 Resultados de MOR dos painéis com emenda e 84 cm de largura. Fonte: Autor

Como pode ser observado na figura 76, o painel SE4102 foi o que apresentou os maiores resultados de MOE e MOR entre os painéis sem emenda e entre os demais painéis MLCC deste estudo. Este painel apresentou ruptura na madeira e nas proximidades dos nós (fig. 77 e 78).



Figura 76 Painel SE4102 apresentando modo de ruptura no nó e na madeira. Fonte:

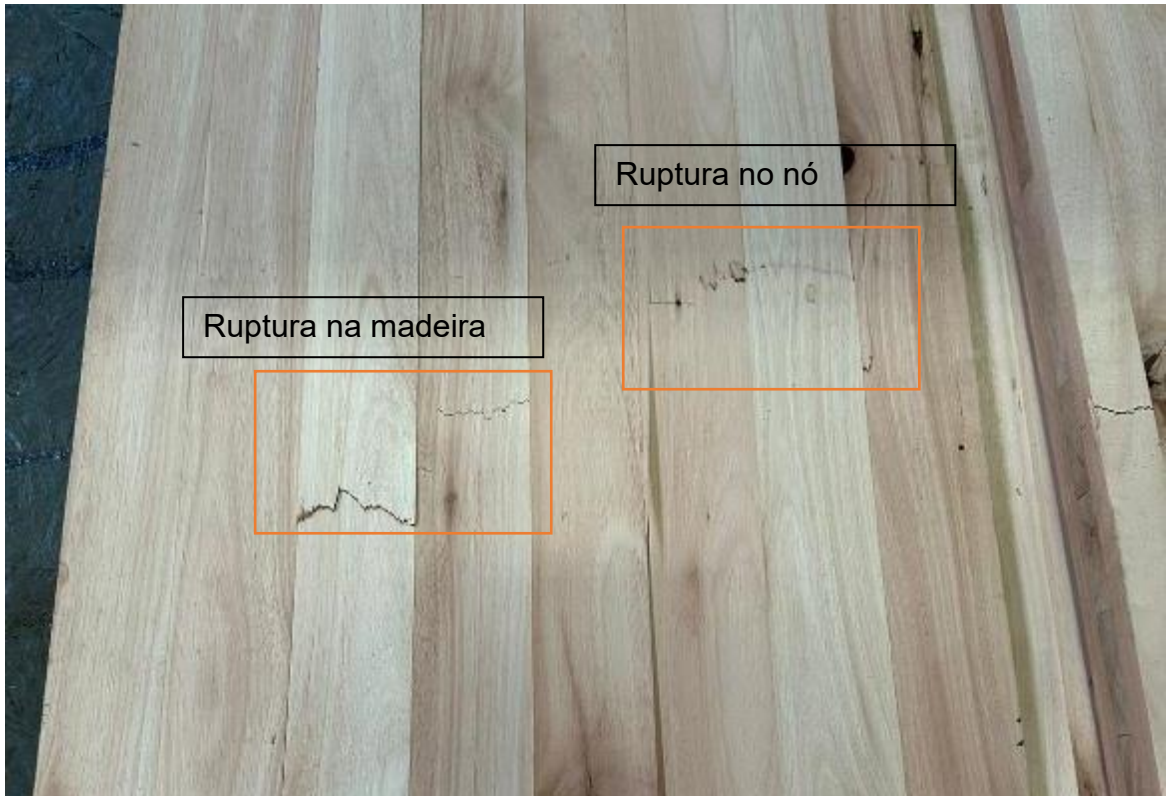


Figura 77 Painel SE4101 com ruptura na madeira e nos nós. Fonte: Autor



Figura 78 Painel SE 5601 demonstrando modo de ruptura nos nós e na madeira. Fonte: Autor

5.3 ENSAIO DE CISALHAMENTO

Os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento e modo de fratura dos corpos esta demonstrado na quadro 16. Os valores médios e coeficientes de variação, observados nos grupos de corpos de prova retirados dos painéis MLCC com emendas de 41cm, 56cm e 84cm de largura e dos sem emendas foi de 6,1 MPa (46,67%), 6,9 MPa (33,3%), 5,86 MPa (32,93%) e 7,57 MPa (28,79%) respectivamente.

CORPO DE PROVA CISALHAMENTO	N. 1 (MPa)	N. 2 (MPa)	MODO DE FRATURA (1)	MODO DE FRATURA (2)
ce4101	7,72	4,72	60 % FR 40% FC	100% FC
ce4102	8,55	7,95	20 % FR 60% FC	35% FR 65% FC
ce4103	4,92	2,64	18 % FR 82% FC	16% FR 84% FC
ce4104	6,30	6,00	100% FP	56 % FR 44% FC
ce4105	6,07	9,00	12% FR 88% FC	35% FR 65% FC
ce4106	8,70	8,18	18% FR 82% FC	55% FR 45% FC
ce4107	0,71	9,52	48% FR 52% FC	100% FC
ce4108	6,38	8,76	20% FR 80% FC	24% FR 76% FC
ce4109	0,88	4,28	5% FR 95% FC	36% FR 64% FC
ce4110	5,77	4,38	65% FR 35% FC	80% FR 20% FC
ce4111	3,50	5,62	85% FP 20% FR	12% FR 88% FC
ce4112	7,05	6,40	16% FR 84% FC	22% FR 78% FC
ce4113	1,62	3,43	45% FR 55% FC	28% FR 82% FC
ce4114	6,60	6,53	40% FR 60% FC	45% FR 55% FC
ce4115	9,30	7,05	16% FR 84% FC	23% FR 77% FC
média	5,95		6,16% FP 29% FR 65% FC	
Desvio padrão	2,45		23,55% FP 20,48% FR 26,25% FC	
Cv %	41,22		381,90% FP 70,60% FR 40,38% FC	
ce5601	8,78	10,42	80% FR 20% FC	100% FC
ce5602	7,05	8,40	10% FP 10% FR 80% FC	8% FR 92% FC
ce5603	7,05	7,42	90% FR 10% FC	75% FP 25% FC
ce5604	1,27	3,73	18% FP 82%FC	28% FP 72% FC
ce5605	10,27	6,75	35% FP 65% FC	15% FP 30% FR 55% FC
ce5606	10,88	8,99	27% FR 73% FC	100%FC
ce5607	7,42	5,55	95% FR 5% FC	25% FP 75%FC
ce5608	8,18	10,50	70%FR 30% FC	5% FP 70% FR 25%FC

ce5609	5,25	9,34	10% FP 90% B	10% FP 10% FR 80% FC
ce5610	8,85	7,87	10% FP 50% FR 40%FC	45% FR 55% FC
média	6,90		10,80% FP 45% FR 44,20% FC	
Desvio padrão	2,31		18,17% FP 38,37% FR 32,12% FC	
Cv %	33,40		168,27% FP 85,26% FR 72,67% FC	
ce8401	8,33	7,42	10% FR 90% FC	8% FR 92% FC
ce8402	5,40	5,40	45% FR 55% FC	15% FR 85% FC
ce8403	6,90	4,05	25% FR 75% FC	20% FR 80%FC
ce8404	4,72	4,50	10% FP 40% FR 50% FC	13% FP 87% FC
ce8405	7,80	5,17	25% FP 75% FC	15% FP 40% FR 45% FC
ce8406	9,15	3,13	25% FP 30% FR 45% FC	35% FP 30% FR 35% FC
ce8407	9,82	7,95	45% FP 55% FC	65% FR 45% FC
média	5,86		7% FP 26,6% FR 65,3% FC	
Desvio padrão	1,93		11,29% FP 19,12% FR 19,97% FC	
Cv %	32,98		161,33% FP 71,75% FR 30,60% FC	
se4201	8,18	9,67	90% FP 10% FR	80% FP 20% FC
se4202	9,52	7,65	50% FR 50% FC	90% FR 10% FC
se5601	8,48	2,06	64%FP 6% FR 30% FC	45% FP 55% FC
se5602	7,57	8,85	35%FP 40% FR 25% FC	20% FP 50% FR 30% FC
se84	7	9,07	68% FR 32% FC	100% FR
média	7,57		33,40%FP 41,40%FR 25,20% FC	
Desvio padrão	2,19		35,10% FP 37% FR 18,63% FC	
Cv %	28,90		105,10% FP 89,37%FR 73,93%FC	

Quadro 16 Resultado dos ensaios de cisalhamento e modo de fratura dos corpos de prova. Fonte: Autor. Legenda: FP= fratura profunda / FR= falha rasa / FC= falha na linha de cola

A diferença entre os valores médios observados entre os grupos não foi expressivo (fig. 89) no entanto as proporções acompanharam os resultados de ruptura dos painéis MLCC sem e com emendas.

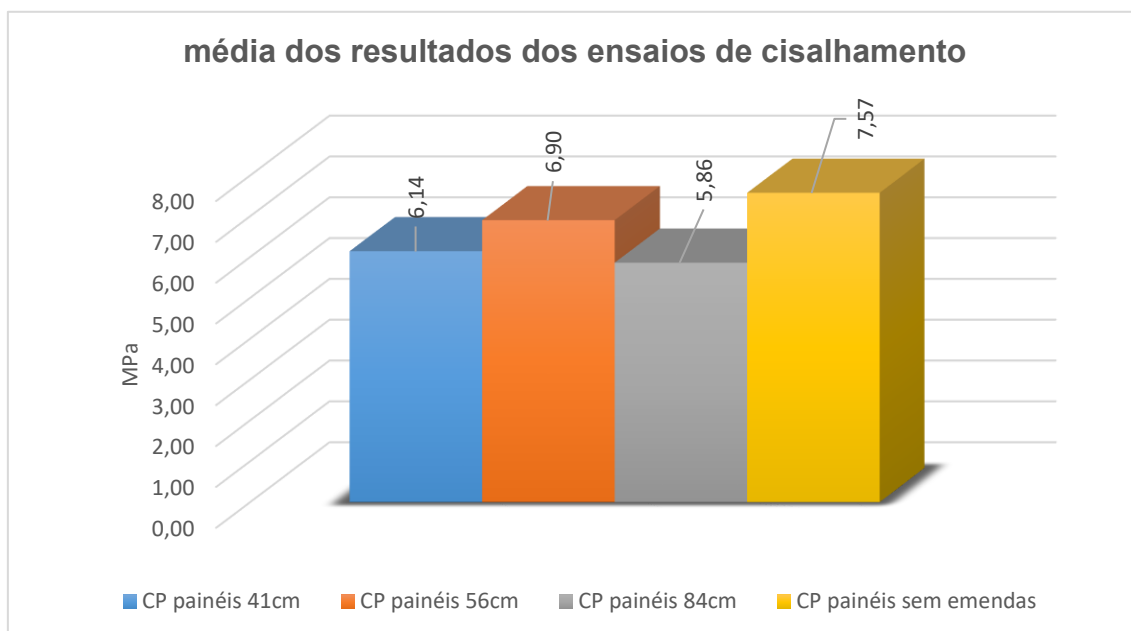


Figura 79 Média dos Resultados dos ensaios de cisalhamento. Fonte: Autor

A média geral dos resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento deste estudo foi de 6,62 MPa, comparando-se com os resultados observados na literatura de corpos de prova produzidos com eucalipto com densidades entre 0,67 e 0,59 g/cm³ e utilizando adesivo PU foram observados valores de 12,68 MPa, (SEGUNDINHO *et. al* (2018)), 7,61 MPa (BIANCHI *et. al* (2015)), 8,3 MPa (SILVA *et. al* (2023)), 6,74 MPa (BOURCHEID *et. al* (2015)) e o menor valor de 3,76MPa (DUGMORE *et. al* (2019)). Ou seja, nos mesmos contextos de adesivo e densidade, os resultados do estudo se aproximaram dos resultados obtidos pelos autores pesquisados, como demonstra a figura 80.

Resumo Revisão de Literatura dos Resultados dos ensaios de Resistência ao cisalhamento

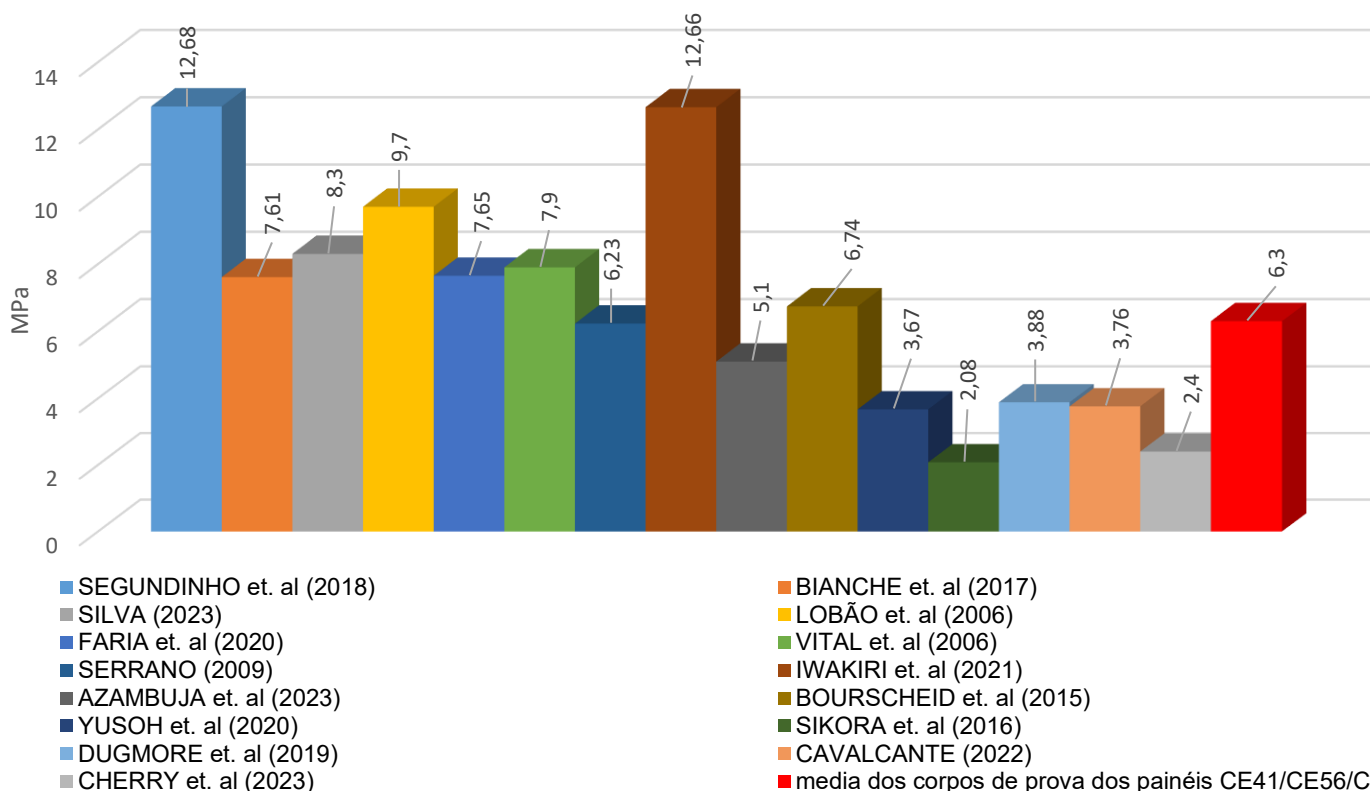


Figura 80 Resumo Revisão de Literatura dos Resultados dos ensaios de Resistência ao cisalhamento. Fonte: Autor

Como demonstra a figura 81, apesar dos valores médios dos resultados por grupo de painéis MLCC nos ensaios de cisalhamento apresentarem proximidade, a variabilidade dos dados em relação à média é elevado com valores entre 0,71 MPa e 11,02MPa. O grupo que apresenta maior coeficiente de variação é o dos corpos de prova extraído dos painéis com 41cm 42,67%, seguidos pelos grupos dos painéis com 56cm e 84cm que apresentaram 33,3% e 32,93%, o menor valor de coeficiente de variação foi observado no grupo dos painéis sem emendas 28,79%.

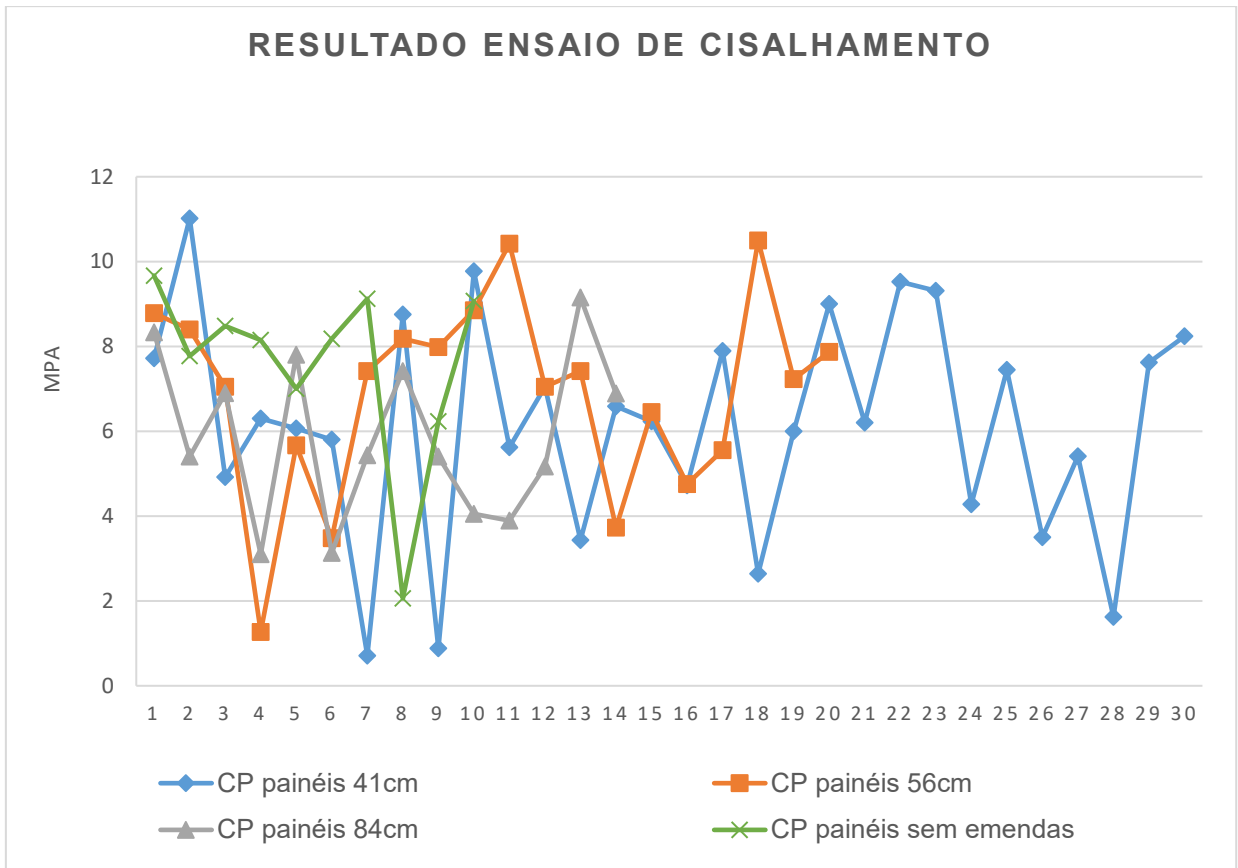


Figura 81 Gráfico com os resultados dos ensaios de cisalhamento por grupo de painéis MLCC. Fonte: Autor.

5.3.1 ANÁLISE DO MODO DE FRATURA DOS CORPOS DE PROVA DO ENSAIO DE CISALHAMENTO

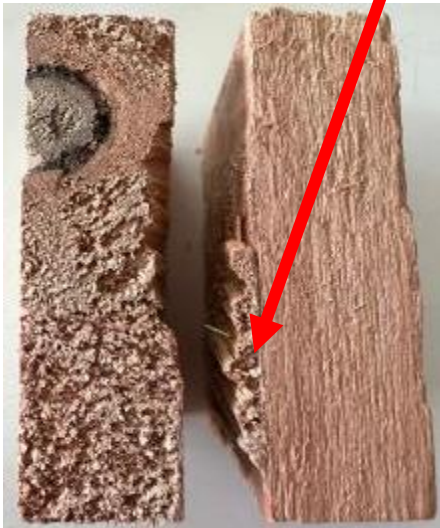
A análise do modo de fratura dos corpos de prova submetidos ao ensaio de cisalhamento, avaliou as porcentagens de colagem entre fraturas profunda e fratura rasas e a falha na linha de cola, que indica o deficiência na colagem, como mostra a figura 82.



Fratura profunda



Falha na linha de cola



Falha rasa



Figura 82 Modo de fratura dos corpos de prova do ensaio de cisalhamento. Fonte: Autor

Pode-se observar maior diferença entre os grupos de painéis do que os resultados dos valores de cisalhamento (fig 83). Estas diferenças entre os grupos se alinham com as proporções entre as falhas de colagem dos painéis MLCC nos ensaios de flexão.

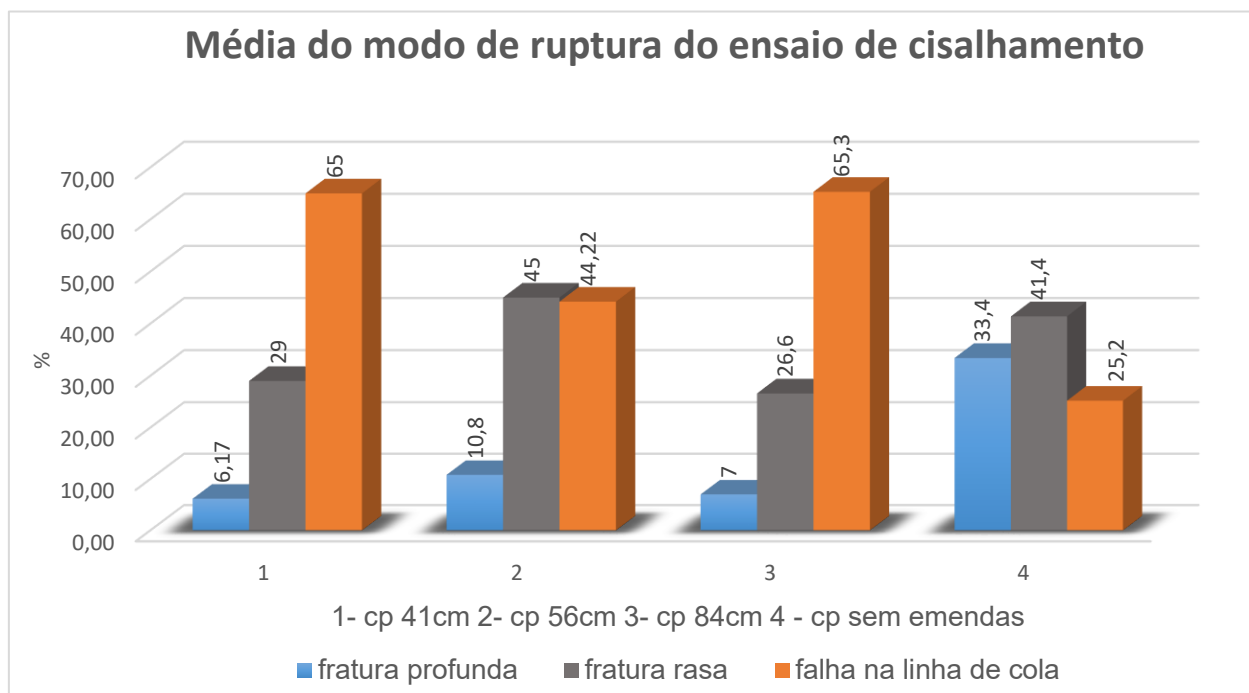


Figura 83 Resultado comparativo das médias de modo de ruptura do ensaio de cisalhamento. Fonte: Autor

Na figura 83, pode-se observar que os corpos de prova extraídos dos painéis sem emendas apresentaram menores proporções de falha na linha de cola e maior incidência de colagem, somando-se a falha rasa e profunda, que os demais. Os resultados dos modos de ruptura dos corpos de prova dos painéis com emendas com 41 cm e 84 cm mostraram proporções semelhantes, com altos índices de falha na linha de cola e baixa incidência de colagem, alinhando-se com os resultados de descolamento das camandas observados nos painéis correspondentes, com pode ser observado na figura 84.

As maiores médias de colagem e as menores médias de falha na linha de cola nos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento são provenientes dos painéis com emendas e largura de 56 cm, em contraponto aos demais grupos de corpos de prova de painéis com emendas. Estes resultados são coincidentes com a ordem de grandeza analisada nos resultados dos modos

de ruptura dos painéis MLCC nos ensaios de flexão, no qual, dentre os painéis com emendas o grupo dos painéis com 56 cm apresenta os menores índices de descolamento das camadas e valores de MOE e MOR, inversamente proporcional aos resultados analisados nos grupos dos painéis 41 cm e 84 cm. (fig. 84)

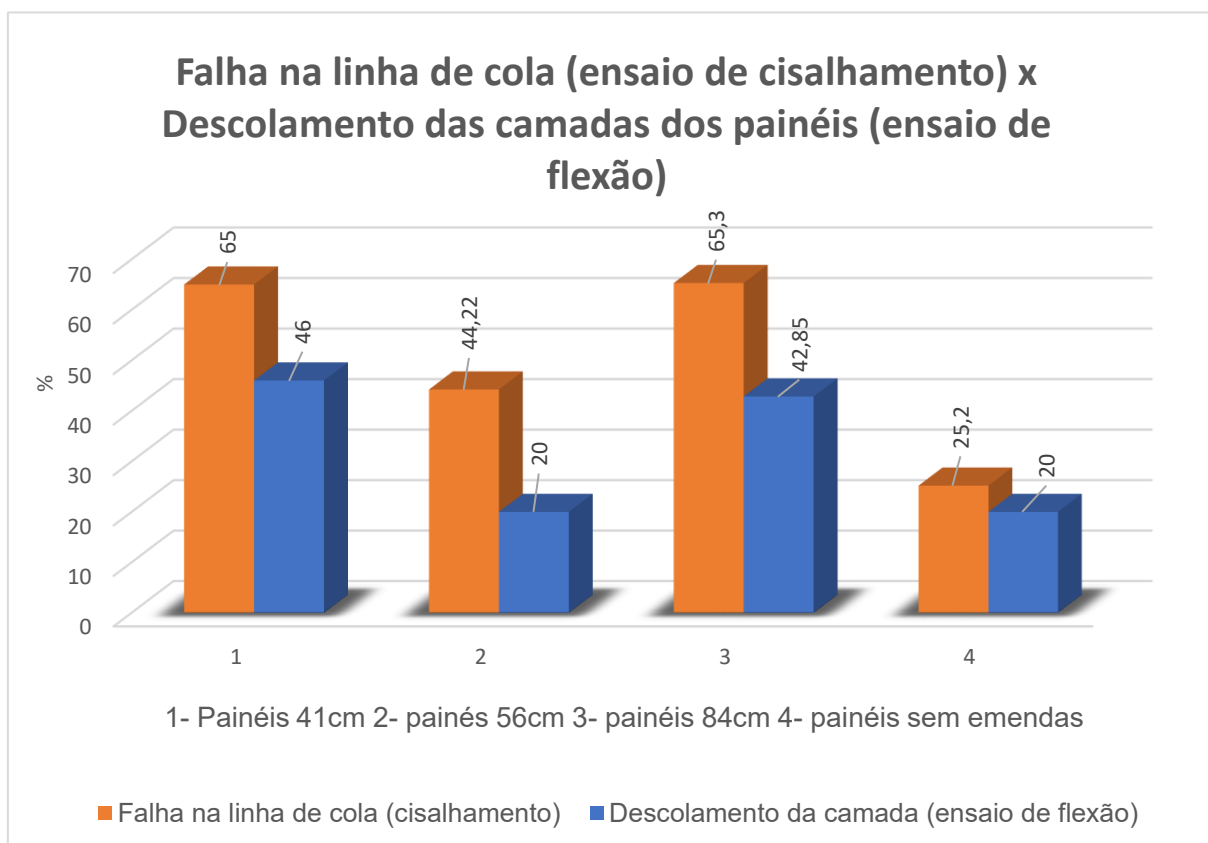


Figura 84 Resultado comparativo das médias de modo de ruptura do ensaio de cisalhamento com as médias de descolamento das camadas dos painéis nos ensaios de flexão. Fonte: Autor

5.3.1.1 Análise do modo de Fratura dos corpos de prova dos painéis com emendas e 41cm de largura

Como pode ser observado na figura 85, o gráfico referente aos modos de ruptura corpos de prova de cisalhamento dos painéis com emendas e 41 cm de largura, mostra predominância de 65% dos resultados de falha na linha de cola. Em 35% das amostras houve indicação de colagem e somente em 6% fraturas profundas, que apresentaram-se concentradas em apenas duas

amostras, resultando em um indicador de coeficiente de variação elevado (381,60%), indicando que a qualidade da colagem geral do grupo não foi satisfatória. Este resultado é compatível com o índice de descolamento das camadas de 46%, observados neste mesmo grupo de painéis MLCC.

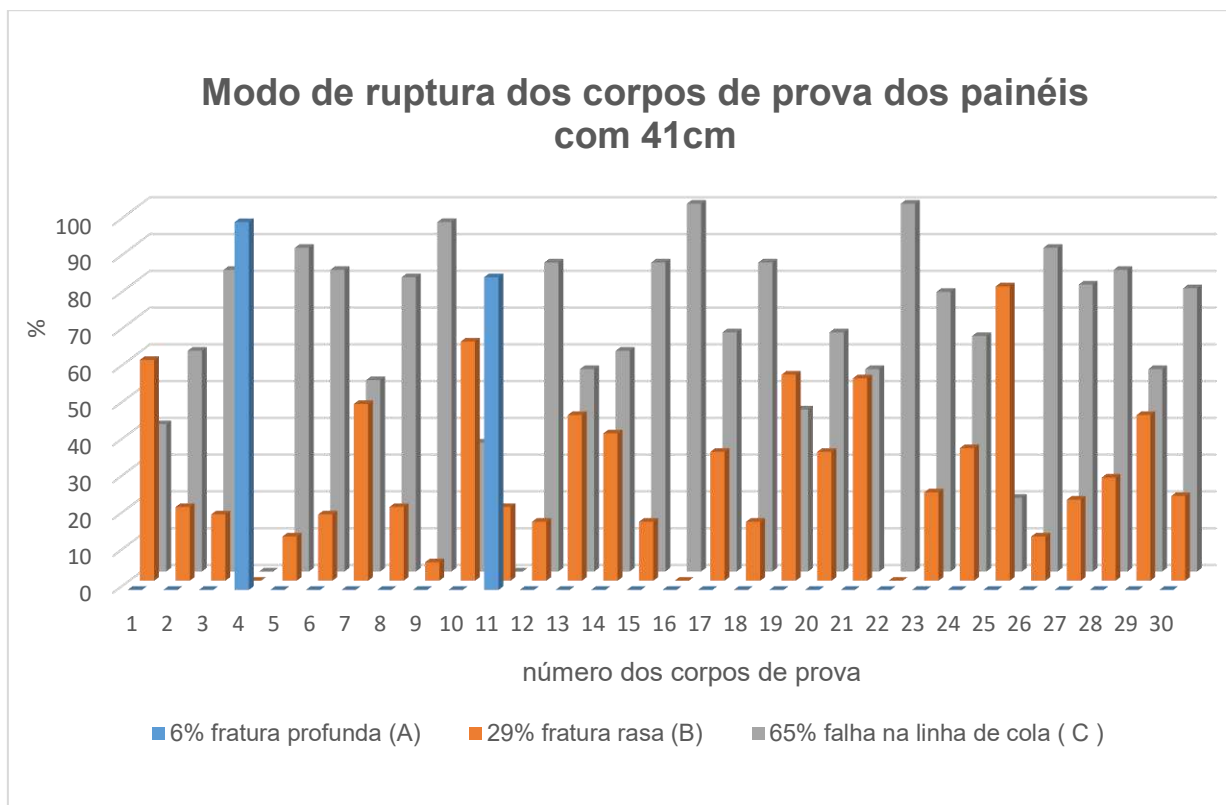


Figura 85 Gráfico com os resultados dos modos de fratura dos corpos de prova dos painéis com emendas e 41cm de largura. Fonte: Autor.

Os painéis CE4104 e CE4111 apresentaram MOE de 13.724 MPa e MOR 26,89 MPa e 15.485 MPa para MOE e 22,74 MPa para MOR e ruptura na base da emenda e descolamento da camada respectivamente. Como pode ser observado na figura 89, os corpos de prova provenientes deste painéis apresentaram altos índices de fraturas profunda, demonstrando a correlação entre os resultados dos modos de ruptura dos painéis com os modos de fratura dos corpos de prova do ensaio de cisalhamento. O painel CE 4103 foi o que apresentou menor valor de MOE 4.801 MPa entre todos os painéis testados, encontrando-se abaixo dos requisitos mínimos da norma ANSI/APA PGR 320 (2019) 8.300 MPa. Os corpos de prova extraídos deste painel apresentaram 84%

de falha na linha de cola demonstrando que a baixa qualidade da colagem pode ter sido a causa do valor de MOE abaixo da média dos demais painéis testados.

5.3.1.2 Análise do modo de Fratura dos corpos de prova dos painéis com emendas e 56 cm de largura

Os resultados observados na análise do modo de fratura dos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento provenientes dos painéis MLCC com emenda e largura de 56 cm mostraram um índice de 55,8% de colagem (fratura rasa e profunda) contra 44,2% de falha na linha de cola, onde não se observam fraturas na madeira, somente o descolamento da peça (fig. 86).

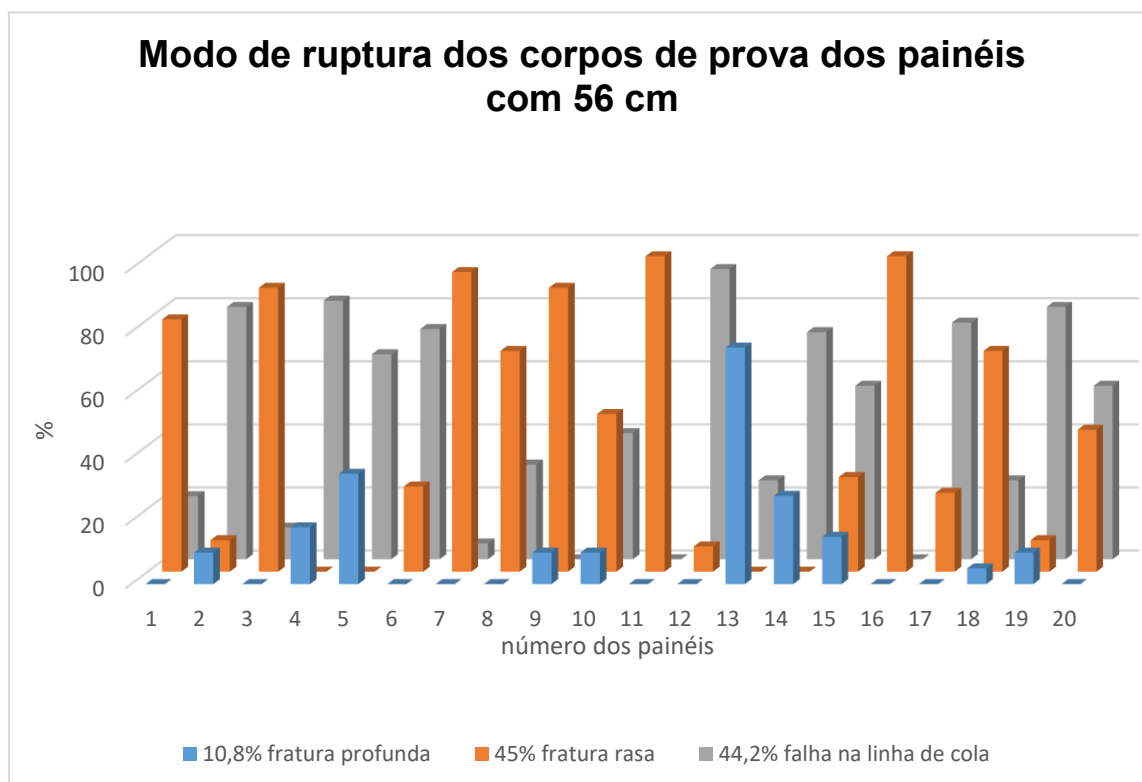


Figura 86. Gráfico com os resultados dos modos de fratura dos corpos de prova dos painéis com emendas e 56 cm de largura. Fonte: Autor

A baixa incidência de descolamento nos modos de ruptura dos painéis MLCC de 56 cm e os valores acima da média tanto em MOE como em MOR alinham-se com os resultados observados no modo de fratura dos ensaios de cisalhamento, corroborando a correlação positiva entre os ensaios.

O painel CE5603 foi o que apresentou maior valor de MOR (48 MPa) no ensaio de flexão entre os painéis com emenda e o valor de MOE (16.089 MPa) 18% acima da média dos valores de MOE dos painéis MLCC com emendas.

5.3.1.3 Análise do modo de Fratura dos corpos de prova dos painéis com emendas e 84cm de largura

Os resultados dos modos de ruptura dos corpos de prova extraídos dos painéis com emendas e 84 cm de largura apresentaram 65,3% de descolamento ou falha na linha de cola, aproximadamente o dobro do resultado onde pode-se observar a ocorrência de colagem (fig. 87). Este resultado alinha-se com o modo de ruptura dos painéis MLCC do mesmo grupo, no qual pode-se observar que o descolamento das camadas atingiu 42,85% dos painéis.

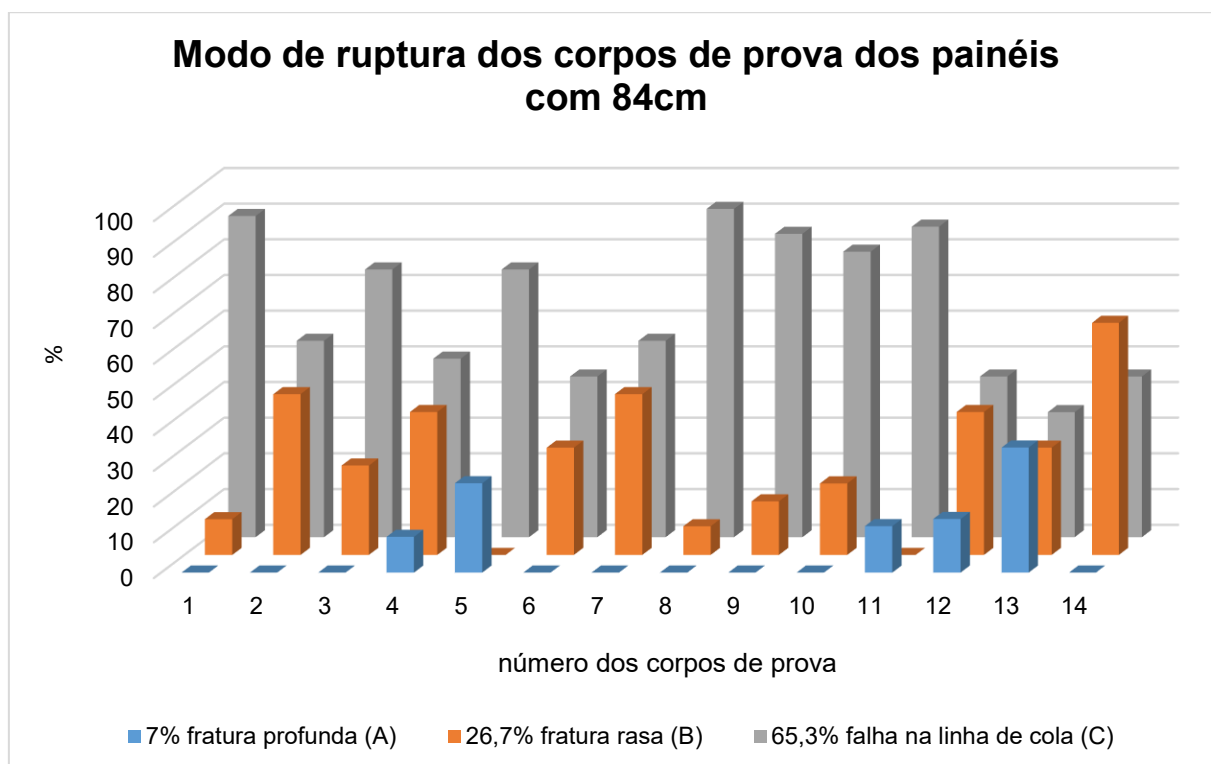


Figura 87 Gráfico com os resultados dos modos de fratura dos corpos de prova dos painéis com emendas e 84 cm de largura. Fonte: Autor

O painel CE8404 foi o que apresentou um dos menores valores de MOR (13,04 MPa) e a ruptura do painel ocorreu por descolamento da camada. Nos corpos de prova extraídos e testados ao cisalhamento os valores obtidos foram abaixo da média 4,72 e 4,50 MPa e apresentaram alto índice de média entre os corpos de prova de falha na linha de cola 68,5%.

Assim como o painel CE8404 os painéis CE8401, CE8402 evidenciaram ruptura por descolamento de camada e a média de falha na linha de cola observada nos corpos de prova ensaiados ao cisalhamento extraídos destes painéis foi de 76,52%. Nos demais painéis, CE8403, CE8405, CE8406 e CE8407, que não houve incidência de descolamento de camada, os corpos de prova ensaiados ao cisalhamento provenientes deste painéis, apresentaram índice médio de falha na linha de cola de 56,75%, demonstrando a correlação entre qualidade da colagem dos painéis MLCC aos baixos resultados de falha na linha de cola dos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento.

5.3.1.4 Análise do modo de Fratura dos corpos de prova dos painéis sem emendas

O resultado médio do ensaio de cisalhamento (7,57MPa) deste grupo é ligeiramente superior aos demais, como demonstra a figura 88, no entanto o modo de ruptura dos corpos de prova provenientes dos painéis MLCC sem emendas foram os que apresentaram menor média de falha na linha de cola (25,2%) e maior média de incidência de colagem (74,8%) entre os grupos de painéis testados. Estes resultados tem correlação positiva com os modos de ruptura dos ensaios de flexão observados no grupo dos painéis sem emenda, dos quais 20% apresentaram ruptura por descolamento de camada.

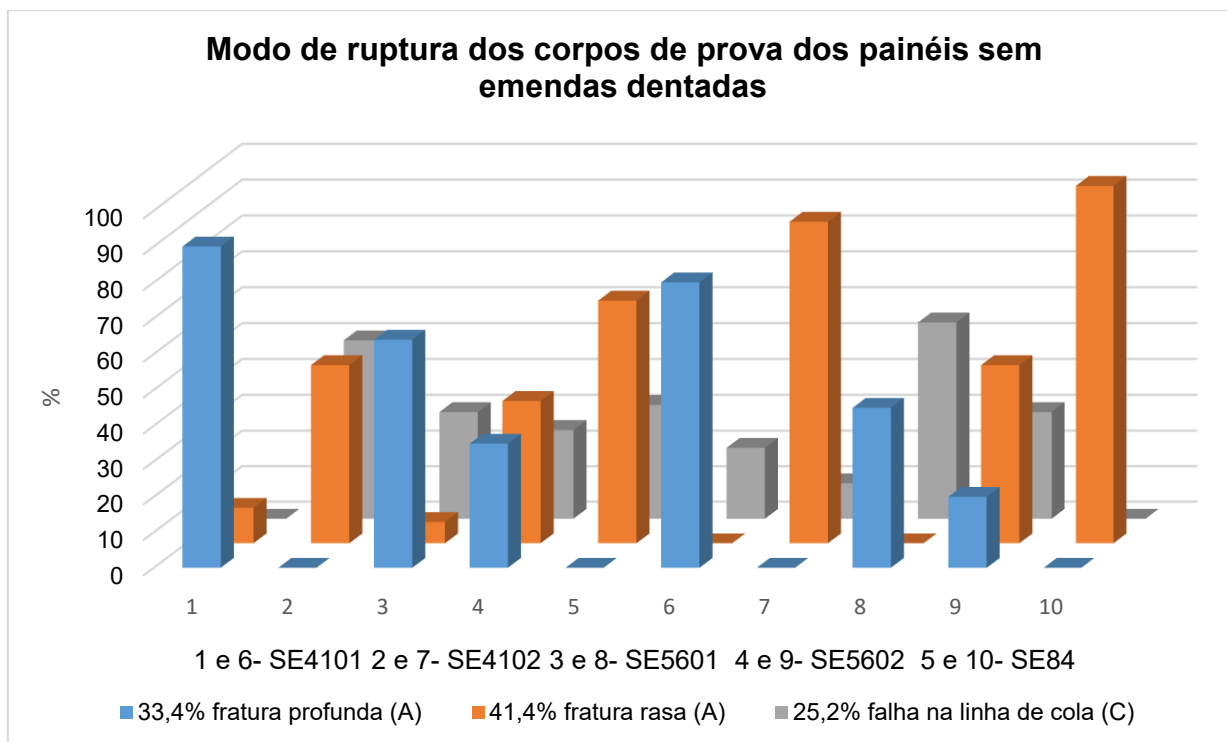


Figura 88 Gráfico com os resultados dos modos de fratura dos corpos de prova dos painéis sem emendas. Fonte: Autor

5.4 ENSAIO DE DELAMINAÇÃO

No ensaio de delaminação executado nos corpos de prova retirados dos painéis MLCC, os resultados verificados mostram que houve valores percentuais mais elevados de delaminação total nos corpos de prova extraídos dos painéis com emendas e com 84 cm de largura (24,9%), como demonstra o quadro 17. Os demais grupos dos corpos de prova dos painéis com 41cm e os sem emendas apresentaram médias de valores de delaminação total de 17,21% e 12,4% respectivamente, como demonstra a figura 89. O grupo de corpos de prova que apresentou o menor valor de delaminação total percentual foi o proveniente dos painéis com emenda e 56 cm de largura, no entanto este grupo foi o que apresentou maior coeficiente de variação entre os resultados das amostras (131,86%).

CORPO DE PROVA DELAMINAÇÃO	D1(%)	D2(%)
ce4101	0,18	22,50
ce4102	25,00	46,50
ce4103	50,00	13,75
ce4104	2,50	1,87
ce4105	33,75	0,37
ce4106	20,00	27,5
ce4107	28,75	1,25
ce4108	0,18	0,12
ce4109	25,00	0,25
ce4110	22,50	7,50
ce4111	15,00	56,25
ce4112	12,50	1,87
ce4113	53,75	16,25
ce4114	10,00	0,87
ce4115	18,75	1,62
média	17,21	
Desvio padrão	16,98	
C.V%	98,66	
ce5601	6,25	8,75
ce5602	1,25	7,50
ce5603	0,37	0,87
ce5604	0,50	0,25
ce5605	0,12	0,06
ce5606	1,50	37,50
ce5607	35,00	3,75
ce5608	4,25	5,25
ce5609	13,75	8,75
ce5610	15,00	21,25
média	8,60	
Desvio padrão	11,34	
C.V%	131,86	
ce8401	37,50	17,50
ce8402	42,50	43,75
ce8403	50,00	12,50
ce8404	56,25	60,00
ce8405	0,87	0,31
ce8406	6,25	12,50
ce8407	8,12	0,50
média	24,90	
Desvio padrão	22,77	
C.V%	91,44	
se4201	0,25	6,25
se4202	47,5	17,5

se5601	7,50	28,75
se5602	4,12	8,00
se84	3,75	0,37
média	12,40	
Desvio padrão	15,39	
C.V%	124,11	

Quadro 17 Resultado dos ensaios de delaminação. Fonte: Autor

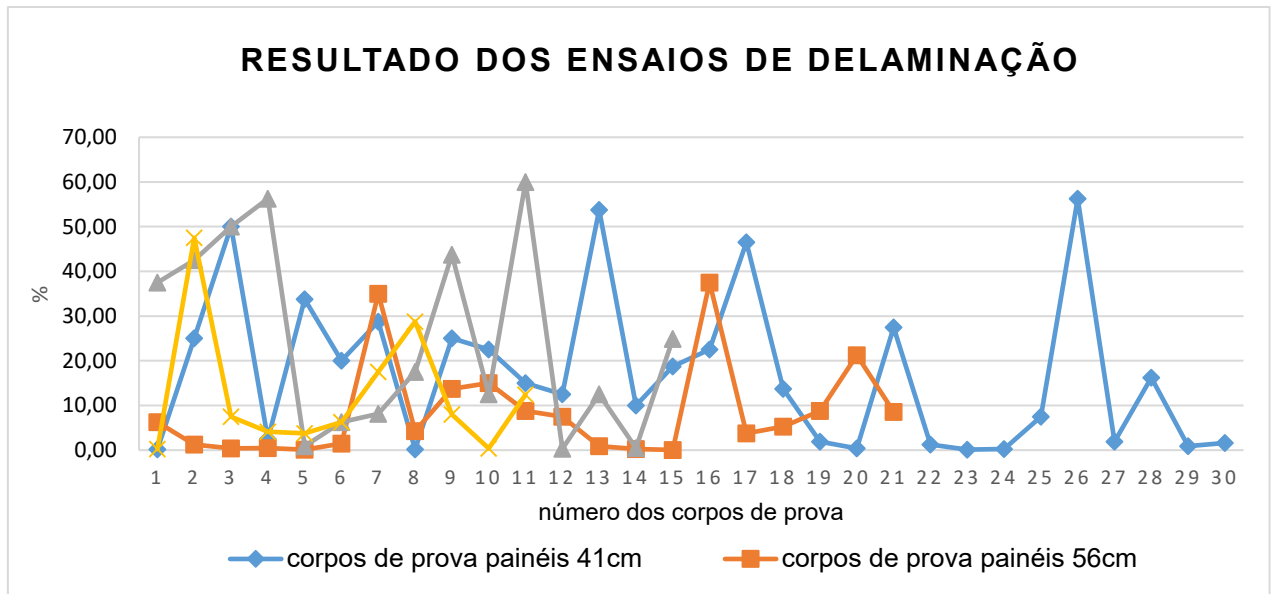


Figura 89 Gráfico com os resultados do ensaio de delaminação dos corpos de prova. Fonte: Autor

Pode-se observar no quadro 17, que nos resultados dos ensaios de delaminação dos corpos de prova, ocorreram taxas superiores de coeficiente de variação em relação aos ensaios de cisalhamento. Em relação as médias dos resultados (fig. 90) houve uma variação maior entre os grupos das amostras dos painéis em comparação aos ensaios de cisalhamento, entretanto percebe-se a correlação negativa entre os resultados dos ensaios de delaminação e os resultados dos ensaios de flexão dos painéis MLCC.

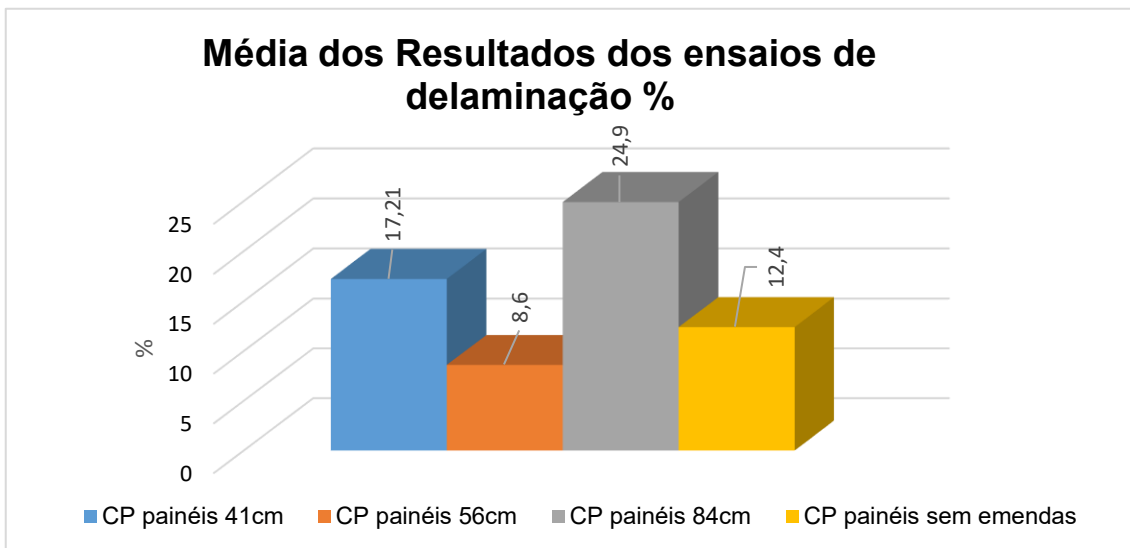


Figura 90 Gráfico de comparação das médias dos resultados dos ensaios de delaminação. Fonte: Autor

Acerca das médias dos resultados dos ensaios de delaminação, diferentemente dos demais ensaios que os resultados dos painéis sem emendas são superiores qualitativamente em relação aos com emenda dentadas, nota-se que o valor resultante do grupo dos corpos de prova dos painéis com emenda e 56 cm de largura, foi inferior aos resultados dos painéis sem emendas, concluindo neste caso que, a colagem deste grupo foi a mais eficiente em relação aos demais grupos.

Os resultados obtidos nos ensaios de delaminação alinham-se aos resultados observados na literatura. BOURSCHEID *et. al* (2015), SEGUNDINHO *et. al* (2018), DUGMORE *et. al* (2019) e CALVANTE (2020) obtiveram 33,63%, 34%, 17,57% e 28,9 % respectivamente, em ensaios de delaminação utilizando eucalipto com densidade média de 0,60 g/cm³ e adesivo PU com demostra a figura 91.

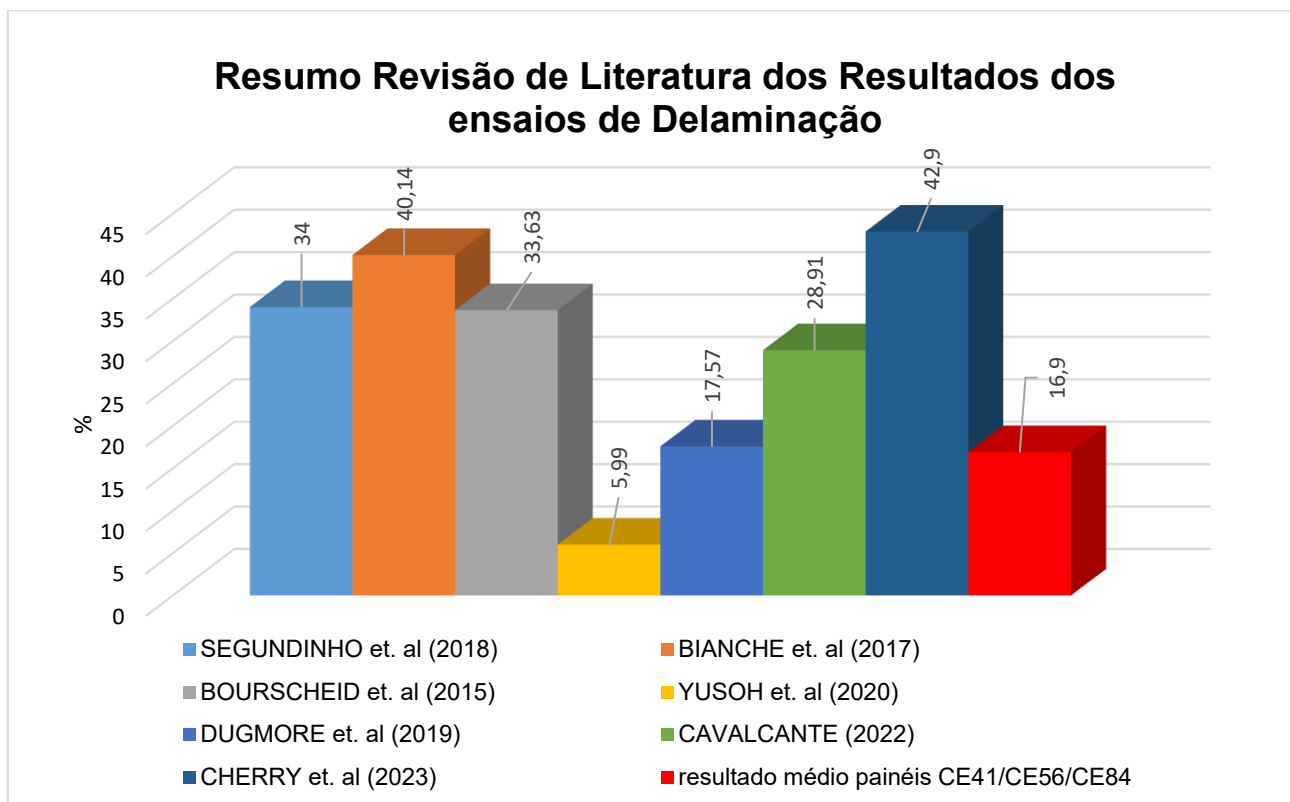


Figura 91 Resumo Revisão de Literatura dos Resultados dos ensaios de Delaminação. Fonte: Autor.

Analisando e comparando as médias dos grupos de painéis nos ensaios de delaminação e comparando-as com os resultados dos ensaios de cisalhamento, especificamente em relação à falha na linha de cola, e com os ensaios de flexão, focando na incidência de descolamento das camadas, observa-se que as áreas com maiores percentuais de delaminação total coincidem com a maior incidência de descolamento das camadas dos painéis e as falhas na linha de cola (fig 92).

Observando os resultados dos ensaios na figura 92 e considerando uma média entre os índices de falha na linha de cola dos ensaios de cisalhamento, delaminação e descolamento das camadas no ensaio de flexão dos painéis, nota-se que os painéis com emenda e 84cm de largura, apresentaram os valores mais expressivo (44,35%) entre os grupos. O grupo dos painéis com emendas e 41cm indicaram média ligeiramente abaixo (42,73%), entretanto os grupos dos painéis com emendas e 56cm (24,27%) e os sem emendas (19,20%) obtiveram médias relativamente próximas.

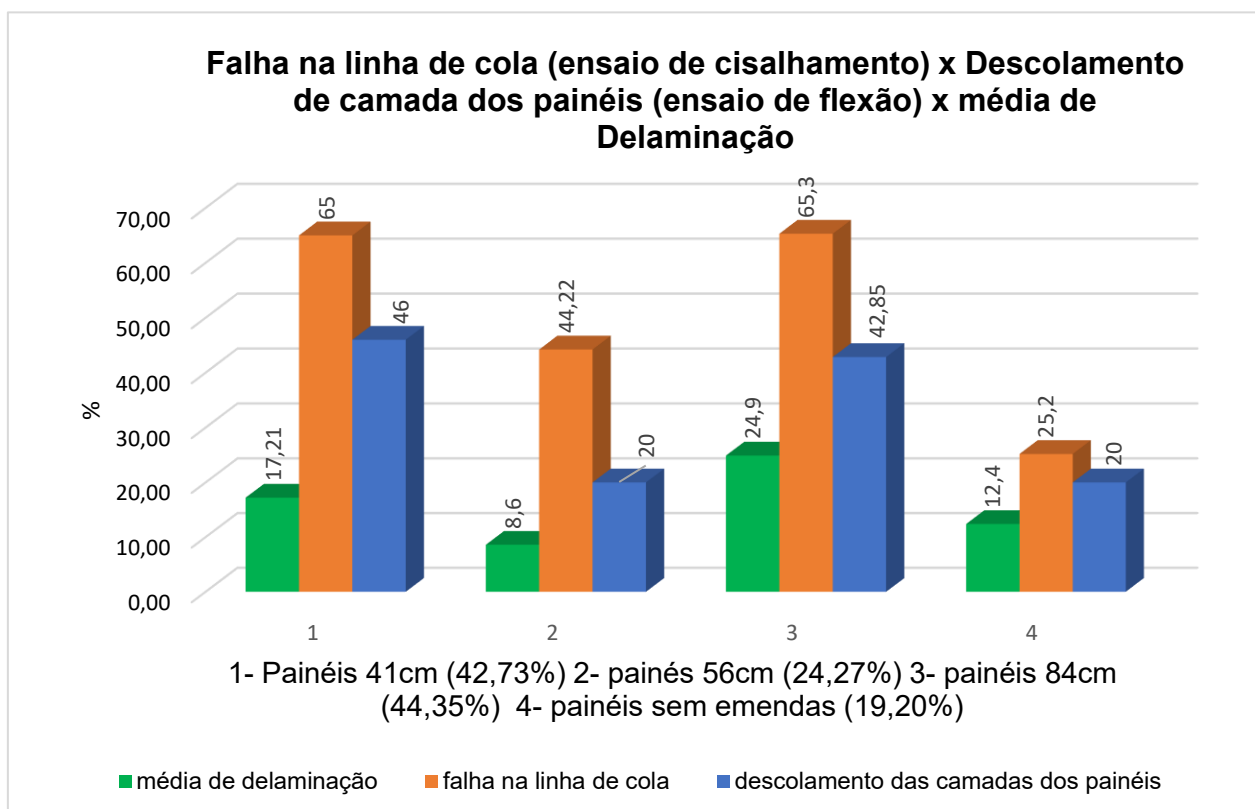


Figura 92 Gráfico de comparação entre os resultados de delaminação total dos corpos de prova, falha na linha de cola (cisalhamento) e o modo de ruptura por descolamento das camadas nos painéis MLCC dos ensaios de flexão. Fonte: Autor

5.4.1 Resultados dos Ensaios de Delaminação dos corpos de prova dos painéis com emenda e 41cm de largura

As observações acerca dos ensaios de delaminação realizados nas amostras retiradas dos painéis com emendas e largura de 41cm, são de que houve uma porcentagem expressiva identificada de delaminação com média de 17,21%, no entanto, como demonstra a figura 93, a variação é alta, com valores entre 0,13% a 56,25%. Nos corpos de prova que apresentaram valores elevados de delaminação, houve descolamento total da camada como mostra a figura 94. Em uma das amostras do painel CE 4102 (fig. 94), nota-se que houve este descolamento da camada, portanto com percentual alto de delaminação total 46,50%.

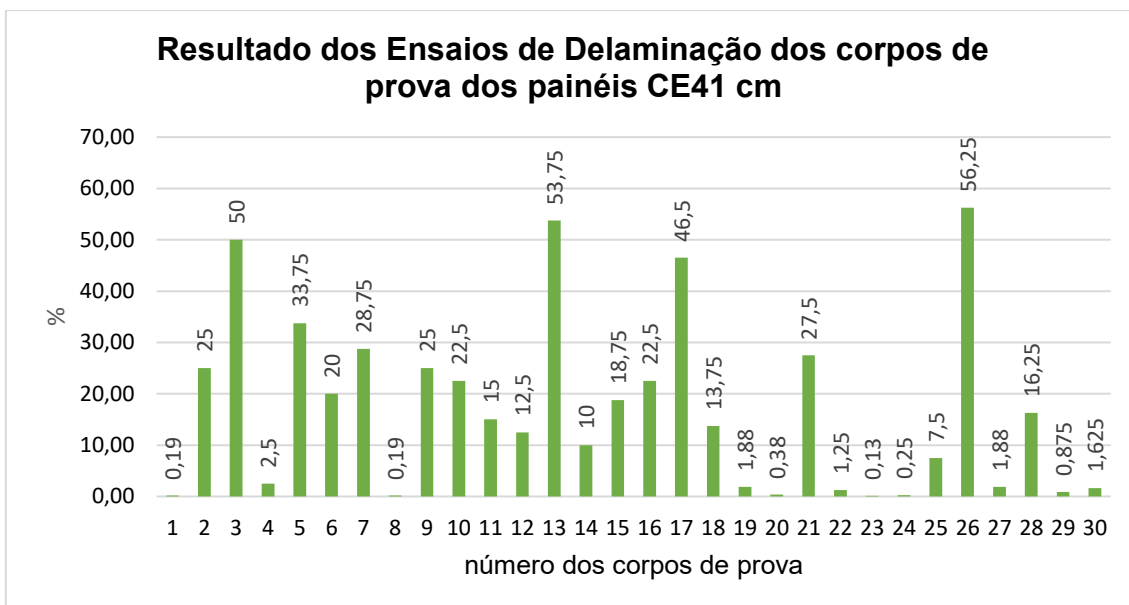


Figura 93 Gráfico com os resultados da delaminação dos corpos de prova dos painéis com emendas e 41cm de largura. Fonte: Autor.

No ensaio de cisalhamento, as amostras do painel CE4102, mostraram resultados de deficiência de colagem, com média de 62,5% de falha na linha de cola no modo de fratura e descolamento de camada nos ensaios de flexão, no qual os valores de MOE (10.590 MPa) e MOR (18,04 MPa) mostraram-se abaixo da média do grupo dos painéis com emenda e 41cm de largura. Portanto, nota-se que a correlação entre o resultado do ensaio de delaminação com os demais ensaios.



Figura 94 . Corpos de prova retirados do painel CE4102 e CE4105 ensaiados a delaminação. Fonte: Autor.

Os resultados obtidos nos ensaios de flexão do painel CE4105 foram acima da média do grupo com MOE de 12.939 MPa e MOR 20,21 MPa e em relação ao modo de ruptura não houve descolamento de camada. Na avaliação do ensaio de delaminação das amostras do painel CE4105, verificaram-se os percentuais de 33,75% e 0,37%, no entanto o modo de ruptura do ensaio de cisalhamento apresentou alta média de percentual de falha na linha de cola 76,50%. Portanto, a correlação entre o ensaio de delaminação neste painel foi notada somente com o ensaio de flexão e modo de ruptura do painel.

No painel CE4103 a ruptura no ensaio de flexão foi por descolamento da camada e o valor obtido para MOE foi o menor (4.801 MPa) de todos os grupos ensaiados. O valor de MOR de 12,72 MPa manteve-se na média dos demais grupos de painéis. O resultado observado de delaminação dos corpos de prova deste painel foram de 50% e 13,75%, ocorrendo descolamento total de uma das camadas, como mostra a figura 95.



Figura 95 Corpos de prova retirados do painel CE4103 ensaiados a delaminação. Fonte: Autor.

No modo de fratura dos ensaios de cisalhamento, verificou-se valores médios percentuais elevados de falha na linha de cola 83%, identificando desta forma a baixa eficiência da colagem no painel, fato que pode esclarecer o baixo valor de MOE do painel. Os corpos de prova do painel CE4113 (fig.96) foram os que apresentaram maior percentual de delaminação 53,75% e 56,26%, paralelamente este painel rompeu por descolamento de camada e apresentou média de falha na linha de cola nos ensaios de cisalhamento de 68,5%,

demonstrando a correlação entre os ensaios na análise da qualidade da colagem (fig. 97).



Figura 96 Corpos de prova retirados do painel CE4113 ensaiados a delaminação.
Fonte: Autor.

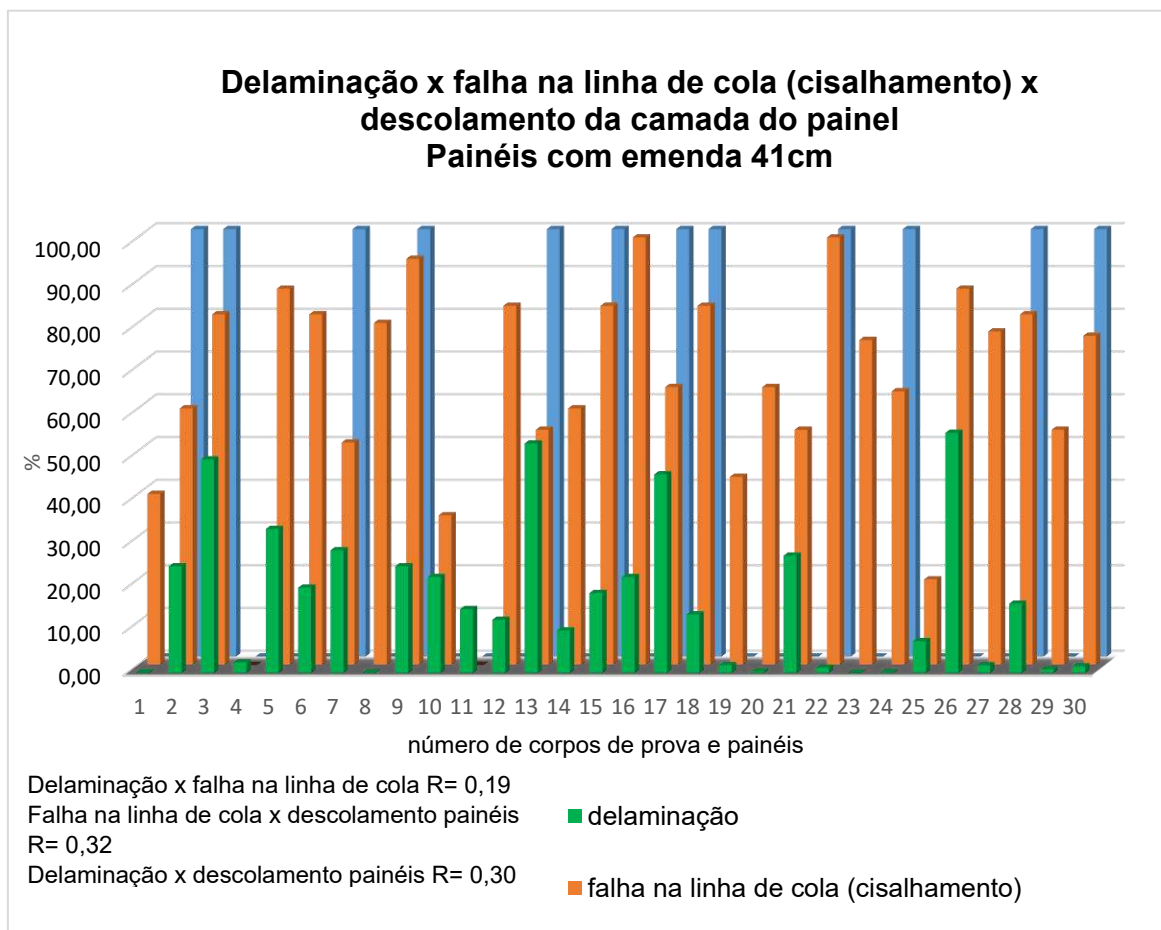


Figura 97. Análise da qualidade da colagem dos painéis com emenda e 41cm de largura. Fonte: Autor

Obsevando a figura 97, nota-se que nos painéis que ocorreram ruptura por descolamento da camada correlacionam-se positivamente com as proporções mais expressivas de delaminação e falha na linha de cola (modo de fratura do ensaio de cisalhamento). No entanto a correlação entre os resultados de delaminação e falha na linha e cola é menor (0,19).

5.4.2 Resultado dos ensaios de Delaminação dos corpos de prova dos painéis com emenda e 56 cm de largura.

Os resultados dos ensaios de delaminação dos corpos de prova provenientes dos painéis com emenda e 56 cm, foram os que apontaram menor média de delaminação total por grupo, 8,6%, com valores variando entre 0,06% a 37,5%. Entretanto, apesar do alto coeficiente de variação (131,86%), nota-se na figura 98, que somente 3 corpos de prova apresentaram valores mais expressivos de delaminação, nos demais predominaram valores percentuais menos elevados.

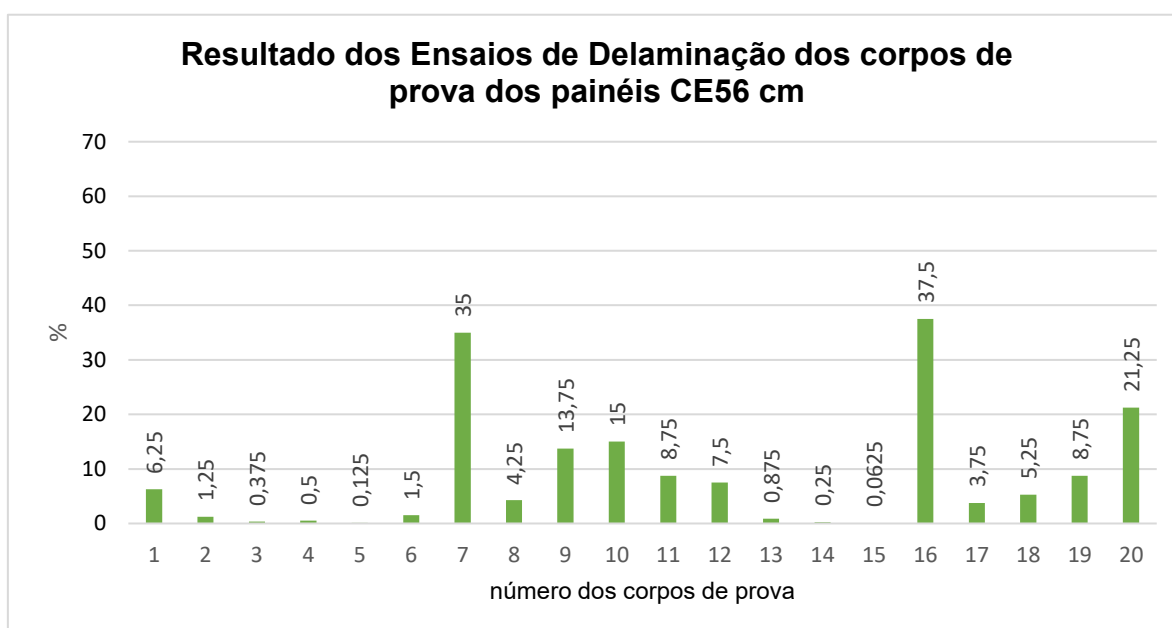


Figura 98 Gráfico com os resultados da delaminação dos corpos de prova dos painéis com emendas e 56 cm de largura. Fonte: Autor.

O painel CE5603 foi que apresentou o valor mais elevado de MOR do grupo dos painéis com emendas 48,64 MPa e MOE 16.089 MPa, nos ensaios de cisalhamento os corpos de prova apresentaram média de 17,5% de

falha na linha de cola. Nos ensaios de delaminação, os corpos de prova provientes deste painel obtiveram delaminação total abaixo de 1% (0,375% e 0,875%), como demonstra a figura 98, apontando uma correlação positiva entre os ensaios executados.

No entanto, como pode ser observado na figura 101, a correlação entre os resultados dos modos de fratura dos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento e a ruptura por descolamento dos painéis nos ensaios de flexão é maior (0,27) do que com os resultados dos ensaios de delaminação (0,15). Nota-se que, onde constatou-se descolamento de camada, os índices de falha na linha de cola (cisalhamento) são elevados, mas a proporção de delaminação não corresponde da mesma forma. A correlação entre os resultados dos ensaios de delaminação e as porcentagens de falha na linha de cola analisadas nos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento foi negativa (-0,48).

Um exemplo deste fenomeno pode ser visto nos resultados do painel CE5606, que apresenta ruptura por descolamento de camada, altos índices de falha na linha de cola no modo de fratura dos ensaios dos corpos de prova de cisalhamento, mas no entanto apresenta baixa porcentagem de delaminação total (1,5% e 7,5%) como mostra a figura 99.



Figura 99 Corpos de prova retirados do painel CE5603 e CE5606 ensaiados a delaminação.
Fonte: Autor.

No painel CE5609 foi observada ruptura na base da emenda e na madeira, com média de índices de falha na linha de cola no modo de fratura dos ensaios dos corpos de prova de cisalhamento de 27,5% e apresenta baixa porcentagem de delaminação total de (13,75% e 8,75%) com demonstra a figura 100, valores elevados se comparados com a média do grupo e inversamente proporcional aos resultados dos demais ensaios deste painel.



Figura 100 Corpos de prova retirados do painel CE5609 ensaiados a delaminação.
Fonte: Autor.

Na figura 101 é possível analisar esta comparação entre os resultados referente a qualidade da colagem dos painéis do grupo CE56.

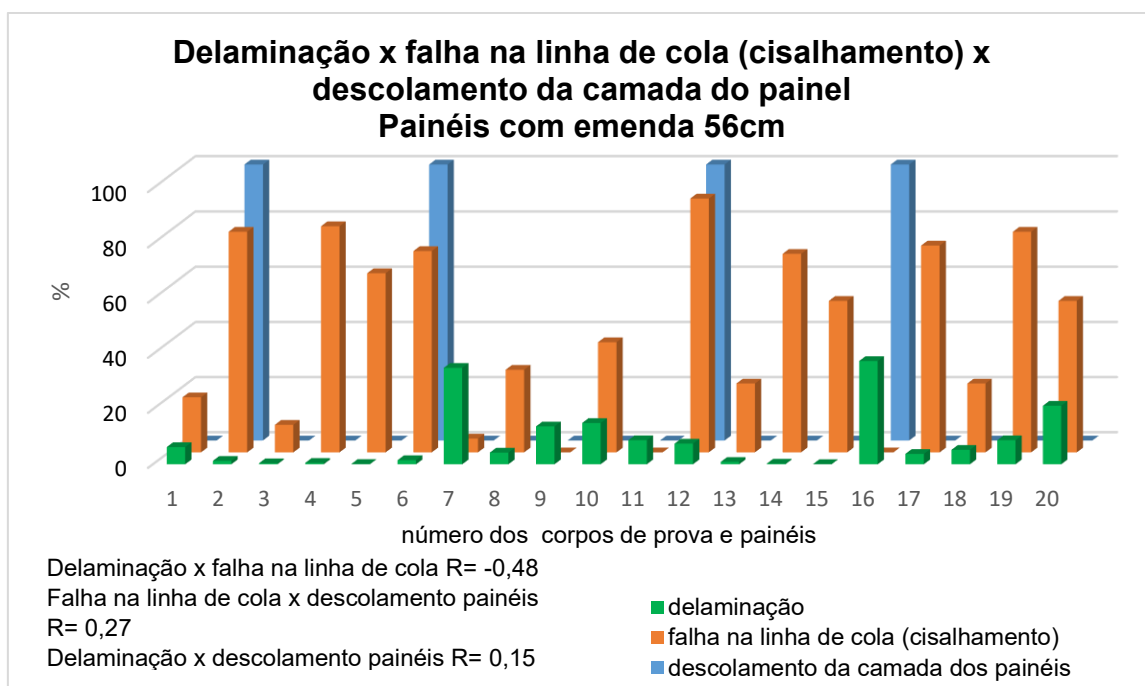


Figura 101. Análise da qualidade da colagem dos painéis com emenda e 56 cm de largura. Fonte: Autor

5.4.3 Resultados dos Ensaios de Delaminação dos corpos de prova dos painéis com emenda e 84 cm de largura

Nos ensaios de delaminação dos corpos de prova retirados dos painéis do grupo CE84 a média obtida dos resultados foi de 24,9%, o mais elevado entre todos os grupos ensaiados. Com coeficiente de variação em 91,44%, somente 5 corpos de prova apresentaram delaminação total inferior a 10%, como aponta a figura 102.

Outro aspecto relevante que percebe-se nos resultados dos ensaios de delaminação do grupo CE84 é a ocorrência de taxas elevadas de delaminação total em 42,5% dos corpos de prova.

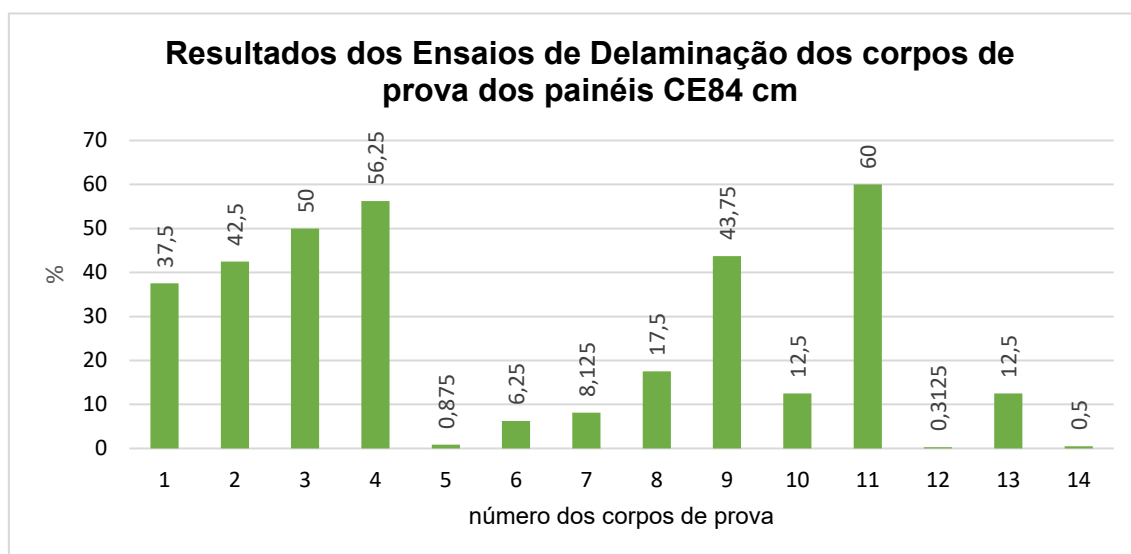


Figura 102 Gráfico com os resultados da delaminação dos corpos de prova dos painéis com emendas e 84 cm de largura. Fonte: Autor.

O painel CE8404 rompeu por descolamento de camada nos ensaios de flexão com o menor valor de MOR do grupo 13,04 MPa e com média de falha na linha de cola nos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento de 75%. Como pode ser observado na figura 103, a delaminação dos corpos de

prova derivados do painel CE8404 apresentaram as mais elevadas percentagens (56,25% e 60%), demonstrando a correlação entre os ensaios realizados neste painel.



Figura 103 Corpos de prova ensaiados a delaminação extraídos do grupo dos painéis sem emenda.
Fonte: Autor

Em contraponto o painel CE8405 que rompeu por ruptura na base da emenda e na madeira, apresentando valor elevado de MOR (32,97 MPa), nos ensaios de delaminação observaram-se percentagens inferiores a 1% (0,875% e 0,312%), no entanto em relação aos ensaios de cisalhamento a taxa média de falha na linha de cola foi de 45%.

A correlação observada entre os ensaios dos painéis deste grupo foi mais expressiva, principalmente entre os resultados de delaminação e da ruptura por descolamento da camada do painel (0,70) como mostra a figura 104.

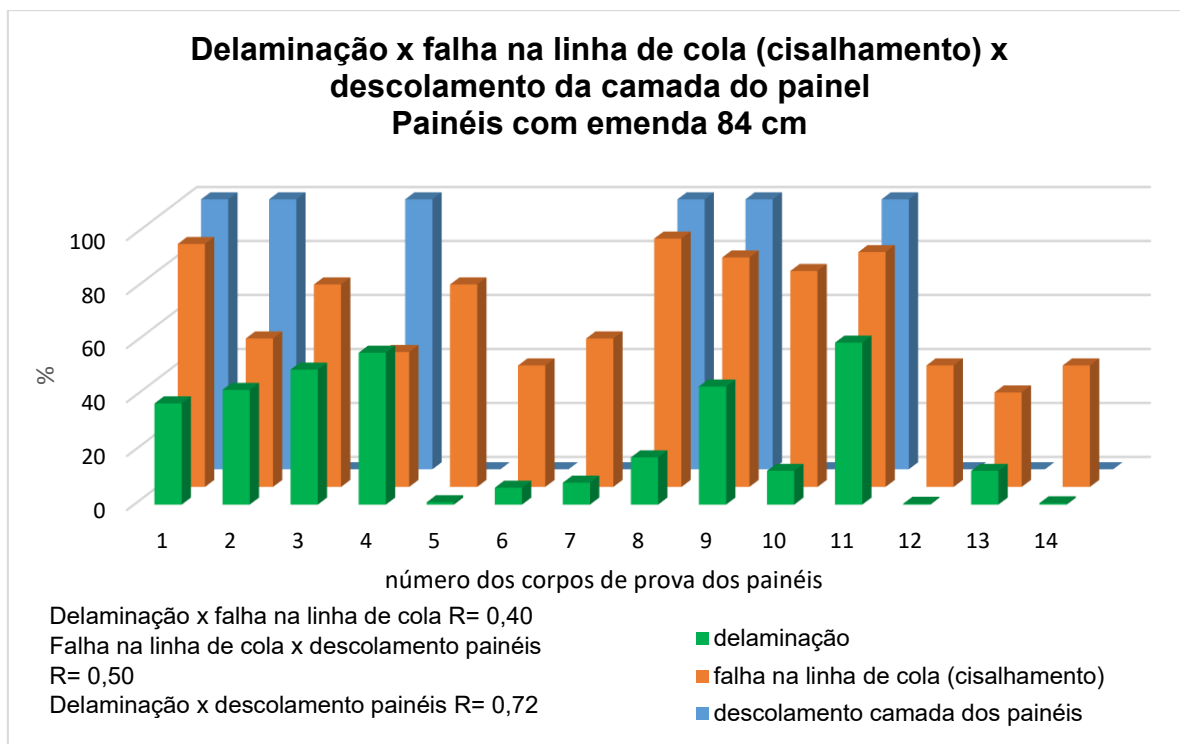


Figura 104 Análise da qualidade da colagem dos painéis com emenda e 840cm de largura. Fonte: Autor

5.4.4 Resultados dos Ensaios de Delaminação dos corpos de prova dos painéis sem emenda

Os resultados médios observados nos ensaios de delaminação total dos corpos de prova extraídos dos painéis sem emendas foram de 12,4%, com coeficiente de variação de 124,11% valores superiores aos observados no grupo dos painéis CE56 (fig. 105).

Na figura 105, nota-se que somente em duas amostras os valores de delaminação encontram-se abaixo de 1% de delaminação total, entretanto a correlação entre os ensaios de delaminação e os modos de ruptura dos painéis relacionados a colagem foi inversamente proporcional (-0,32).

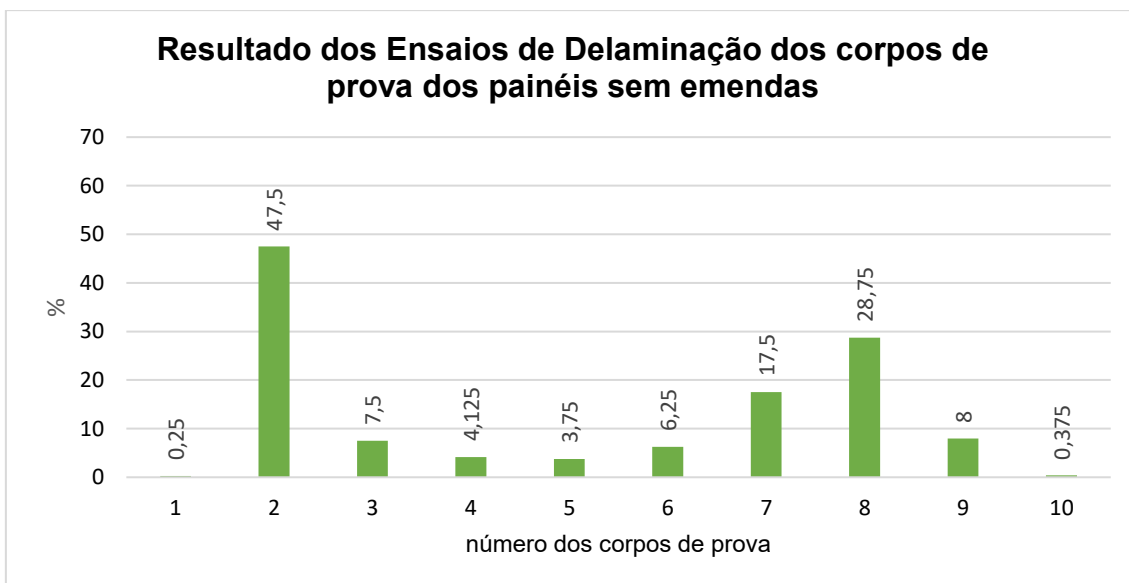


Figura 105 Gráfico com os resultados da delaminação dos corpos de prova dos painéis sem emendas. Fonte: Autor.

O painel sem emenda e com 84 cm de largura foi o único deste grupo que sofreu ruptura por descolamento de camada, apresentando valores de MOR de 39,11 MPa e MOE de 14.108 MPa, no entanto como pode ser observado na figura 105, a delaminação dos corpos de prova provenientes deste painel obtiveram a porcentagem de delaminação total de 0,37% e 3,75%. Neste painel pode ser observado porcentagem média de falha na linha de cola nos ensaios de cisalhamento de 16%, ou seja, houve correlação entre os resultados dos ensaios de delaminação com o modo de fratura do cisalhamento, no entanto ambos não se correlacionaram com o modo de ruptura do painel nos ensaios de flexão.

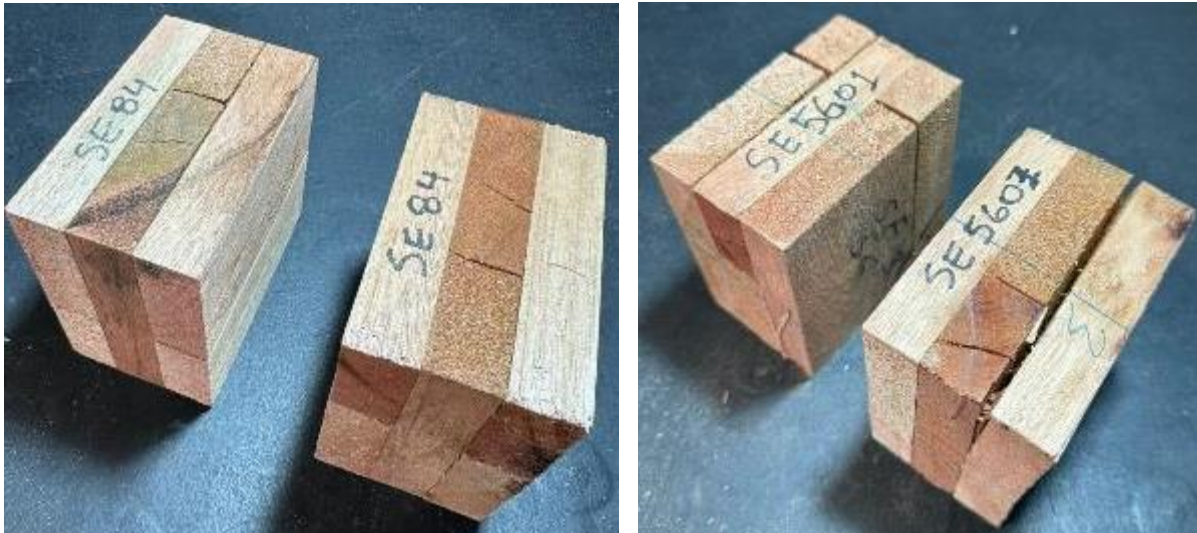


Figura 106. Corpos de prova ensaiados a delaminação extraídos do grupo dos painéis sem emenda. Fonte: Autor

Os corpos de prova provenientes dos painéis SE5601 (fig. 106) obtiveram índices de delaminação de 7,50% e 28,75%, valores significativos se comparados ao modo de ruptura do painel que ocorreu na madeira e nos nós com valor de MOR de 44,67 MPa e MOE de 14.485 MPa muito superiores a média dos demais painéis. A correlação positiva entre os ensaios deste painel aconteceu entre os resultados de delaminação e o índice médio de falha na linha de cola dos corpos de prova do ensaio de cisalhamento (27,5%), como demonstra a figura 107.

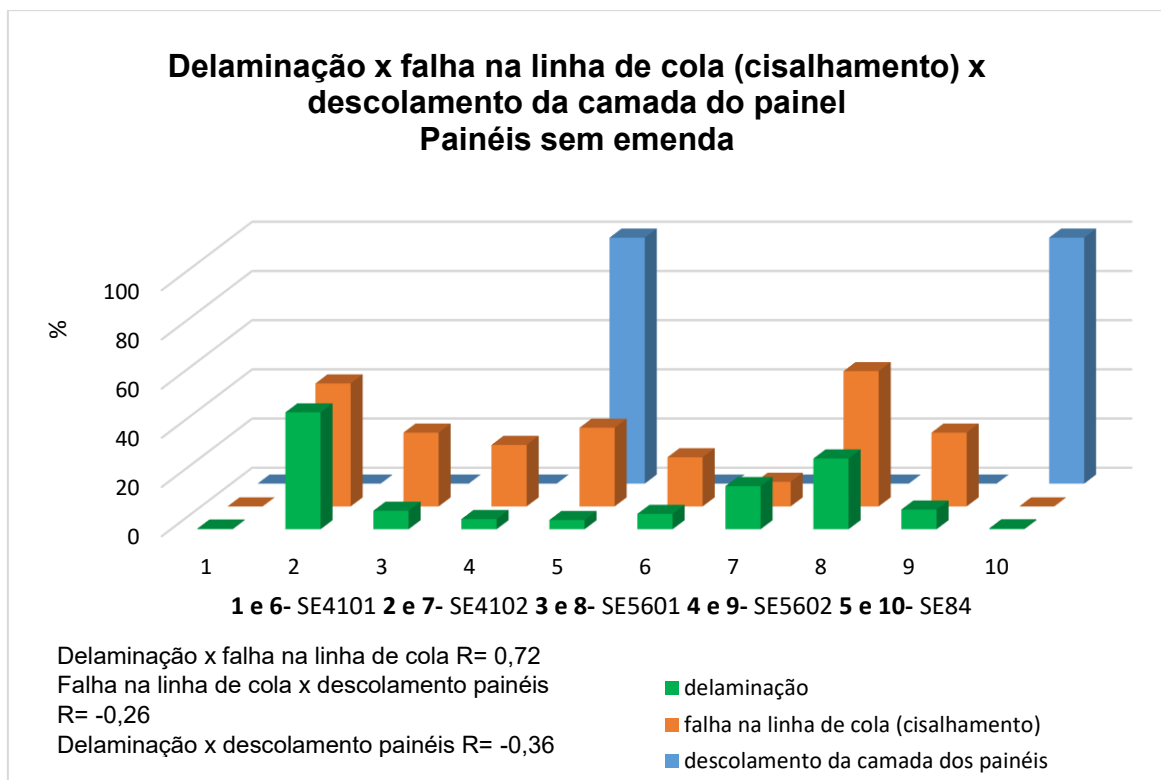


Figura 107 Análise da qualidade da colagem dos painéis sem emendas. Fonte: Autor

Na figura 108 é possível verificar a alta delaminação dos corpos de prova provenientes do painel sem emendas 4102 (47,5% e 17,5%), entretanto este painel foi o que apresentou os maiores valores de MOR (47,41 MPa) e MOE (20.803 MPa) entre todos os painéis ensaiados, rompendo na madeira e nos nós.

A correlação entre os resultados dos ensaios deste painel ocorre de forma positiva entre os resultados de delaminação e a média de porcentagem de falha na linha de cola (30%) dos ensaios de cisalhamento.



Figura 108 Corpos de prova ensaiados do painel SE4102 e ensaiados a delaminação.
Fonte: Autor

Como pode ser observado na figura 109, notou-se uma correlação maior entre os resultados do modo de fratura do ensaio de cisalhamento, especificamente a falha na linha de cola com os resultados de delaminação nos grupos CE41, CE84 e os sem emendas. Em contrapartida, no grupo CE56 pode-se perceber o oposto dos demais grupos, ocorrendo uma correlação positiva entre os resultados dos ensaios de cisalhamento e os resultados de delaminação.

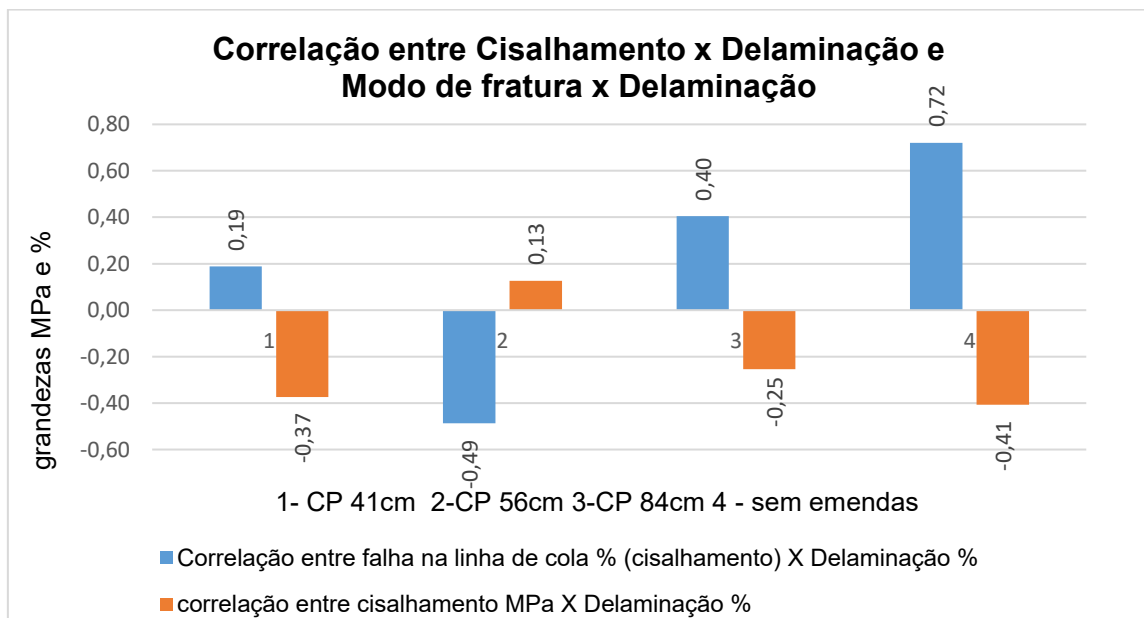


Figura 109 Gráfico da correlação entre os resultados dos ensaios de cisalhamento e delaminação e entre o modo de fratura de cisalhamento (falha na linha de cola) e a delaminação. Fonte: Autor.

5.5 COMPARATIVO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

Na figura 110 é possível analisar o panorama geral dos resultados dos ensaios realizados nos 37 painéis MLCC divididos em grupos com emendas e 41, 56 e 84cm e sem emendas.

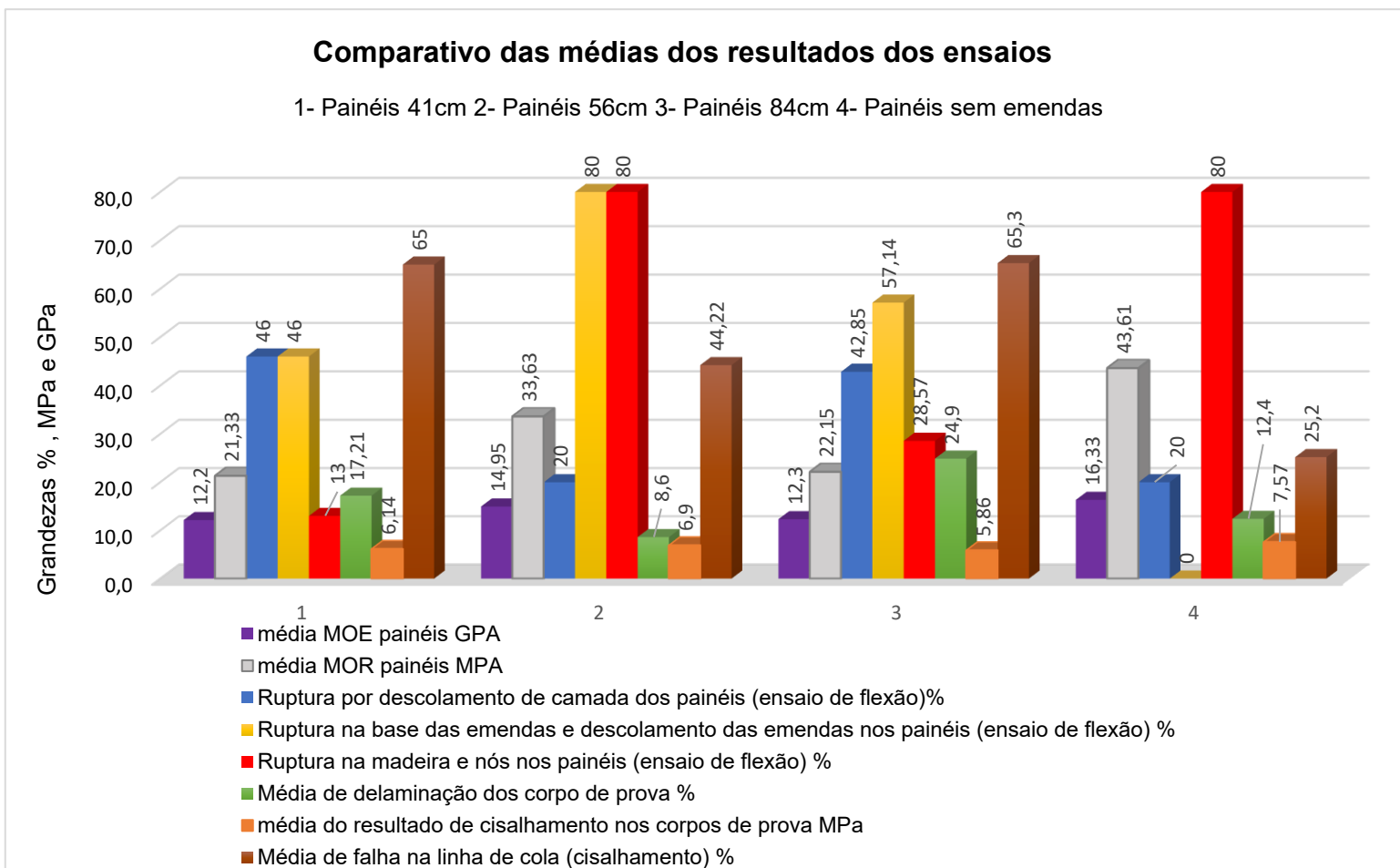


Figura 110 Comparativo entre as médias dos resultados dos ensaios dos painéis 1-CE41 2-CE56 3-CE84 4-SE. Fonte: Autor.

Pode-se notar relativa similaridade entre os resultados gerais do grupo com emendas dentadas e 56 cm (CE56) e os painéis sem emendas (SE), no entanto o grupo com emendas CE56 apresenta valores inferiores de MOR e MOE, sugerindo que as emendas dentadas reduziram as qualidades mecânicas dos painéis, como visto na revisão bibliográfica. Entre os painéis dos grupos com emendas CE41 e CE84 percebeu-se proximidade nas médias gerais dos resultados, apesar do grupo CE84 demonstrar maior média dos índices de depreciação na qualidade da colagem dos painéis, principalmente devido ao maior resultado de delaminação os corpos de prova, apresentou menor índice

de descolamento de camada nos painéis e maior porcentagem de ruptura na madeira e na base das emendas.

Nos resultados de médios de cisalhamento, não houve uma variação significativa entre os grupos dos painéis, no entanto os valores obtidos nestes ensaios acompanharam a proporção dos resultados dos módulos de ruptura dos painéis nos ensaios de flexão, com exceção do grupo CE84.

Em relação as emendas dentadas notou-se que na ocorrência de ruptura dos painéis por descolamento de camada, estas se mantiveram sem fraturas e descolamentos em maior proporção em comparação aos painéis que não indicaram este tipo de ruptura. Na figura 110, percebe-se que no grupo CE56 houve maior incidência de ruptura na base das emendas dentadas e na madeira, inversamente proporcional ao índice de descolamento das camadas.

Como pode ser observado nas figura 111 e 112 a análise da correlação entre os ensaios foi substancial para o entendimento geral da performance física e mecânica dos painéis.

Painel CE 4103

Ensaio de Flexão – Ruptura por descolamento

MOR 12,75 MPa

MOE 4.801 MPa



Cisalhamento

CP1 4,92 MPa

CP2 2,64 MPa

Modo de Fratura

18 % Fratura rasa 82% falha na linha de cola

16% Fratura rasa 84% falha na linha de cola

Delaminação

CP1 25%

CP2 0,25%



Delaminação total da camada



Descolamento

Figura 111 Correlação entre os ensaios do painel CE 4103. Fonte: Autor

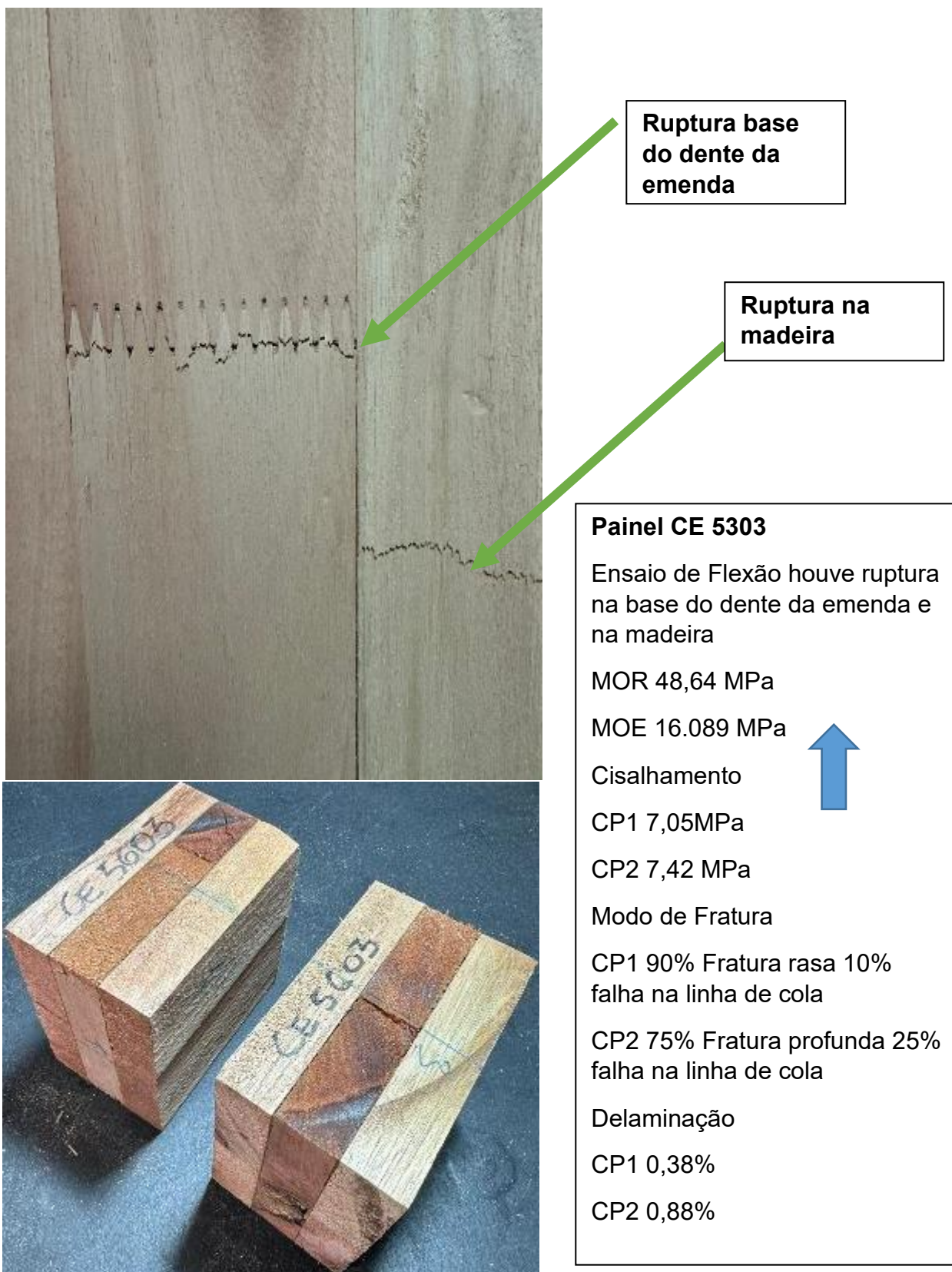


Figura 112 Correlação entre os ensaios do painel CE 5303. Fonte: Autor

De maneira geral, como pode-se observar na figura 113, os painéis MLCC com emendas mostram resultados médios inferiores em relação a qualidade da colagem e resistência em comparação aos painéis fabricados sem emendas.

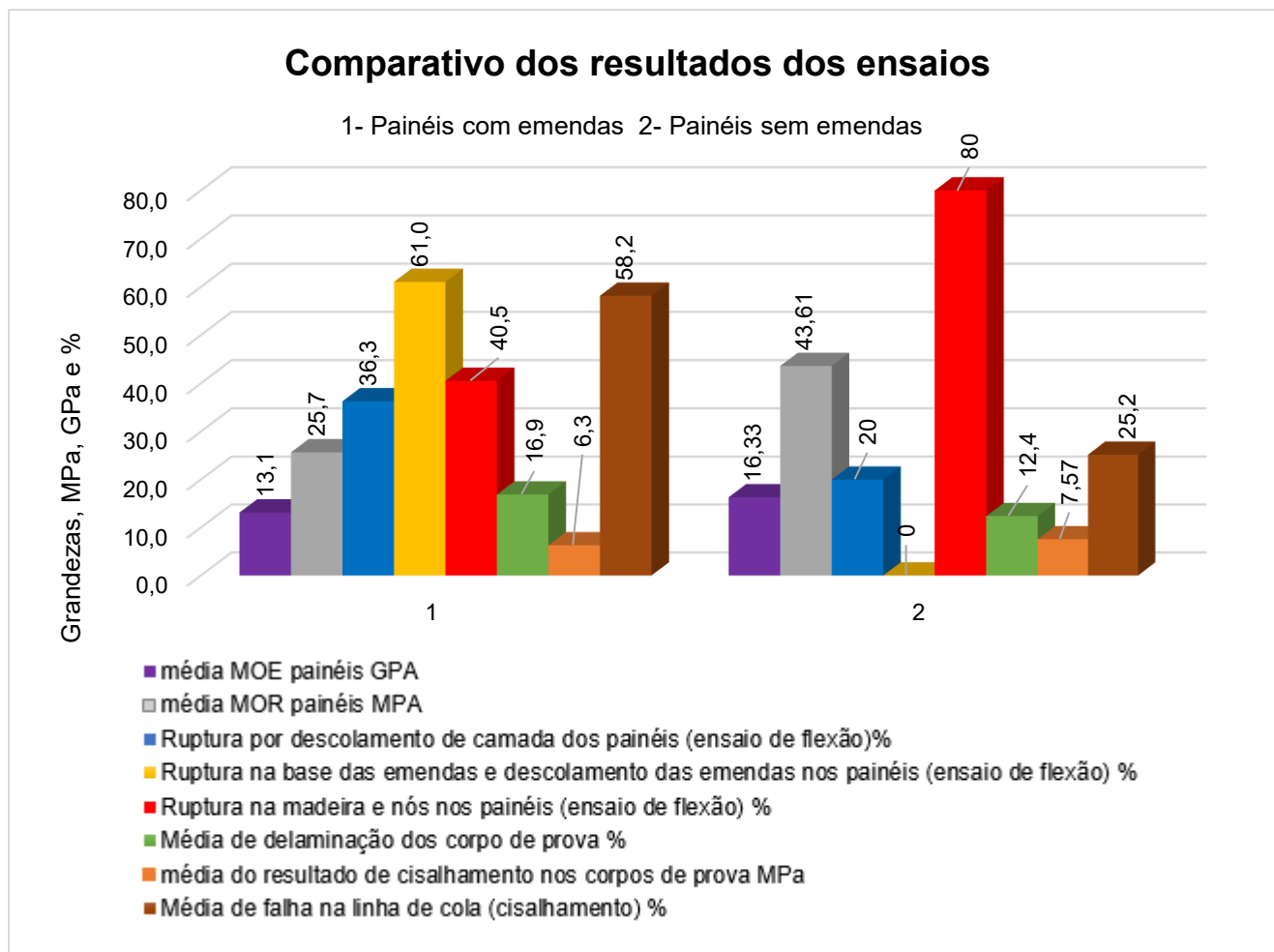


Figura 113 Comparativo dos resultados dos painéis MLCC com e sem emendas. Fonte: Autor

A média de falha na linha de cola ocorreu em 58,2% dos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento retirados dos painéis com emendas, já nos painéis sem emendas este índice foi de 25,2%, indicando uma qualidade de colagem superior. Em contrapartida, a ruptura por descolamento de camada dos painéis ocorreu em aproximadamente um terço dos painéis com emendas testados a flexão.

Entre os valores obtidos de MOE dos painéis MLCC com e sem emendas não houve uma discrepância demasiada, apontando resultado 20% superior para os painéis sem emendas (fig 113), principalmente pelo fato da

produção dos painéis MLCC, tanto os com e os sem emendas, contarem com a distribuição igualitária das lamelas de acordo com o grupo de MOE classificado anteriormente. No entanto em relação aos resultados de MOR os painéis MLCC sem emendas obtiveram resultados 41% superiores aos resultados dos painéis com emendas. Estes resultados corroboram a literatura FLAG *et. al* (2014) e VILELA (2020) que indicam a redução da resistência com a inclusão das emendas nos painéis.

6 CONCLUSÃO

Este estudo analisou as propriedades mecânicas de painéis de madeira lamelada colada cruzada (MLCC) fabricados com medula do eucalipto e emendas dentadas. A medula é considerada inapropriada para uso estrutural de acordo com a NBR 7190 (2022) devido a baixa qualidade estrutural, como demonstram os autores da revisão de literatura. Em estudo anterior de ALENCAR (2015) utilizando medula de eucalipto na composição de painéis MLCC foi possível observar valores superiores de módulo de elasticidade de ruptura que a norma ANSI/ APA PGR 320 (2019) prediz (10 MPa para MOR e 8.300 MPa para MOE), no entanto as tábuas não continham emendas dentadas, elemento que a revisão de literatura demonstra diminuir a resistência mecânica da estrutura.

Diante dos resultados obtidos nos ensaios de resistência e rigidez à flexão em 32 painéis com emendas e 5 sem emendas e dos ensaios de cisalhamento e delaminação em corpos de prova retirados destes painéis, de acordo com a NBR 7190 (2022) pode-se concluir que os painéis sem emenda obtiveram os valores médios mais expressivos de MOE (16.337,60 MPa) e MOR (43,61 MPa) de todos os grupos. Entre os grupos dos painéis com emenda, os mais significativos resultados foram encontrados no grupo de 56cm de largura, 14.953,30 MPa (MOE) e 33,63MPa (MOR). A média dos resultados dos grupos dos painéis com emendas foi de 13.146, 62 MPa para MOE e 25,70 MPa para MOR, estes valores são 36,86% e 61,08% superiores aos exigidos pela norma

ANSI/ APA PGR 320 (2019) para MOE e MOR respectivamente. Somente um painel (CE4103) não atingiu o valor mínimo de MOE (4.803 MPa).

Sobre a baixa eficiência da colagem dos painéis, suspeita-se que ocorreu devido a baixa absorção do adesivo, pois como pode ser observado na análise do modo de fratura do ensaio de cisalhamento, onde ocorreu altos índices de falha na linha de cola, era onde prevalecia o modo de ruptura por descolamento da camada nos ensaios de flexão dos painéis. Em contrapartida nos corpos de prova que ocorreram os maiores índices de fraturas profundas, foram derivados dos painéis com maiores valores de MOR e MOE.

Os ensaios de delaminação e cisalhamento foram essenciais para análise da qualidade da colagem dos painéis e o entendimento global da diferença entre os resultados obtidos nos ensaios.

Os resultados dos ensaios nos painéis MLCC fabricados com medula de eucalipto e emendas dentadas demonstraram que, esta matéria prima considerada defeito pelas normas e não recomendadas para uso estrutural, obteve desempenho superior aos requisitos mínimos exigidos. A inserção da emenda dentada, além de permitir a produção de painéis de maiores dimensões, aumentou significativamente o aproveitamento da madeira de medula, ao se comparar com o estudo anterior de ALENCAR (2015).

Embora sua capacidade estrutural tenha sido reduzida devido as emendas dentadas e deficiências observadas na colagem, as médias dos resultados dos painéis apresentaram níveis de confiabilidade 36,86% (MOE) e 61,08% (MOR) superiores aos exigidos pela norma ANSI/APA PRG (2019) para rigidez e resistência dos painéis MLCC.

Considerando o caráter residual atribuído à medula do eucalipto e os resultados obtidos nesta pesquisa quanto ao comportamento mecânico desse material em painéis estruturais MLCC, vislumbra-se a possibilidade de agregar valor a este produto, que atualmente é destinado a subprodutos ou descartado.

Como continuação da pesquisa, sugere-se:

- Estudar meios de incrementar a adsorção do adesivo pela madeira, afim de melhorar a qualidade da colagem;
- Inserção de outras espécies na composição dos painéis, por exemplo, o bambu;
- A interação da madeira de medula em painéis MLCC com as conexões e ligações (parafusos e cantoneiras);

7 REFERÊNCIA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D 198** - Standard Test Methods for Strength Properties of Adhesive Bonds in Shear by Compression Loading, Philadelphia. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, **NBR 7190 – Projeto de Estruturas de Madeira**, Rio de Janeiro, 2022, 107 p.

APA – THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. STANDARD FOR PERFORMANCE – Rated Cross-Laminated Timber, **ANSI/APA PRG 320**. Tacoma, Washington, USA. 2019.

ALENCAR, J. B. M.; **Sistema Construtivo em Madeira Laminada Colada Cruzada ou Cross Laminated Timber (Clt): Análise da Viabilidade Técnica da Madeira com Baixo Valor Agregado**. Dissertação Programa Associado de Pós-graduação em Metodologia de Projeto de Arquitetura e Urbanismo UEL / UEM. 2015.

ALENCAR, J. B. M.; MOURA, J. D. M.; **Mechanical Behavior of Cross Laminated Timber Panels Made of Low-Added-Value Timber**. Forest Products Journal Vol. 69, No. 3/4. 2019.

AZAMBUJA, M.; **Estudo experimental de adesivos para fabricação de madeira laminada colada: avaliação da resistência de emendas dentadas, da durabilidade e de vigas**. Tese. Escola de Engenharia de São Carlos- USP. 2006.

AZAMBUJA, R. R.; DEVALANCE, D. B.; McNELL, J.; DAHLE, G.A.; **Cross-Laminated Timber Panels Produced from Low-Grade Yellow Poplar Sorted by Structural Visual Grade**. Março 2023. Forest Products Society 73(2):104–112. [doi:10.13073/FPJ-D-22-00074](https://doi.org/10.13073/FPJ-D-22-00074)

BIANCHE, J.J., TEIXEIRA, A.P.M., LADEIRA, J.P.S., **Cisalhamento na linha de cola de Eucalyptus sp. colado com diferentes adesivos e diferentes gramaturas**, Floresta e Ambiente, v. 24, pp. 00077114. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.077114>. 2017

BOCANEGRA, A. J. L.; MAJANO, M.A.; CRESPO, J.; GUAITA, M.; **Finger-jointed Eucalyptus globulus with 1C-PUR adhesive for high performance engineered laminated products**. Janeiro 2017. Construction and Building Materials. ELSEVIER.

BOURSCHEID, C. B., TEREZO, R. F., STÜPP, A. M., VANZELLA, D. A., Desempenho Mecânico de Madeira Laminada Colada de *Eucalyptus Spp.* II

Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira Belo Horizonte, 2015. **Anais.**

BOSCHETTI, VIDAURRE, G. B., SILVA, J. B. M.; **Densidade e sua variação na madeira de eucalipto**, Revista EDUFES, Capítulo 5; Vitória – E.S. 2020.

CANDIAN, M. **Estudo da Classificação Não-Destrutiva de Peças Serradas de Espécies Cultivadas no Brasil para uso em Estruturas**. 2007. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

CARREIRA, M. R.; DIAS, A. A. **Classificação visual de coníferas: análise da aplicação do método norte-americano às espécies de *Pinus sp* plantadas no Brasil**. Scientia Forestalis n. 67, p. 78-87, abr. 2005

CAVALVANTE, A. K. L.; **Manufatura experimental e avaliação das propriedades de painéis CLT de alta densidade**. Dissertação. USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Piracicaba- SP. 2022.

CAVALHEIRO, R. S., **Aplicação de diferentes técnicas de microscopia para análises da região adesiva em Madeira lamelada colada (MLC)**. Tese. Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo – São Carlos – SP. 2018.

CHERRY, R.; MANALO, A.; KARUNASENA, W.; STRINGER, G.; **Out-of-grade saw pine: A state-of-the-art review on challenger and new opportunities in cross laminated timber (CLT)**. Dezembro 2018. Construction and Building Materials. ELSEVIER.

CHERRY, R.; MANALO, A.; KARUNASENA, W.; STRINGER, G.; Maximizing the Use of Out-of-Grade Hybrid Pine in Engineered Wood Products: Bond Performance, the Effect of Resin Streaking, Knots, and Pith. Setembro 2023. Forest <https://doi.org/10.3390/f14091916>

CONCU, G.; DE NICOLO, B.; VALDÉS, M.; FRAGIOCOMO, M.; MENIS, A.; TRULLI, N. **Experimental Grading of Locally Grown Timber to be used as Structural Material**. Revista Advances in Civil Engineering and Building Material, Londres, 2013.

DIN 68 140. **Finger joints in wood. Part 1: Finger-jointed structural timber**. Deutsch's Institut für Normung (the German Institute for Standardization), Berlin, Germany. (Keilzinkenverbindung von Holz). Berlin, Alemanha. 1971.

DUGMORE, M.; NOCETTI, M.; BRUNETTI, M.; NAGHIZADEH, Z.; WESSELS, B.; Bonding quality of cross-laminated timber: Evaluation of test methods on *Eucalyptus grandis* panels. Março 2019. Construction and Building Materials, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.240>

FARIA, D. L., MENDES, L. M., GUIMARÃES JÚNIOR, J. B. **Estudo do comportamento mecânico de madeira laminada colada de Hevea brasiliensis produzida com adesivo poliuretano.** 2020. Scientia Forestalis, 48(126), e3231. <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n126.11>

FLAIG, M.; BLAD, H. J. Bending Strength of Cross Laminated Timber Beams Loaded in Plane. 2014. World Conference on Timber Engineer, Quebec-City, Canada, **Anais.**

FPINNOVATIONS. **CLT Handbook : Cross laminated timber.** FPInnovations Canadá. 2019.

GUTIERREZ, M., ETTELAEI, A., KOTLAREWSKI, N., LEE, M., **Structural Properties of Commercial Australian Plantation Hardwood CLT,** Buildings v13, 208. <https://doi.org/10.3390/buildings13010208> 2023.

HENRY, S., WOOD, A. **Tall Buildings + Urban Habitat, Volume 2.** Chicago: Council on Tall Buildings and Urban Habitat (2019) ISBN: 978-0-939493-67-8

IWAKIRI, S., TRIANOSKI, R., ZUNTA, R. R., PEREIRA, G. F., ROSA, T. S. **Avaliação dos efeitos do adesivo, gramatura e pressão na qualidade de painéis EGP de Eucalyptus badjensis.** Scientia Forestalis. 2021. 49(129), e3437. <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n129.20> .

JUNIOR, L. S., MELO, R. R., CASTRO, G.V., SOUZA, M.J.C., BATISTA, F.G., **Qualidade da madeira juvenil de um híbrido clonal (Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla – H13)** Advances in Forestry Science, Cuiabá, v.6, n.1, p.523-527, 2019

LIAO, Y; TU, D.; ZHOU, J.; YUN, H.; GU, J.; HU, C.; **Feasibility of manufacturing cross laminated timber using fast-grow small diameter eucalyptus lumbers.** Novembro 2017. Construction and building Materials. ELSEVIER.

LOBÃO, M. S.; GOMES, A. **Qualidade da Adesão de Madeira de Eucalipto em corpos-de-prova colados em dois diferentes Planos de Densidades,** 2006, Cerne, Lavras, v. 12, n.2, P. 194-200, abr./jun. 2006

LU, Z.; ZHOU, H.; LIAO, Y.; HU, C.; **Effects of surface treatment and adhesives on bond performance and mechanical properties of cross laminated timber (CLT) made from small diameter Eucalyptus timber.** Agosto 2017. Construction and building Materials. ELSEVIER <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.027>

MACEDO, A. N.; **Estudo de Emendas Dentadas em Madeira Laminada Colada (MLC): Avaliação de Método de Ensaio**. Dissertação. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo- USP. 1996

MEETHAWORN, B., SRIVARO, S., **Structural Performance Evaluation of Finger-Jointed Rubberwood Manufactured by Factories in Thailand** BioResources V12 n4 pg. 9420-9426, 2017.

MOURA, J. D. M.; PLETZ, E.; STRASS, M. C. **Panorama Geral e Perspectivas Preliminares de Continuidade dos Trabalhos em Relação às Visitas Técnicas Realizadas a Indústria do Setor Madeireiro do Parque Industrial de Telêmaco Borba a Convite da Secretaria Municipal do Trabalho e Indústria Convencional**. 2012, Universidade Estadual de Londrina, Relatório Interno.

YOSOF, N.; TAHIR, P.; LEE, S.; KHAN, M; JAMES, R.; **Mechanical and physical properties of Cross Laminated Timber made from Acacia mangium wood as function of adhesive types** 2019. Journal of wood Science. <https://doi.org/10.1186/s10086-019-1799-z>

YUSOH, A. S.; TAHIR, P. M.; UYUP, M. K. A.; LEE, S. H.; HUSAIN, H.; KHAIDZIR, M. O.; **Effect of wood species, clamping pressure and glue spread rate on the bonding properties of cross-laminated timber (CLT) manufactured from tropical hardwoods**. Dezembro 2020. Construction and Building Materials. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121721>

KOMATSU, K.; NAKATANI, M.; NAKAHARA, T.; KENJI KOMATSU, K.; NODA, Y.; **Mechanical performances of finger jointed cross laminated timber (CLT)**. Janeiro 2021. European Journal of Wood and Wood Products. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01645-3>

PANG, S.; SHIM, K.; KIM, K.; **Efects of knot area ratio on the bending properties of cross-laminated timber made from Korean pine**. Dezembro 2020. Wood Science and Technology. <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01255-5>

PEREIRA, M.; CALIL, C.; ICIMOTO, F.H., JUNIOR, C.C., **Evaluation of Tensile Strength of a Eucalyptus grandis and Eucalyptus urophylla Hybrid in Wood Beams Bonded Together by Means of Finger Joints and Polyurethane-Based Glue** .Materials Research.; 19(6): 1270-1275 2016.

VILELA, R.; **Desempenho Estrutural de Placas de Cross Laminated Timber Submetidas a Flexão**. Dissertação. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. UNICAMP. 2020.

VITAL, R.B.; MACIEL, A.S.; LUCIA, R.M.D; **Qualidade de Juntas coladas com Lâminas de Madeira oriundas de três regiões do tronco de Eucalyptus**

grandis, Eucalyptus saligna e Pinus eliottii, 2006, Revista Árvore, Viçosa-MG, v.30, n.4, p. 637-644.

ROSA, T. O., VIEIRA, C. H., TEREZO, R. F., CUNHA, A. B., SAMPAIO, C. A. P. S., ZANGAL, C., ROSA, G. O., WALTRICK, D. B., **Classificação visual e mecânica da espécie *Cryptomeria japonica* D. Don para utilização em madeira laminada colada**. Revista Ciência Florestal, Santa Maria, v. 30, n. 2, p. 451-462, abr./jun. 2020 ISSN 1980-5098 DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509837084>

SEGUNDINHO, P.; SILVA, A. C., GONÇALVES, G. F.; REGAZZI, A. J.; **Caracterização da madeira laminada colada de Eucalyptus sp. produzida com adesivos resorcinol-fenol-formaldeído e poliuretano**. Revista Ciência da Madeira (*Brazilian Journal of Wood Science*) DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v9n2p123-133. 2018.

SERRANO, L. J. P.; **Resistência à tração da madeira e resistência ao cisalhamento no plano de cola, seus impactos na geometria do dente e propriedades mecânicas de emendas dentadas**. Dissertação. Tecnologia em Produtos Florestais. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. 2009.

SILVA, M. L. J.S., LOBO, M. V. F., CUNHA, R. D. A., CÉSAR, S. C., **Viabilidade do uso de madeira clonal de Eucalyptus urophylla de rápido crescimento para produção de madeira lamelada colada (MLC) com adesivo poliuretano à base de mamona** Revista Matéria v28 n2. DOI: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0073>. 2023.

SIKORA, K. S.; MCPOLIN, D. O.; HARTE, A. M.; **Effects of the thickness of cross-laminated timber (CLT) panels made from Irish Sitka spruce on mechanical performance in bending and shear**. Maio 2016. Construction and Building Materials <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.145>

SIKORA, K. S.; MCPOLIN, D. O.; HARTE, A. M. **Shear Strength, and Durability Testing of Adhesive Bonds in Cross-Laminated Timber**. 2016. Journal of Adhesion, 92(7-9), 758-777. <https://doi.org/10.1080/00218464.2015.1094391>

SHUKLA, S., GUPTA, S., KHALI, D. P., KUMAR, K., **Finger jointing of Eucalyptus hybrid using two common adhesives**, International Journal of Development Research Vol. 10, Issue, 03, pp. 34904-34909, March 2020

SOARES, B. C. D., **Nanoendentações na parede celular: Relações entre propriedades nano mecânicas e o fendilhamento na madeira de Eucalyptus grandis**. Tese - Universidade Federal de Lavras, 2019.

STUPP, M. A.; **Avaliação do Desempenho de Emendas por Entalhes Múltiplos para Estruturas em Madeira Laminada Colada.** Dissertação. Faculdade de Engenharia Florestal. Universidade do Estado de Santa Catarina. 2016.

SOARES, B.C.D., **Nano endentações Na Parede Celular: Relações Entre Propriedades Nanomecânicas E O Fendilhamento Na Madeira De Eucalyptus Grandis,** Tese, Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, Lavras – MG. 2019.

USDA - **United States Department of Agriculture - Wood Handbook.** Forest Products Laboratory. Madison, Wisconsin 2010.

WANG, Z.; FU, H.; CHUI, Y.; GONG, M. Feasibility of Using Poplar as Cross Layer to Fabricate Cross-Laminated Timber. 2014. World Conference on Timber Engineer, Quebec-City, Canada, **Anais.**

WANG, Z.; DONG, W.; WANG, Z.; **Effect of Macro Characteristics on Rolling Shear Properties of Fast-Growing Poplar Wood Laminations.** 2018. Wood Research 63 (vol 2): 227-238.

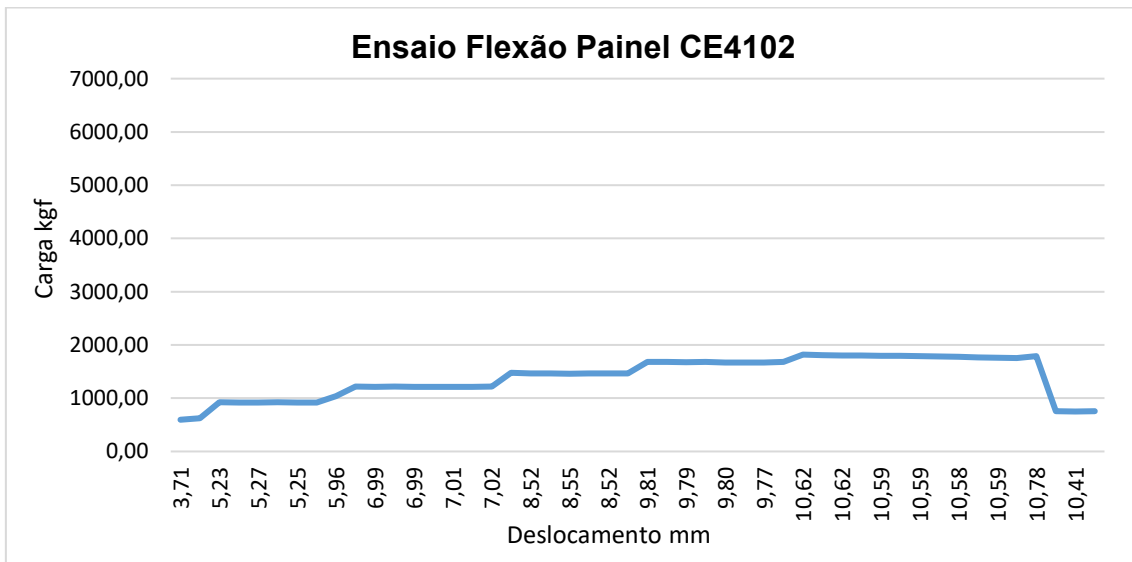
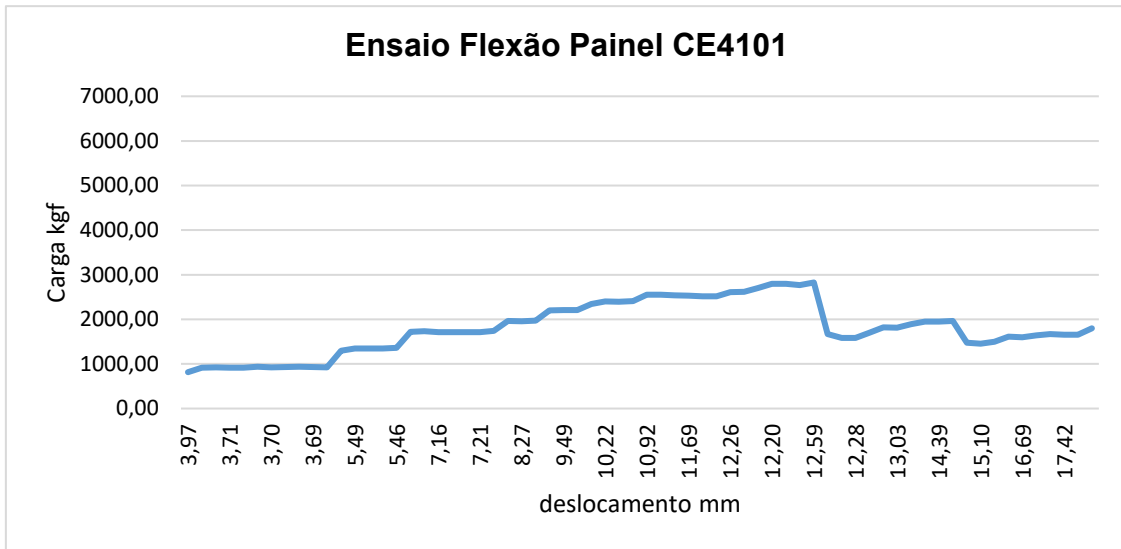
WIESNER, F.; THOMSON, D; BISBY, L. **The effect of adhesive type and ply number on the compressive strength retention of CLT at elevated temperatures.** Setembro-2020. Construction and building Materials. ELSEVIER <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121156>

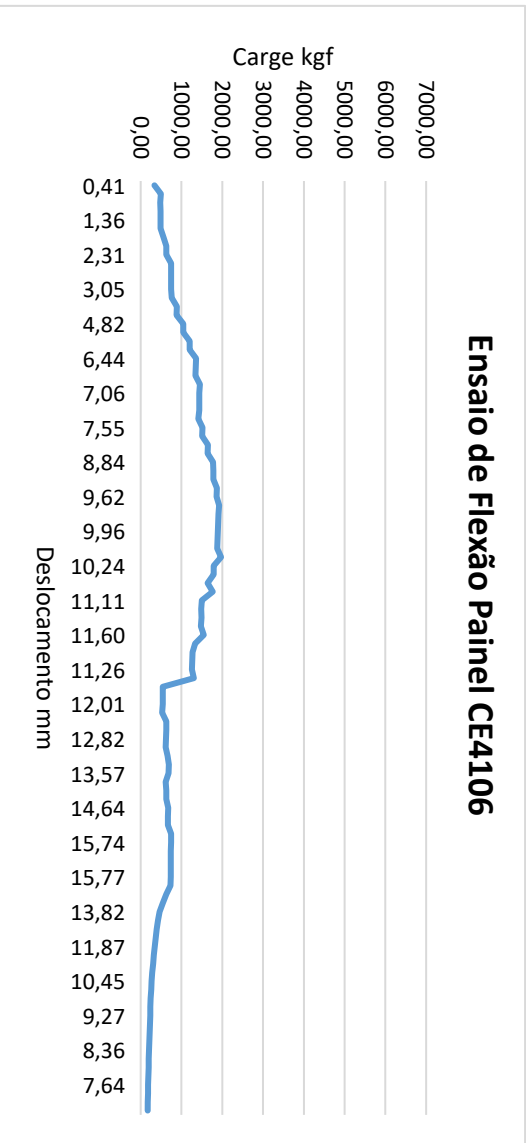
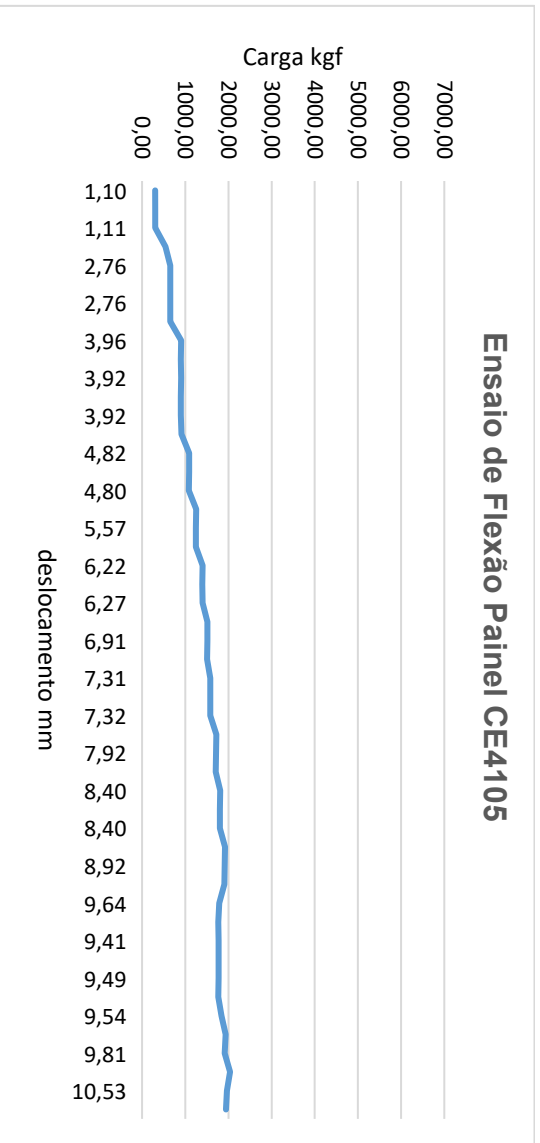
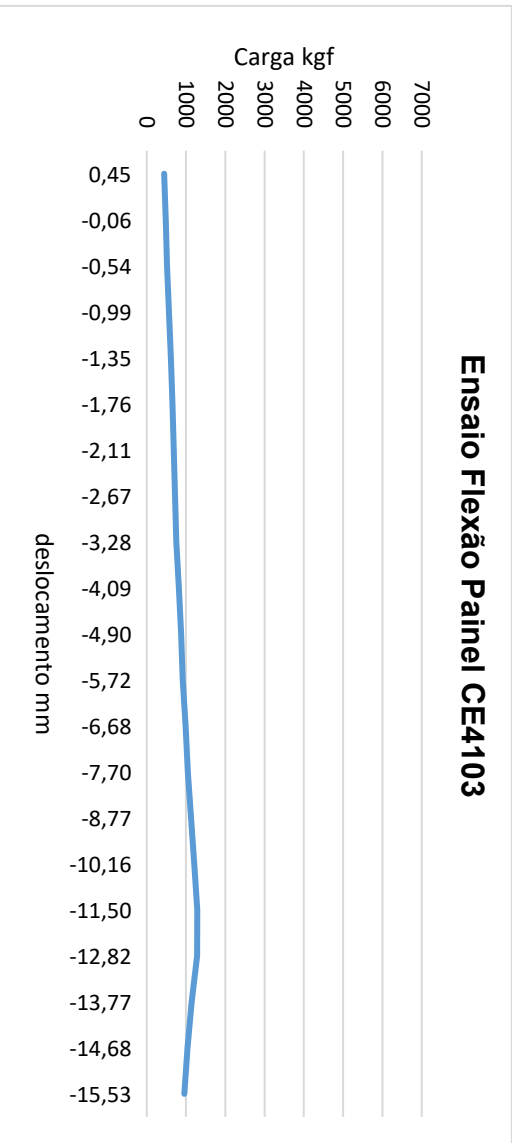
ZHOU, J.; CHUI, Y. Efficient Measurement of Elastic Constants of Cross Laminated Timber using Modal Testing. 2014. World Conference on Timber Engineer, Quebec-City, Canadá, **Anais.**

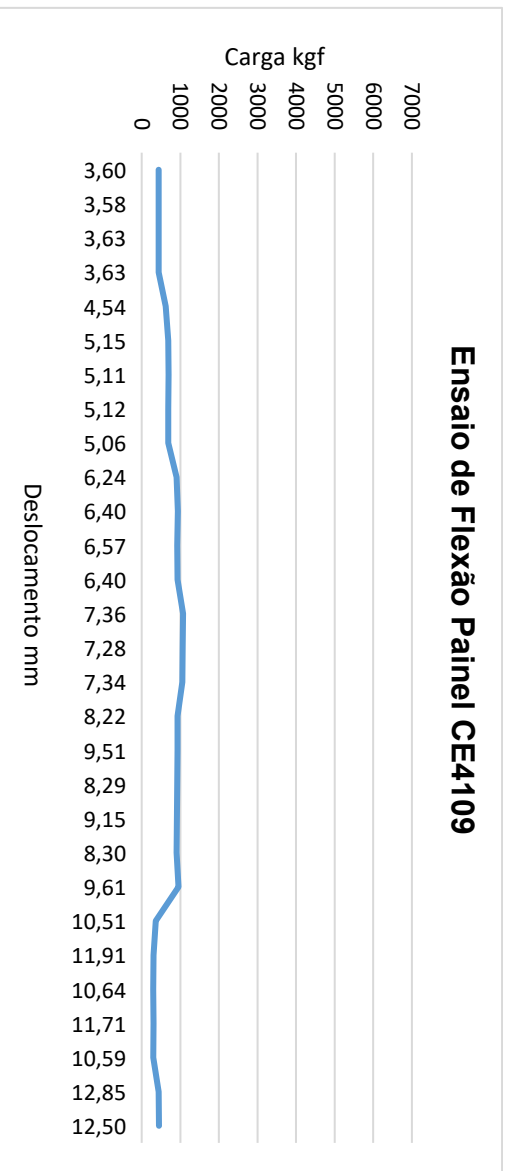
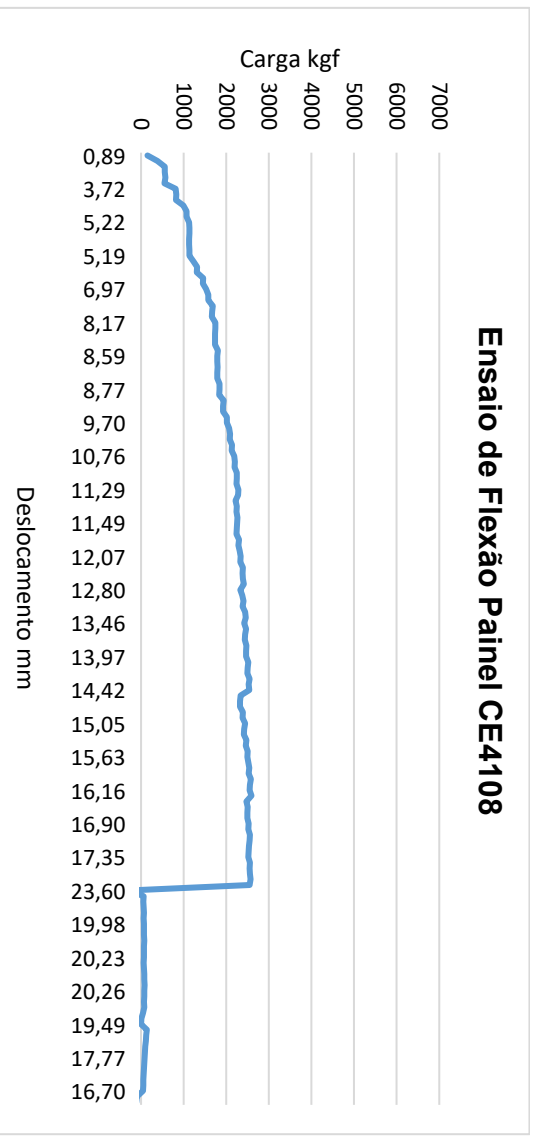
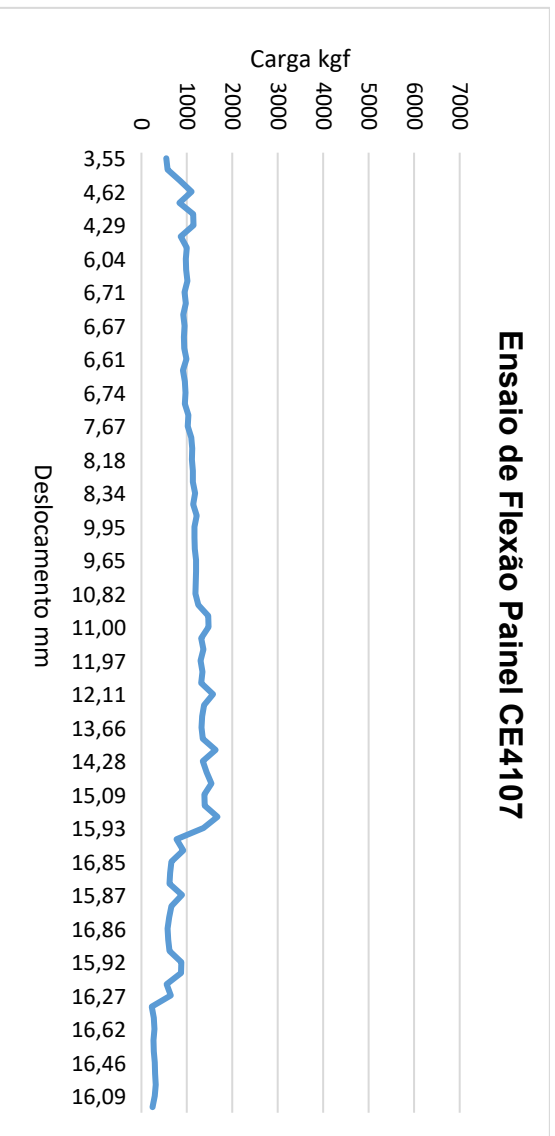
8 ANEXOS

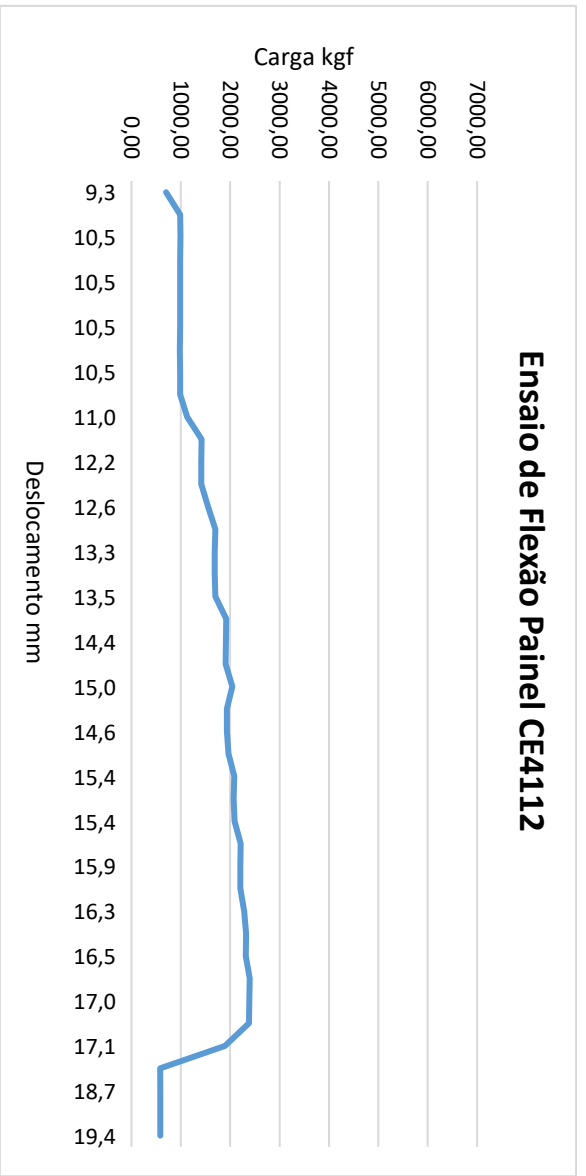
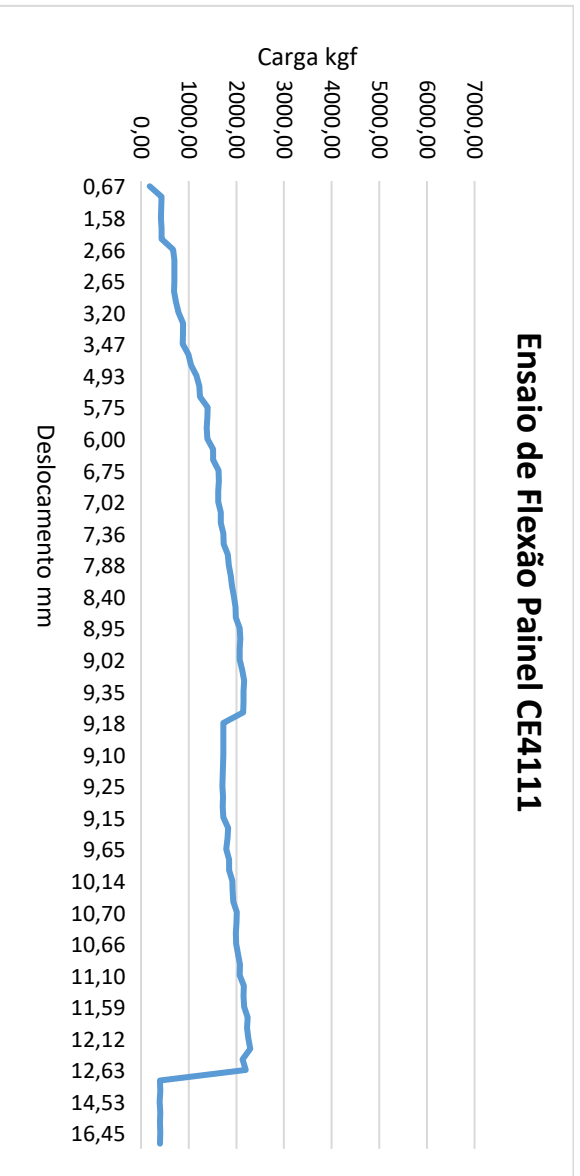
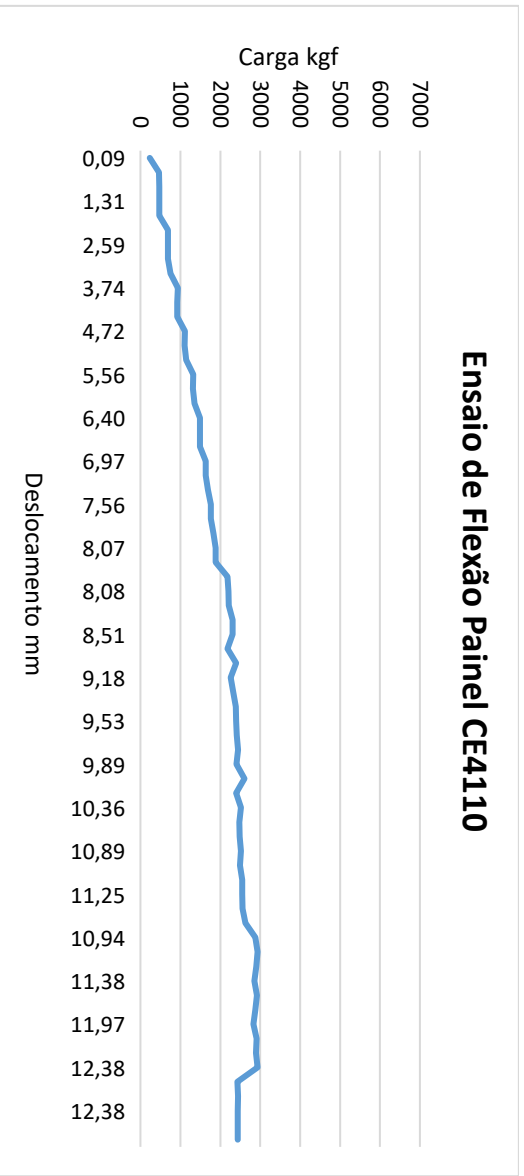
Os gráficos dos painéis demonstram somente o último ciclo de carga dos ensaios de flexão conforme a NBR 7190 (2022).

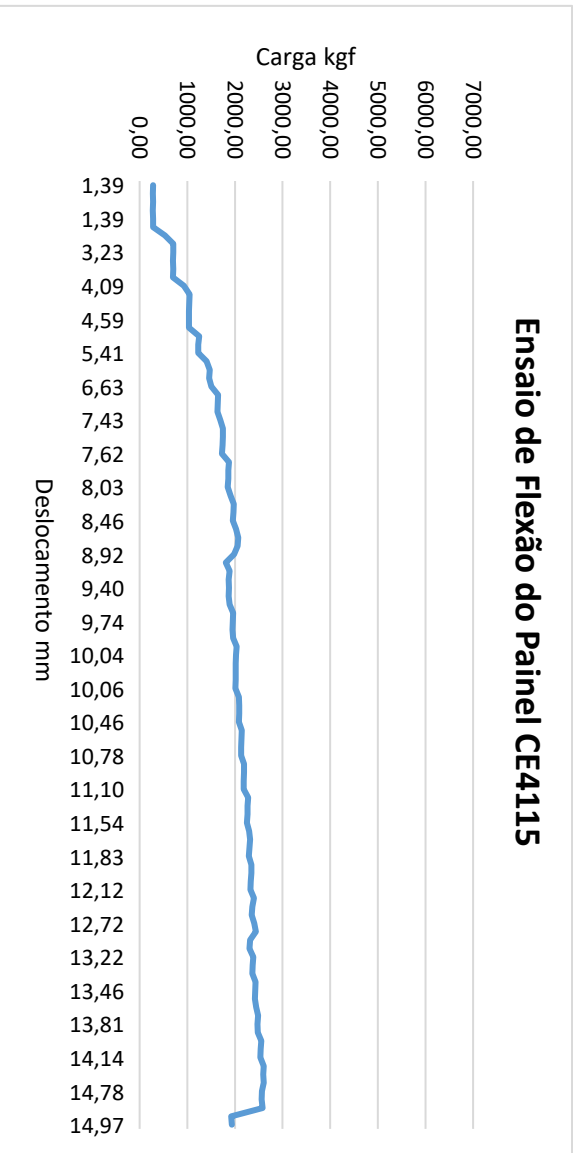
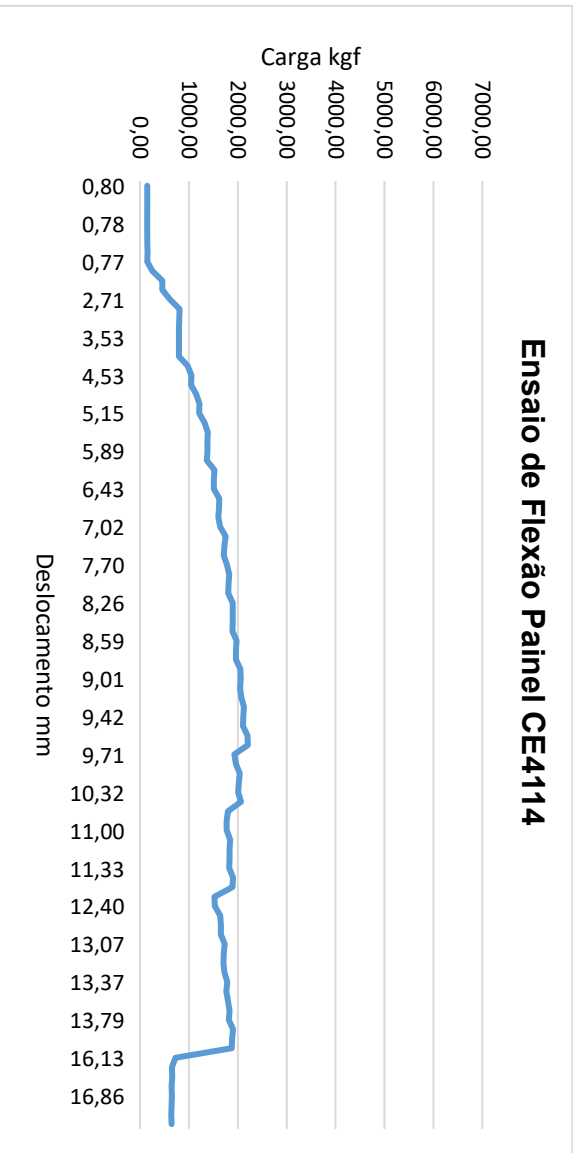
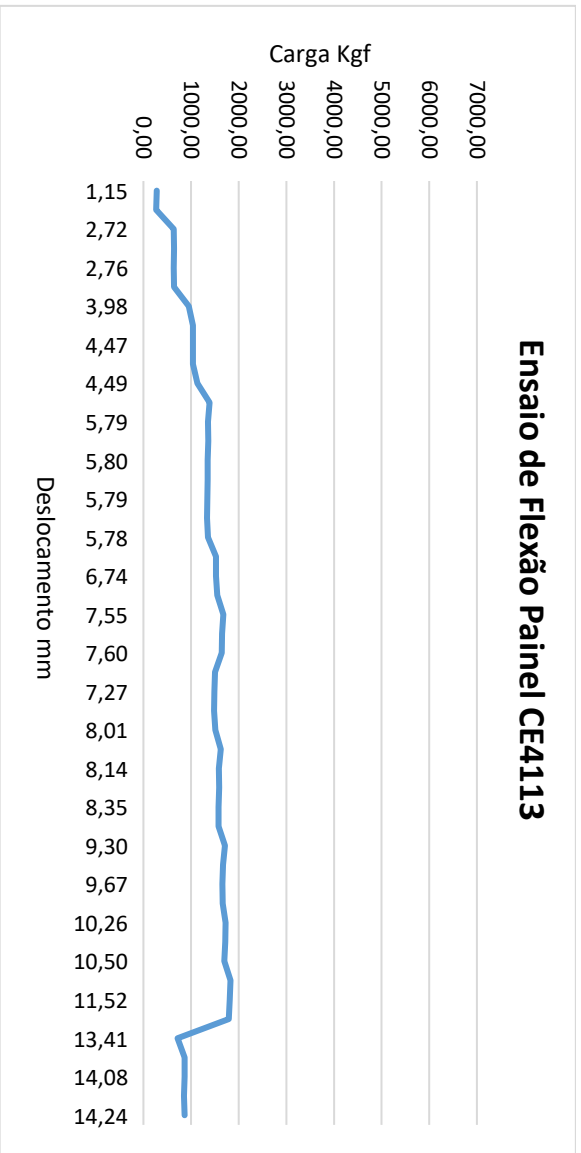
PAINÉIS COM EMENDAS E LARGURA 41CM





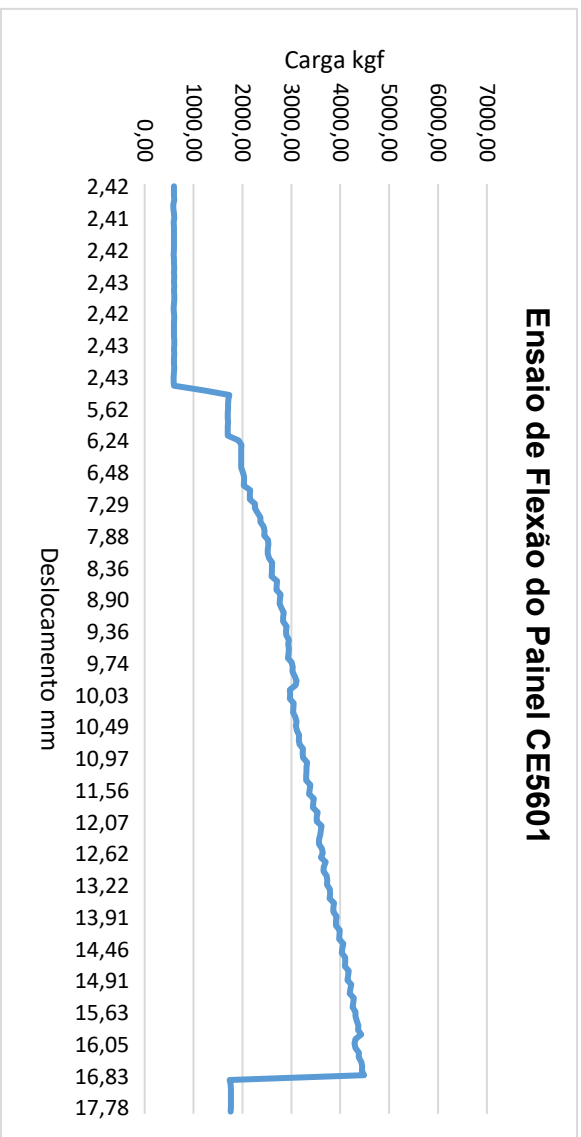




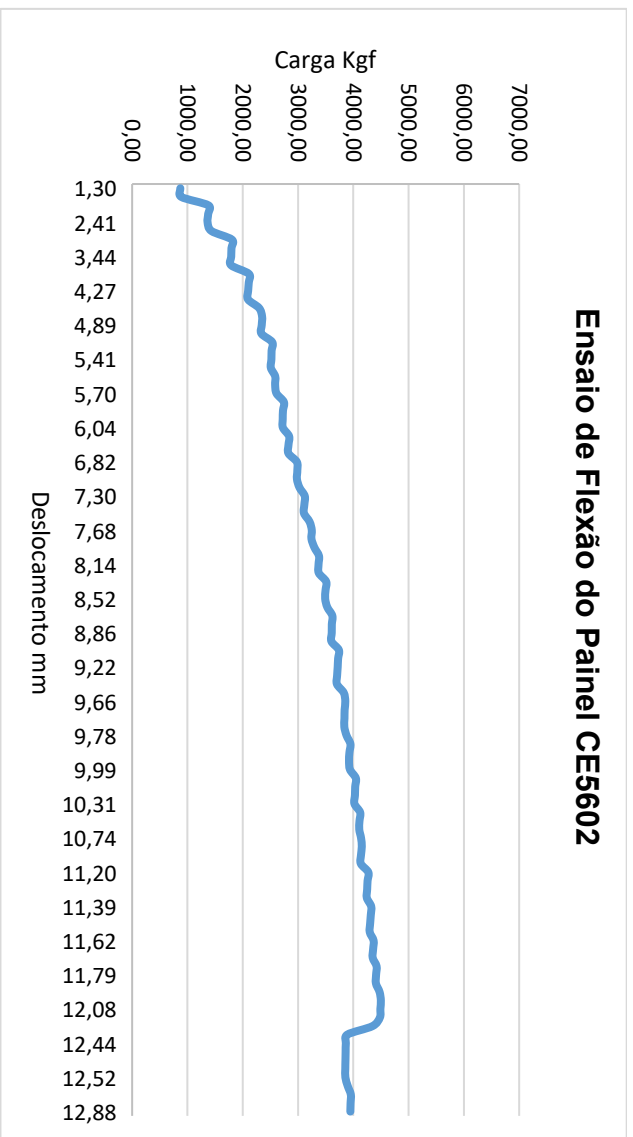


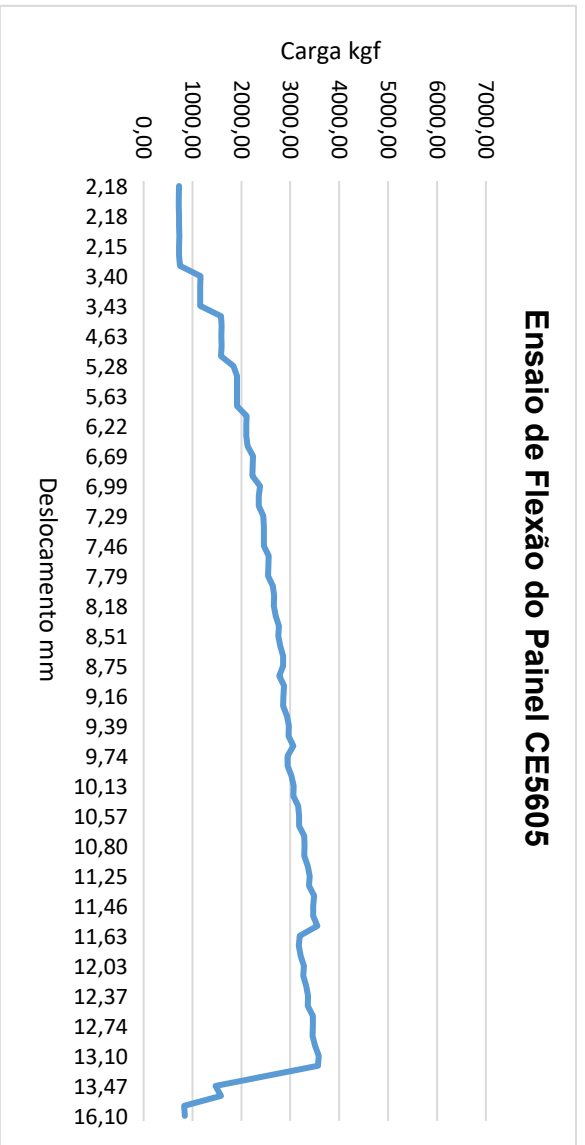
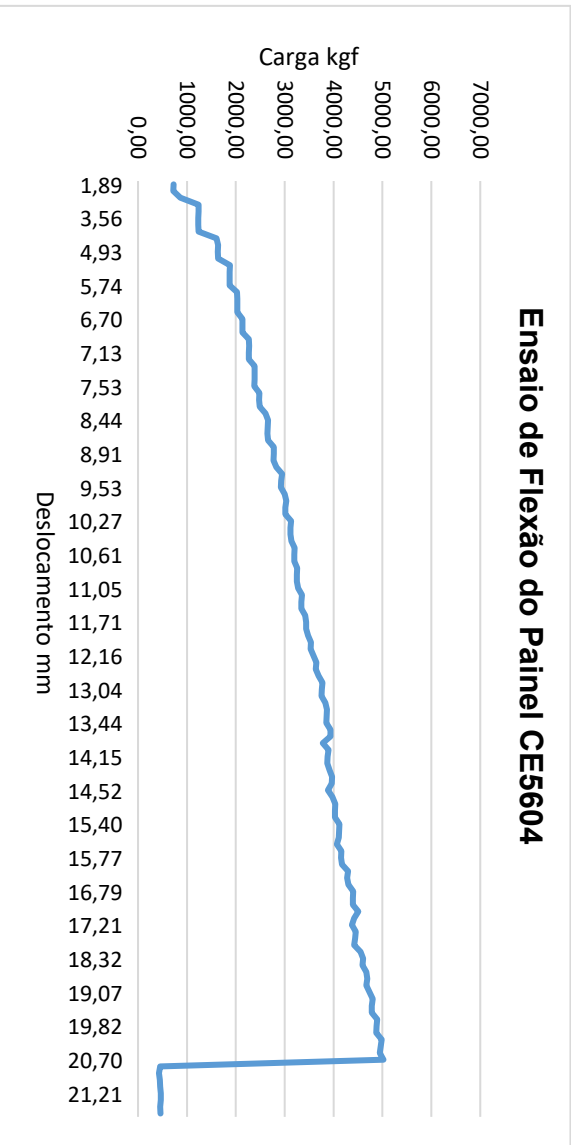
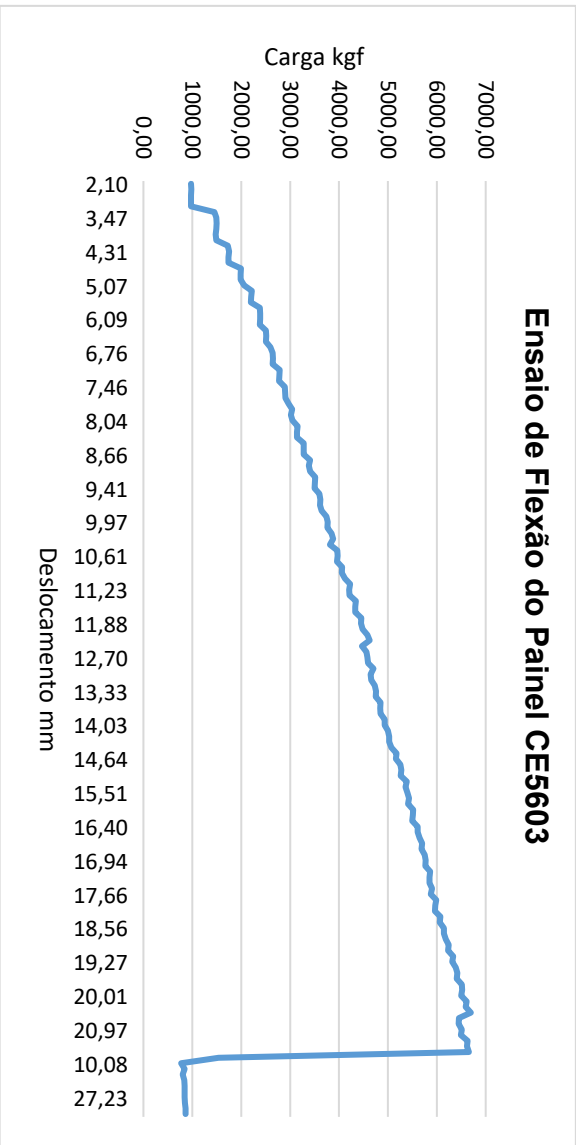
PAINÉIS COM EMENDAS E LARGURA 56 CM

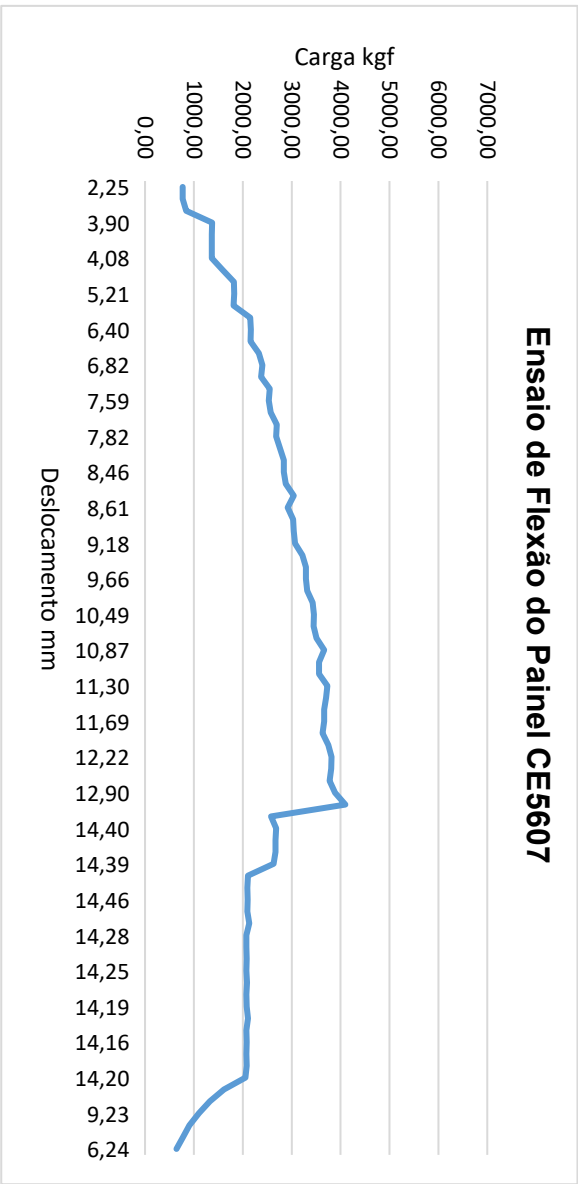
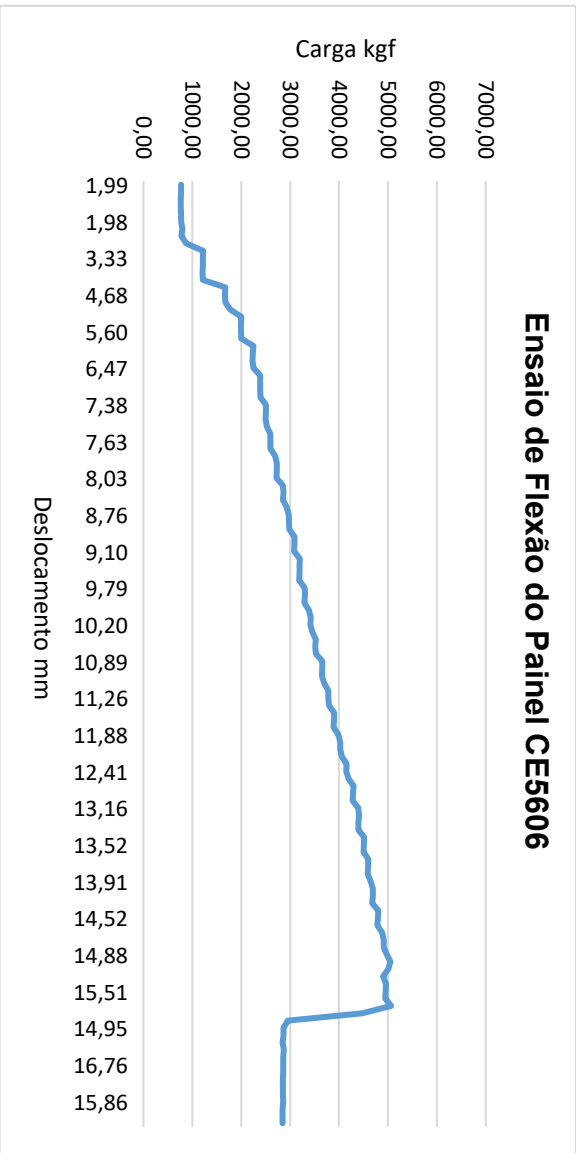
Ensaio de Flexão do Painel CE5601

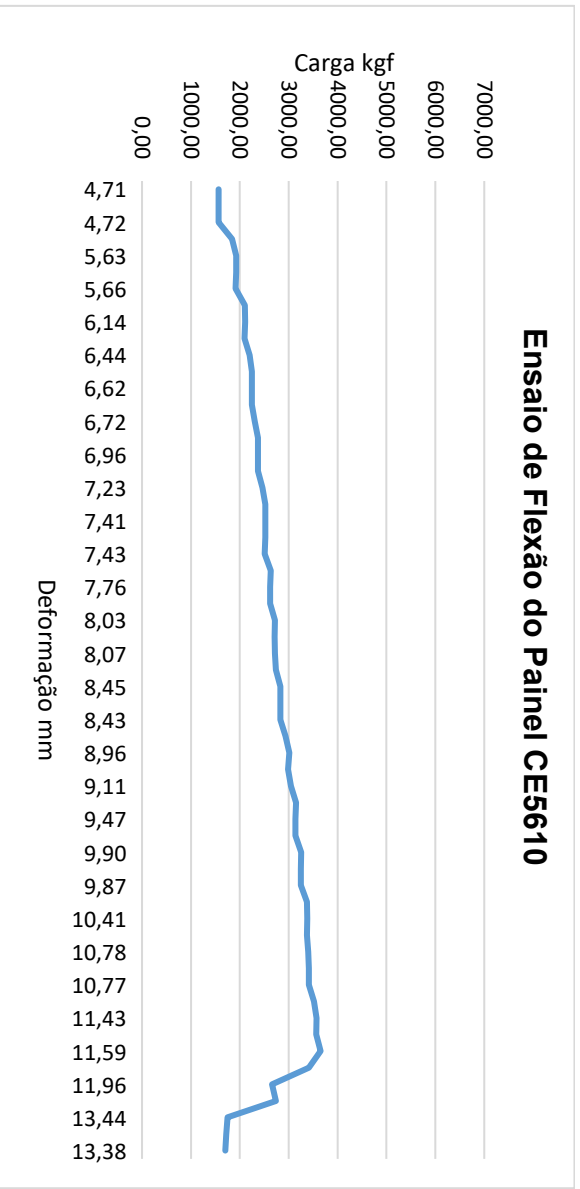
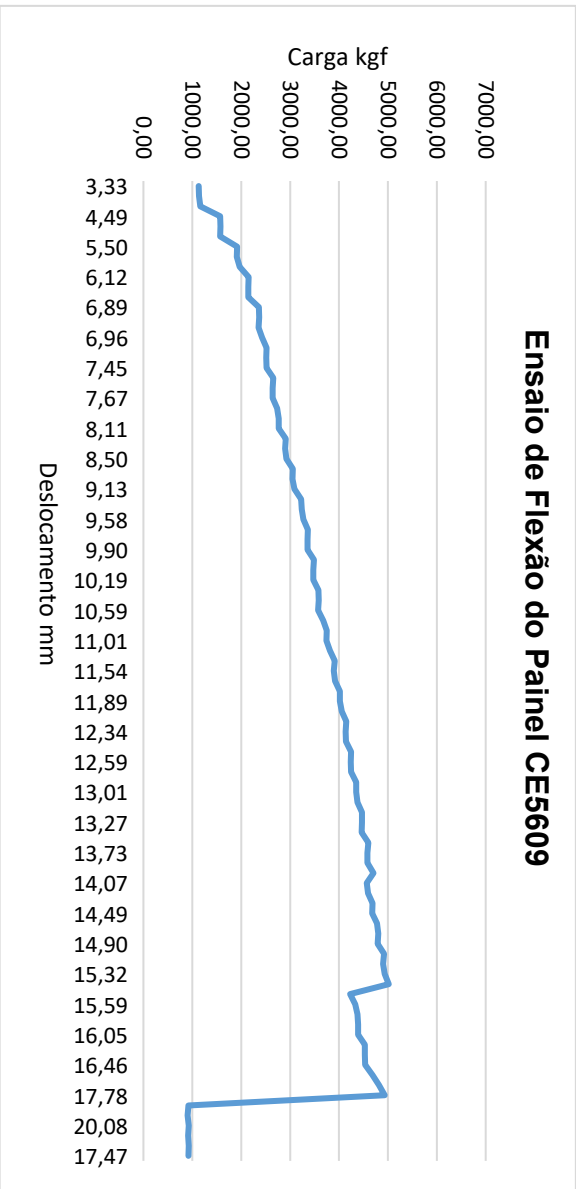


Ensaio de Flexão do Painel CE5602



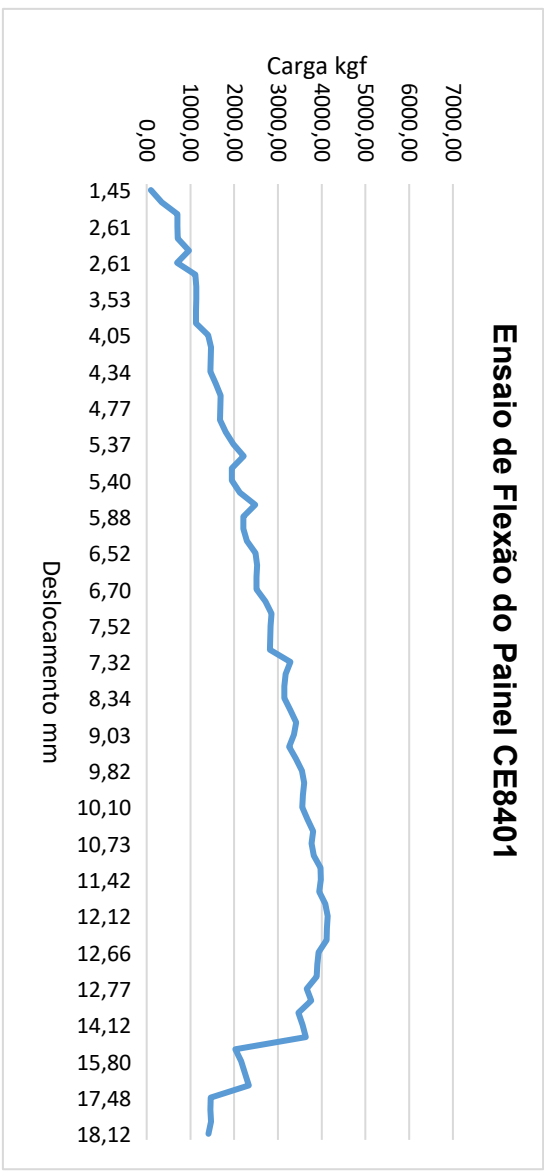




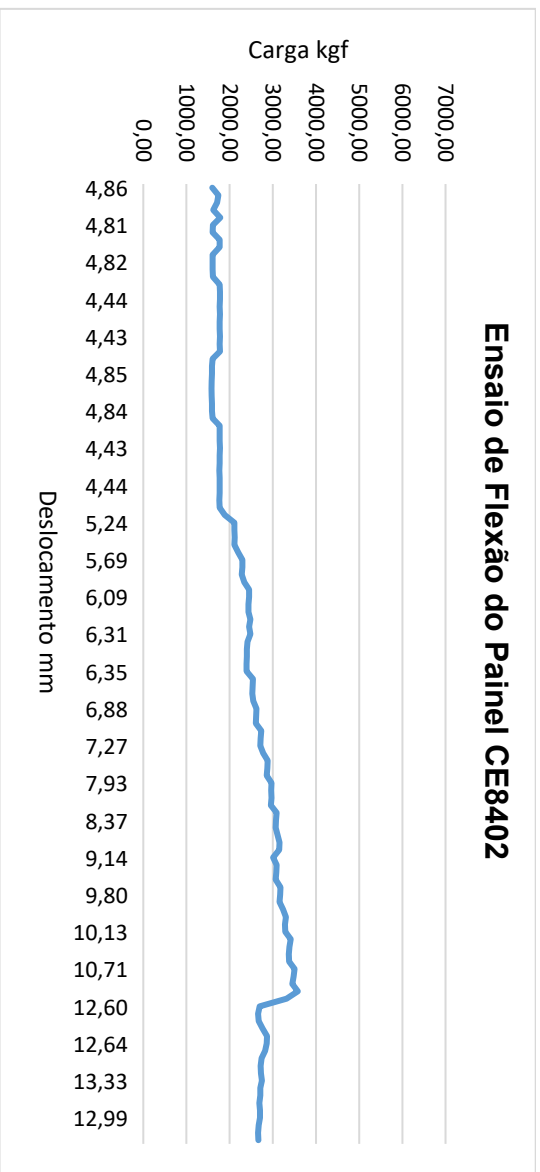


PAINÉIS COM EMENDAS E LARGURA 84 CM

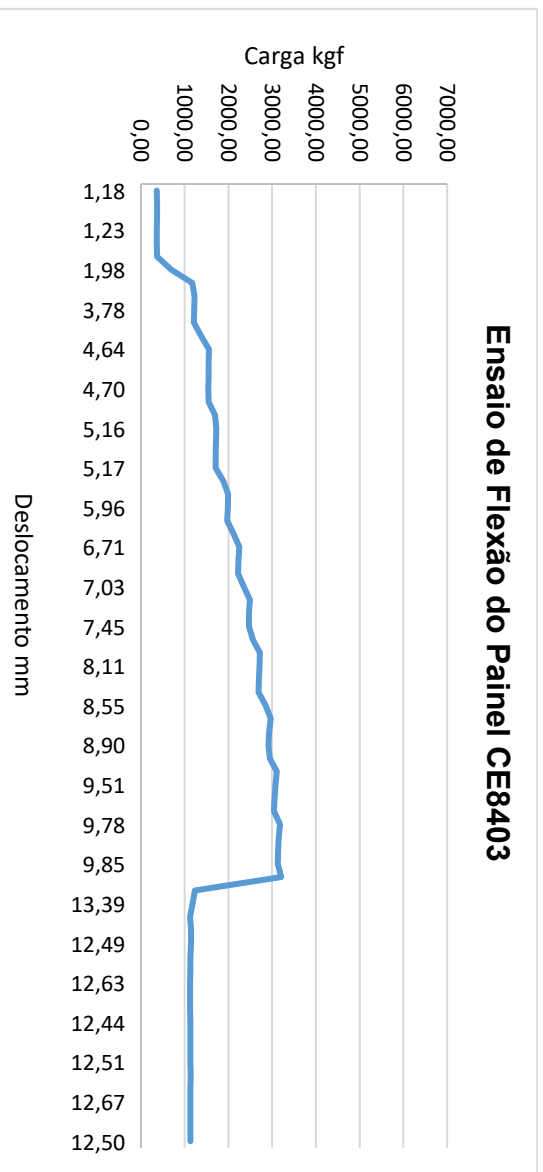
Ensaio de Flexão do Painel CE8401

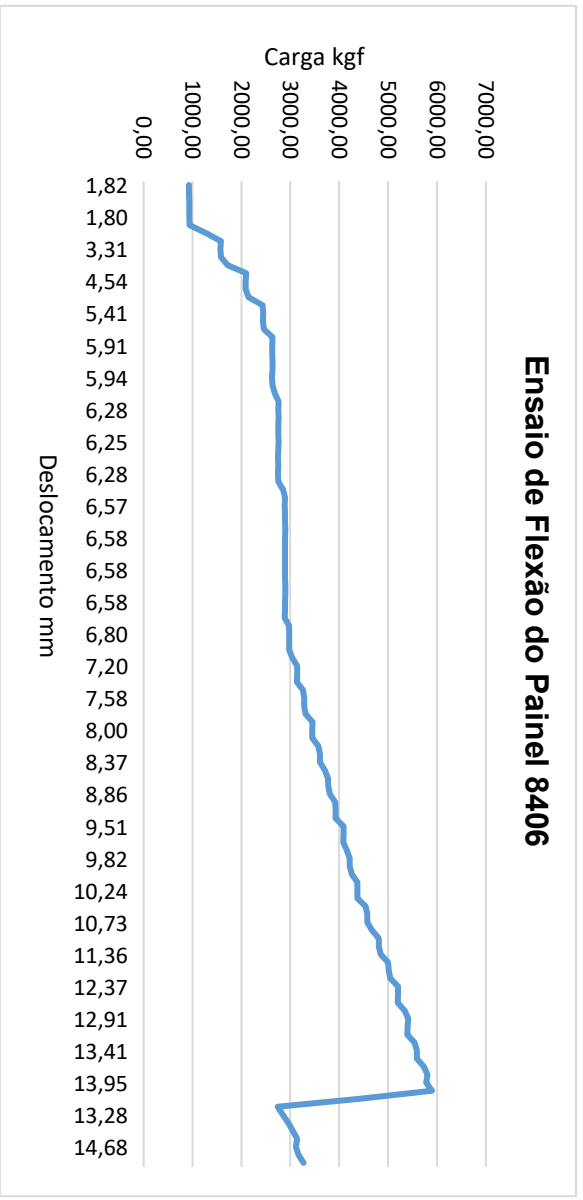
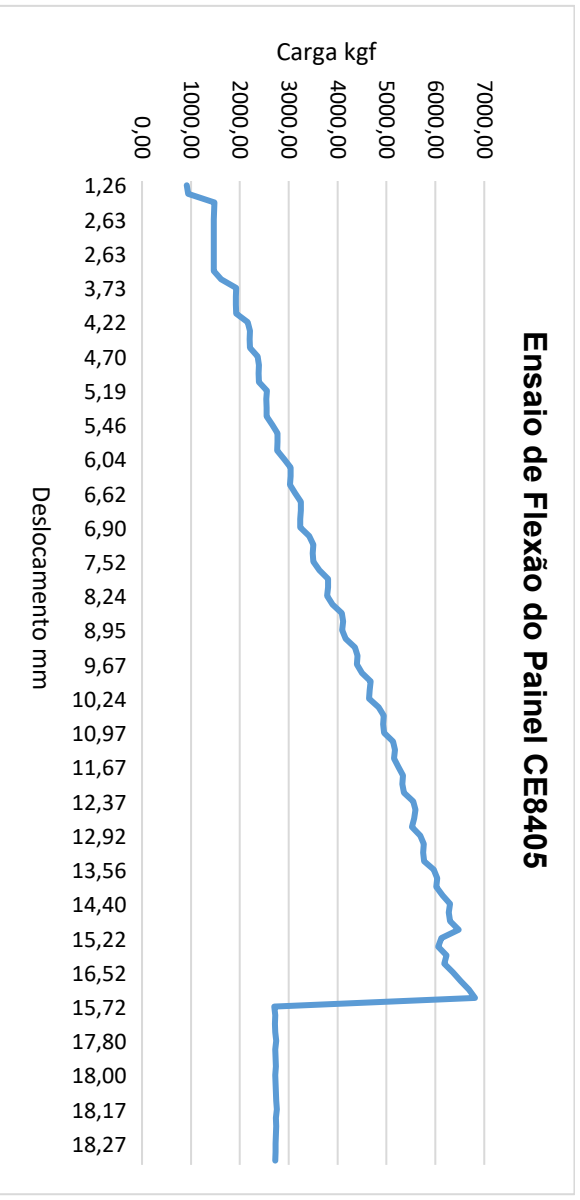
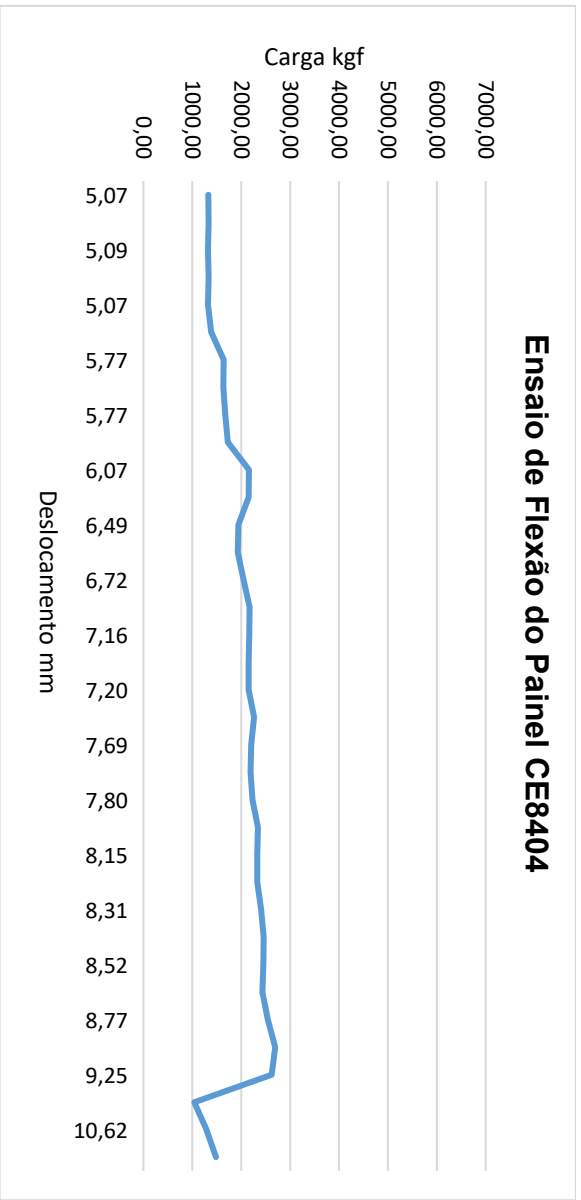


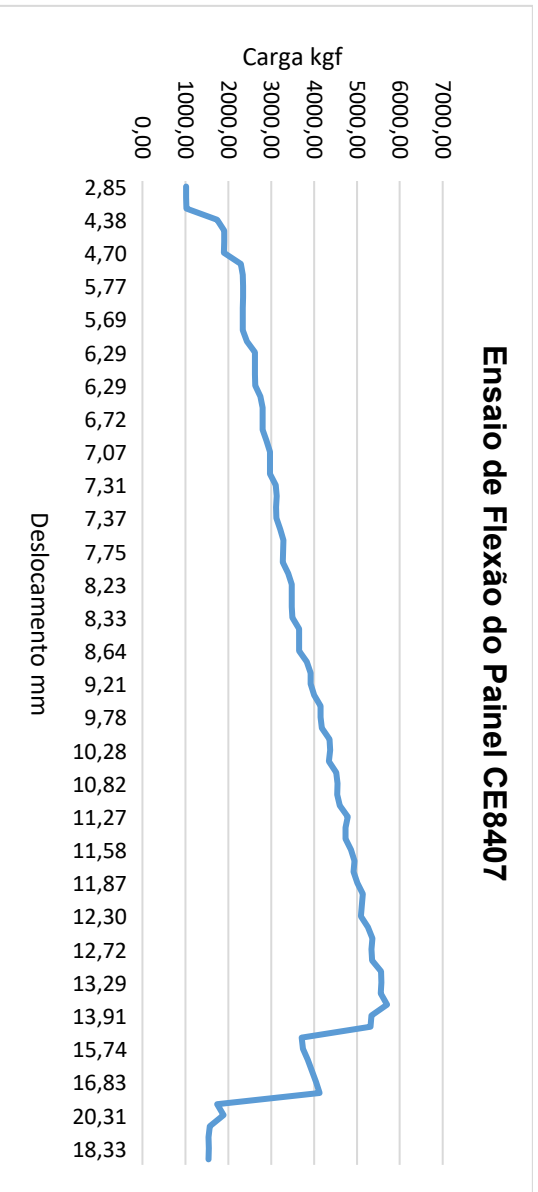
Ensaio de Flexão do Painel CE8402



Ensaio de Flexão do Painel CE8403







PAINÉIS SEM EMENDAS

