

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 MADEIRA LAMINADA COLADA

5.1.1 Módulo de Elasticidade Dinâmico das Lamelas

A determinação das propriedades de resistência para uma determinada espécie com base em pequenos corpos de prova isentos de defeitos apresenta inconvenientes com relação à dispersão entre os valores encontrados em laboratório e na estrutura em uso; em função das peças apresentarem grandes variações de suas propriedades devido ao material trabalhado, que apresenta uma grande heterogeneidade de componentes na sua formação e distribuição, a ocorrência de defeitos naturais, a imprecisão na aplicação das cargas e o longo tempo de aplicação das mesmas. Sendo assim, há uma tendência de se determinar as propriedades de resistência da madeira por meio de ensaios não destrutivos com elementos de dimensões estruturais reais, classificando-a em grupos de qualidade, de forma a se direcionar as peças ao seu uso final de acordo com as suas propriedades.

O método não destrutivo de avaliação das propriedades de resistência da madeira através do *Stress Wave Timer* depende diretamente da velocidade de propagação da onda acústica ao longo da peça ensada e da densidade do material. Quanto à velocidade de propagação da onda, pode-se dizer que: quanto maior à velocidade, maior será o módulo de elasticidade da peça analisada, mantendo-se as demais variáveis inalteradas. Como pode ser observado no Quadro 8, a lamela denominada de 47SI (Superfície Inferior) da viga 1 e na 77M3 (Miolo) da viga 2, apresentam densidade igual a 420 kg/m^3 , velocidades de 462.250 cm/s e 410.397 cm/s e

conseqüentemente Módulos de Elasticidade diferenciados de 9.161 MPa e 7.2201 MPa, respectivamente.

Ao mesmo tempo, a velocidade de propagação da onda acústica também é influenciada pela quantidade de material lenhoso a ser atravessada no material que está sendo analisado, pois quanto maior a variável mencionada, menor é o tempo despendido deste o emissor até o receptor da onda. Sendo a velocidade, a relação entre distância e tempo, mantendo-se a primeira variável inalterada e aumentando-se a segunda, diminui-se a velocidade. Mas em contrapartida, de forma direta, quanto maior a densidade, maior é o módulo de elasticidade, tendo em vista que o módulo de elasticidade dinâmico é uma função do quadrado da velocidade de propagação da onda e da densidade.

Desta forma, pode-se atribuir os diferentes índices de velocidade a presença de defeitos naturais como a presença de nós, aos encaixes utilizados na emendas dentadas tipo *finger joint* e ao adesivo utilizado na junção.

Com relação à densidade, pode-se destacar a influência da espécie a ser utilizada, do teor de umidade que também influencia no desempenho do adesivo durante o seu processo de cura, da largura dos anéis de crescimento, da posição de retirada da peça ao longo do fuste da árvore, da porcentagem de lenho inicial e tardio, da diferenciação entre lenho juvenil e adulto, além de influências externas. Desta forma, evidencia-se no cálculo da densidade (Quadros 8 a 10) uma grande heterogeneidade de valores com amplitude entre as peças de 378 kg/m^3 e 560 kg/m^3 . Esta amplitude de variação é certamente derivada da origem das peças destinadas ao estudo, que contempla uma série de condições que já foram mencionadas, destacando-se a idade das árvores, a posição de retiradas das peças e as influências externas.

A idade das árvores reflete a diferenciação entre os lenhos juvenil e adulto, onde o segundo em madeira de *Pinus taeda* é formado geralmente a partir do 10º ao 12º de crescimento, caracterizando uma madeira mais densa, com traqueóides mais longos, paredes celulares mais espessas, alta porcentagem de lenho tardio, baixa porcentagem de nós, maior porcentagem de celulose, tornando a madeira mais flexível, menor ângulo fibrilar e conseqüentemente maior resistência mecânica. Considerando as características mencionadas, observou-se também que as peças foram retiradas em locais variados ao longo do fuste, próximo à casca ou medula e em árvores da base a de toretes mais superiores na árvore sem haver uma classificação da madeira direcionada ao uso estrutural.

Quanto às influências externas, destaca-se as condições de crescimento e os métodos silviculturais aplicados. O primeiro agrupa as variáveis de clima, solo (umidade e nutrientes), altitude, declividade, vento, espaçamento, entre outros; e o segundo adubação, poda, desbaste, composição de espécies, etc.

A forma de aplicação da onda poderia ser um fator que diferenciasse a sua propagação; mas durante a execução dos ensaios, manteve-se a mesma constante, colocando sempre o pêndulo de aplicação a uma mesma distância da peça, o que gera uma mesma intensidade de aplicação da onda em todas as peças ensaiadas.

Outro fator não analisado neste estudo que pode contribuir para a alteração da variável velocidade é o efeito das emendas entre duas peças coladas com adesivo, que pode vir a ser um obstáculo à passagem da onda ou um dissipador da onda ao longo da peça; este fator pode ser estudado em futuros experimentos.

QUADRO 8 - VALORES INDIVIDUAIS MOE DINÂMICO PARA AS LAMELAS UTILIZADAS NA PRODUÇÃO DE VIGAS COM ADESIVO RFF.

Viga	Lamela	Densidade (kg/m ³)	Velocidade(cm/s)	MOE (MPa)
01	45SS	469	402.145	7.738
	91M1	420	393.185	6.628
	71M2	418	411.523	7.225
	85M3	398	339.367	4.675
	102M4	398	400.534	6.512
	47SI	420	462.250	9.161
02	59SS	455	376.412	6.574
	106M1	396	394.737	6.292
	69M2	446	371.747	6.283
	77M3	420	410.397	7.221
	74M4	418	405.954	7.031
	46SI	422	427.960	7.890
03	48SS	483	335.196	5.540
	86M1	423	426.136	7.842
	107M2	427	418.410	7.633
	68M3	378	369.458	5.257
	73M4	389	386.598	5.927
	64SI	442	468.750	9.899
04	35SS	435	350.877	5.457
	75M1	381	388.098	5.848
	72M2	467	382.653	6.976
	101M3	407	389.105	6.287
	100M4	488	468.750	10.947
	41SI	443	402.145	7.302
05	27SS	477	389.610	7.390
	84M1	449	361.011	5.966
	90M2	394	413.793	6.879
	78M3	385	414.365	6.738
	81M4	388	373.134	5.507
	24SI	459	346.420	5.618
06	62SS	438	450.450	9.057
	108M1	422	404.313	7.042
	98M2	402	379.267	5.899
	110M3	418	330.033	4.647
	111M4	413	365.854	5.641
	66SI	438	427.960	8.175
07	31SS	495	332.594	5.580
	76M1	440	304.260	4.151
	93M2	431	396.825	6.931
	79M3	383	393.701	6.050
	87M4	404	389.105	6.240
	23SI	546	413.793	9.543

08	43SS	453	360.144	5.991
	103M1	419	369.458	5.838
	82M2	416	385.604	6.313
	105M3	449	334.076	5.109
	88M4	441	388.601	6.788
	33SI	467	444.444	9.410
09	65SS	452	425.532	8.345
	92M1	408	389.105	6.302
	95M2	425	340.522	5.031
	83M3	505	435.414	9.760
	97M4	428	404.858	7.163
	39SI	477	409.277	7.633
10	42SS	481	412.088	8.337
	89M1	430	364.520	5.828
	70M2	388	401.606	6.379
	104M3	398	406.504	6.707
	80M4	389	375.000	5.577
	63SI	473	405.954	7.954

O Quadro 8 apresenta os valores do MOE dinâmico para vigas produzidas com o adesivo Resorcina Fenol Formaldeído, de acordo com o sistema de classificação visual adotado pela empresa, onde observa-se que a lamela com maior resistência deveria estar posicionada na camada inferior da viga, a segunda na parte superior, a terceira na segunda posição sentido de baixo para cima e assim sucessivamente. Deste modo, observa-se que nas dez vigas analisadas, nenhuma apresentava uma distribuição correta das lamelas, o que pode diminuir potencialmente a resistência geral da viga. Este ponto será analisado no decorrer do estudo, comparando-se os valores de resistência com a distribuição das lamelas sem / com a classificação através de ensaio não destrutivo.

A distribuição das lamelas em dois grupos de resistência na viga de MLC pelo método não destrutivo é um fator determinante na resistência da viga inteira, tendo em vista que às lamelas com maiores valores de MOE deveriam ser colocadas nas regiões mais solicitadas da viga, ou seja, na zona de tração e compressão, que correspondem à

parte superior e inferior das vigas, respectivamente; pois somente com a análise visual baseada na contagem de anéis de crescimento e na ocorrência de defeitos naturais das lamela não foi suficiente para se alcançar os maiores valores de MOE na viga, como pode ser observado nos Quadros de número 8 a 10; sendo necessária a implementação de sistemas de classificação não destrutivo em todas as lamelas.

Os valores de MOE das lamelas apresentados nos Quadros 9 e 10, referentes aos adesivos MUF e PUR demonstram a mesma constatação de distribuição evidenciadas no Quadro 8 para o adesivo RFF, sendo insuficiente a classificação visual utilizada pela empresa para este fim, mas sim, apresentando-se como um método importante para uma pré-classificação no momento do destopo dos defeitos, e na escolha das peças que são unidas em cada uma das lamelas, evitando-se a efetivação dos ensaios não destrutivos em todas as peças destopadas, passando para esta atividade depois da lamela pronta, ou seja, depois das peças emendadas, evitando perda de tempo e aumento no rendimento da operação de classificação.

QUADRO 9 - VALORES INDIVIDUAIS MOE DINÂMICO PARA AS LAMELAS UTILIZADAS NA PRODUÇÃO DE VIGAS COM ADESIVO MUF

Viga	Lamela	Densidade (kg/m³)	Velocidade(cm/s)	MOE (MPa)
01	39SS	506	426.136	9.367
	106M1	467	414.365	8.180
	68M2	440	374.065	6.275
	79M3	419	361.011	5.574
	90M4	410	404.585	6.857
	110SI	424	396.825	6.816
02	65SS	539	424.929	9.933
	96M1	425	389.610	6.586
	76M2	430	382.166	6.405
	82M3	416	431.035	7.888
	85M4	404	353.774	5.158
	58SI	456	393.701	7.208

03	37SS	477	441.826	8.895
	97M1	443	397.878	7.148
	74M2	407	393.185	6.419
	92M3	439	371.747	6.183
	112M4	406	359.281	5.347
	61SI	560	396.302	8.965
04	41SS	473	465.839	10.474
	99M1	493	359.281	6.485
	77M2	404	345.622	4.923
	88M3	459	424.929	8.453
	103M4	413	382.166	6.155
	63SI	484	368.098	6.694
05	64SS	451	417.246	8.005
	100M1	428	371.287	6.024
	89M2	426	424.328	7.831
	104M3	426	386.598	6.501
	75M4	439	358.423	5.747
	34SI	495	441.177	9.818
06	66SS	447	468.019	9.981
	78M1	401	369.458	5.583
	84M2	463	376.884	6.708
	87M3	397	372.671	5.623
	111M4	435	348.028	5.369
	55SI	481	383.632	7.226
07	42SS	505	387.097	7.714
	105M1	491	426.136	9.104
	71M2	443	371.287	6.225
	107M3	446	355.872	5.758
	102M4	425	398.406	6.887
	67SI	459	368.098	6.343
08	25SS	557	414.246	9.884
	08M1	459	424.929	8.453
	70M2	426	374.532	6.101
	86M3	435	361.882	5.805
	91M4	439	394.218	6.961
	54SI	485	368.550	6.725
09	33SS	489	402.685	8.096
	94M1	426	381.194	6.320
	98M2	401	379.747	5.898
	108M3	441	398.936	7.153
	109M4	436	375.940	6.279
	57SI	463	335.196	5.306
10	50SS	439	413.793	7.660
	73M1	383	424.328	7.028
	69M2	436	395.257	6.941
	95M3	468	388.601	7.210
	93M4	423	386.598	6.454
	60SI	482	419.580	8.661

O sistema de classificação através do *Stress Wave Timer* é simples, prático e de resultado imediato, podendo ser utilizado em qualquer parte da empresa, seja na floresta ou na indústria, tendo em vista que é um equipamento leve e portátil, podendo determinar a velocidade de propagação tanto em árvores, quanto em peças de madeira serrada, alterando somente os dispositivos de emissão e recepção da onda. O conjunto destes fatores torna o sistema atraente frente a outros métodos não destrutivos que são de grande porte, alto investimento e manutenção, contanto com softwares sofisticados.

QUADRO 10 - VALORES INDIVIDUAIS MOE DINÂMICO PARA AS LAMELAS UTILIZADAS NA PRODUÇÃO DE VIGAS COM ADESIVO PUR

Viga	Lamela	Densidade (kg/m ³)	Velocidade(cm/s)	MOE (MPa)
01	51SS	488	358.423	6.400
	87M1	435	386.598	6.625
	88M2	437	400.000	7.125
	76M3	427	377.359	6.208
	69M4	415	357.143	5.402
	63SI	457	469.484	10.273
02	49SS	413	366.748	5.669
	94M1	437	386.100	6.638
	105M2	428	421.941	7.780
	79M3	389	344.432	4.705
	75M4	404	384.615	6.096
	68SI	491	449.775	10.142
03	66SS	440	343.643	5.302
	84M1	425	395.778	6.797
	73M2	426	390.625	6.637
	115M3	406	382.653	6.065
	72M4	415	397.351	6.687
	60SI	403	468.750	9.033
04	39SS	473	391.134	7.384
	98M1	445	365.854	6.072
	74M2	421	400.000	6.876
	78M3	404	416.667	7.155
	92M4	416	412.655	7.230
	61SI	441	400.000	7.191

05	23SS	450	443.132	9.009
	80M1	414	398.406	6.701
	70M2	453	434.153	8.707
	30M3	456	386.598	6.950
	25M4	465	364.964	6.318
	28SI	459	367.647	6.328
06	42SS	440	386.598	6.702
	103M1	455	382.653	6.794
	90M2	427	371.287	6.010
	111M3	409	414.365	7.165
	96M4	437	414.365	7.646
	47SI	521	458.716	11.182
07	54SS	447	342.466	5.344
	110M1	431	394.218	6.840
	95M2	437	360.144	5.776
	81M3	435	354.610	5.536
	83M4	405	375.940	5.839
	57SI	493	358.852	6.469

Em estudo realizado por FAGUNDES & SZÜCS (1998), nota-se que após a classificação estabeleceu-se 3 classes de vigas com módulo de elasticidade maiores, médios e menores, os quais foram distribuídos em 5 modelos de vigas; os resultados do experimento demonstraram que não houve diferença estatística na resistência das vigas analisadas, mas a dispersão dos valores de MOE foram pequenas variando de 7.581 MPa a 7.630 MPa. Entretanto, no presente estudo a dispersão dos valores de MOE dinâmico foi de 4.151 MPa a 11.182 MPa. A amplitude de valores de Módulo de Elasticidade dinâmico encontrados neste estudo certamente não apresentaria as mesmas considerações se fosse aplicado no estudo comparativo, reforçando a necessidade de uma classificação não destrutiva durante a composição das vigas estruturais de madeira laminada colada pelas lamelas emendadas.

Evidencia-se, portanto, a necessidade da classificação para peças estruturais, podendo-se dizer que quanto maior o número de grupos de resistência forem subdivididas a atividade, maior será a probabilidade de se aumentar a resistência da viga. Mas, deve-se

atender a questão de operacionalidade dentro das empresas, podendo dificultar o processo, diminuindo o rendimento.

5.1.2 Módulo de Elasticidade Dinâmico das Vigas

A partir da determinação do MOE dinâmico individual das lamelas que fizeram parte a viga, foi estimado o módulo de elasticidade dinâmico da viga inteira com base na classificação visual realizada pela empresa, e também através da distribuição das lamelas de acordo com a qualidade de resistência desejada para a realização de comparações; pois de acordo com ZANGIÁCOMO (2003) as propriedades de rigidez de vigas de MLC, obtidas nos ensaios de flexão estática, podem ser influenciadas pela disposição das lâminas ao longo da altura da seção transversal. Vigas com distribuição não aleatória de lâminas podem apresentar propriedades de rigidez superiores às de vigas montadas com distribuição aleatória de lâminas.

Analisando-se o QUADRO 11, observa-se que em todas as vigas de madeira laminada colada com uma classificação e distribuição adequada das lamelas, obteve-se um ganho médio de resistência de 6%; mas podendo atingir 17% de ganho como na viga 4 colada com adesivo RFF, onde obteve-se um MOE de 6.912 MPa, separando-se as lamelas em duas classes de resistência através do método visual e 8.350 MPa com MOE estimado através do *Stress Wave Timer*, distribuindo-se as peças através da resistência encontrada pelo processo; tendo em vista que as regiões mais solicitadas da viga recebiam as lamelas com maior módulo de elasticidade e a região próxima a linha neutra as lamelas com menores valores. A distribuição das lamelas independe do

adesivo que está sendo utilizado, mas diretamente das dimensões e das características anatômicas das peças que estão sendo trabalhadas.

QUADRO 11 - MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DAS VIGAS ESTIMADO PELO SWT

Viga	MOE (RFF) MPa		MOE (MUF) MPa		MOE (PUR) MPa	
	Aleatório	Não Aleatório	Aleatório	Não Aleatório	Aleatório	Não Aleatório
1	7.870	7.949	7.863	8.166	7.672	8.025
2	7.054	7.309	7.818	8.272	7.445	8.141
3	7.455	8.196	8.137	8.257	7.027	7.507
4	6.912	8.350	7.927	8.573	7.112	7.241
5	6.316	6.714	8.063	8.347	7.375	8.238
6	7.902	7.931	7.702	7.741	8.408	8.670
7	6.908	7.570	7.241	7.841	6.010	6.391
8	7.267	7.497	8.062	8.446	-----	-----
9	7.642	8.498	6.590	7.206	-----	-----
10	7.453	7.640	7.753	7.837	-----	-----
Média	7.2780	7.765	7.716	8.069	7.293	7.745

* Aleatório: distribuição utilizada pela empresa

* Não aleatório: distribuição por resistência da lamela

Neste estudo, optou-se na divisão das peças em duas classes de qualidade, densa e não densa, sendo a primeira para as duas extremidades das vigas e a segunda para as quatro camadas internas da mesma, sem se ter a preocupação com os valores de resistência dentro das classes. Sendo assim, a resistência foi reduzida quando comparada com o que se poderia obter de resistência do material através da distribuição adequada das lamelas.

5.1.3 Módulo de Elasticidade e Módulo de Ruptura Estático das Vigas

Os valores de módulo de elasticidade que expressam a rigidez das vigas foram determinados a partir da carga e deflexão da viga no

limite proporcional. Estes valores estão relacionados aos esforços de tensão dentro do estado de elasticidade até o limite de proporcionalidade. É, portanto, o ponto exato onde são iniciadas as deformações plásticas, as quais deixam resíduo de deformação na viga após a retirada da sua causa. Sendo assim, os valores obtidos para a variável Módulo de Elasticidade das vigas estruturais de Madeira Laminada Colada compostos pelos três diferentes adesivos estão apresentados no Quadro 12, onde observa-se nos valores obtidos pelos ensaios destrutivos na máquina universal de ensaios a superioridade do adesivo poliuretano (16.106 MPa) frente ao resorcinol (15.589 MPa) e ao melamínico (15.463 MPa), e a grande dispersão entre os valores encontrados nos três tratamentos; evidenciando a influência dos fatores relacionados à madeira. A dispersão dos resultados pode ser verificada, por exemplo, dentro do tratamento que é caracterizado pelo adesivo MUF, onde o menor valor representa 75% do maior valor.

QUADRO 12 - VALORES DE MOE ESTÁTICO DAS VIGAS DE MLC COMPOSTAS PELOS 3 ADESIVOS UTILIZADOS NO ESTUDO

Viga	MOE (RFF) MPa	MOE (MUF) MPa	MOE (PUR) MPa
1	14.298	16.339	14.671
2	17.486	13.374	19.638
3	15.096	13.984	15.274
4	15.901	17.393	14.692
5	14.275	13.926	17.969
6	17.078	14.971	16.836
7	14.156	15.584	13.665
8	14.366	16.871	----
9	17.374	14.394	----
10	15.858	17.793	----
Média	15.589	15.4628	16.106

Contudo, através da análise do Quadro 13, que apresenta a Análise da Variância, observa-se que os resultados não apresentaram diferença estatística entre os tratamentos, pois o F calculado (0,278) foi menor que o F tabelado (0,760) para o nível de significância utilizado no estudo. Observa-se também que o erro dentro dos tratamentos foi maior que entre os mesmos; este fato é devido as variáveis não controladas no experimento.

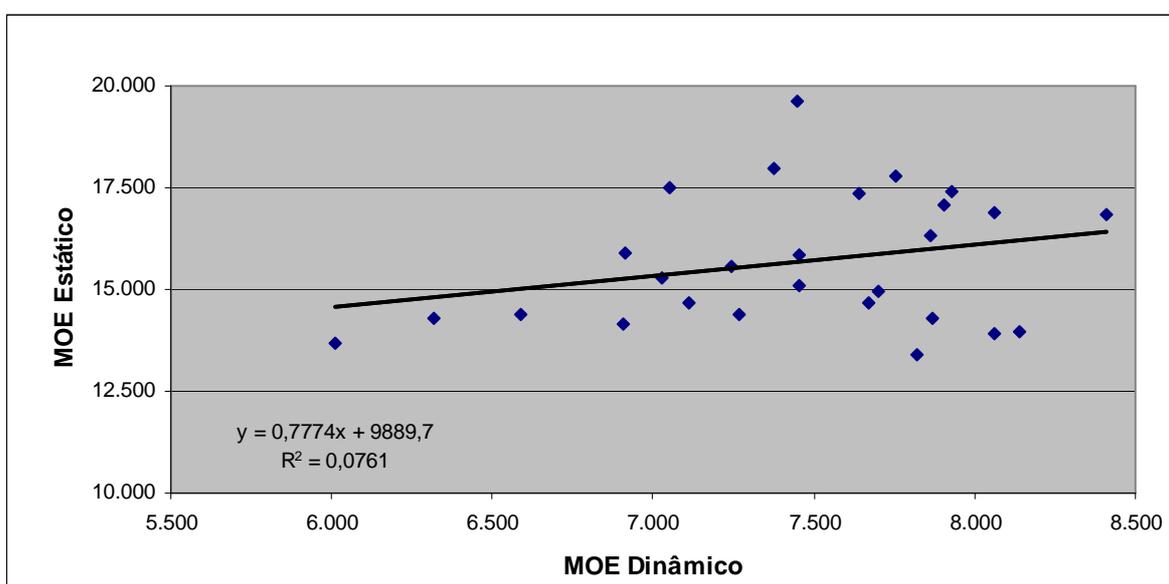
Sendo assim, salienta-se que o adesivo resorcinólico é tradicionalmente o mais utilizado no mercado para a confecção de vigas estruturais, principalmente por ter um alto tempo em aberto e ter a sua cura efetuada em temperatura ambiente. Recentemente foram incorporados o adesivo melamínico e o poliuretano que apresenta um grande poder de ligação a um reduzido tempo de cura; mas em contrapartida pouco tempo em aberto, o que vem a dificultar sensivelmente o manuseio deste produto, necessitando-se de equipamentos especiais para a sua aplicação e uma logística precisa para a prensagem do material, sem a ocorrência de uma pré-cura no sistema, o que acabaria prejudicando a linha de cola.

QUADRO 13 - ANÁLISE DA VARIÂNCIA PARA MOE DE MADEIRA LAMINADA COLADA

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F	Nível de Significância
Entre Grupos	2	$2,2754 \cdot 10^6$	$1,1377 \cdot 10^6$	0,278	0,760
Dentro Grupos	24	$9,8388 \cdot 10^7$	$4,0995 \cdot 10^6$		
Total	26	$1,0066 \cdot 10^8$			

Efetuada-se uma análise comparativa entre os métodos de obtenção do MOE de elasticidade dinâmico e estático, verificou-se que a correlação entre as variáveis foi muito baixa, pois o coeficiente de encontrado foi de 0,2758. Mesmo assim, desenvolveu-se uma análise de regressão (FIGURA 27), onde observa-se a dispersão dos valores encontrados em cada um dos ensaios.

FIGURA 27: GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES MÉTODOS DE OBTENÇÃO DO MOE.



Fonte: O Autor

Legenda: y = Módulo de Elasticidade Estático
x = Módulo de Elasticidade Dinâmico

Desta forma, evidenciou-se que MOE dinâmico explica somente 7,61% do MOE estático, sendo o restante da porcentagem até atingir 100% derivado de outras variáveis como matéria-prima, condições de confecção das vigas e procedimentos utilizados nos ensaios. Com relação aos procedimentos de ensaio, foram utilizadas formas

diferenciadas de obtenção do MOE; onde o dinâmico foi baseado na viga inteira e o estático com aplicação dupla de carga.

Nota-se também que no MOE estimado pelo processo dinâmico, os maiores valores de MOE nas vigas estruturais de madeira laminada colada encontram-se no grupo do adesivo MUF; já no ensaio estático, no adesivo PUR. Este fato é decorrente de que a análise dinâmica foi desenvolvida com base nos valores individuais de cada lamela, sem levar em consideração a composição da viga com o adesivo na colagem das faces. Na análise estática, tem-se a presença efetiva do adesivo entre as faces das lamelas. Desta forma, mesmo não havendo relação direta entre o MOE estimado da viga e o real, reforça-se a importância dos ensaios não destrutivos, pois classificando a madeira em grupos de resistência, privilegia-se o aumento da resistência das vigas durante a sua utilização na estrutura e/ou durante os ensaios mecânicos em laboratório, assegurando um melhor aproveitamento da madeira e a maior segurança das vigas em uso.

O valor do módulo de ruptura é apenas comparativo, não sendo influenciado pela relação vão e altura da viga. A análise dos valores do MOR está apresentada no Quadro 14, onde nota-se que os maiores valores se encontram nas vigas estruturais coladas com o adesivo melamínico com um média de 28 MPa, enquanto que os resultados menos expressivos são das vigas unidas com o adesivo resorcinólico, invertendo a situação encontrada na determinação do MOE, onde as vigas coladas com adesivo melamínico, apresentaram os menores valores de resistência. Mesmo assim, não houveram diferenças estatísticas entre os resultados de MOR, como pode ser observado na Análise da Variância, Quadros 15.

QUADRO 14 - VALORES DE MOR DAS VIGAS DE MLC COMPARANDO-SE OS TRÊS ADESIVOS UTILIZADOS NO ESTUDO.

Viga	MOR (RFF) MPa	MOR (MUF) MPa	MOR (PUR) MPa
1	18	19	26
2	25	37	23
3	27	21	21
4	23	29	24
5	33	32	28
6	22	31	33
7	23	31	28
8	29	19	----
9	30	30	----
10	34	35	----
Média	26	28	26

Os valores de carga máxima e módulo de ruptura são influenciados por fatores relacionados à madeira e a fatores externos como o processo de composição da viga. Entre estes fatores estão os encaixes dentados, que influenciam significativamente esses valores, seja no comprimento dos dentes, nas distâncias entre os dentes na viga ou a falta de pressão durante a efetivação do encaixe.

QUADRO 15 - ANÁLISE DA VARIÂNCIA PARA MOR DE MADEIRA LAMINADA COLADA

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F	Nível de Significância
Entre Grupos	2	27,90253	13,951266	0,477	0,6262
Dentro Grupos	24	701,45000	29,227083		
Total	26	729,35253			

No presente estudo foram observados três tipos de rupturas (Figura 28): por tração na camada inferior da viga, região oposta a aplicação da carga; nas regiões com a presença de agentes redutores de resistência como nos encaixes e na presença de nós; e em menor escala na região de cisalhamento na linha de cola ao longo do eixo longitudinal da viga, onde se tem a presença do adesivo.

FIGURA 28 - CARACTERIZAÇÃO DOS LOCAIS DE RUPTURA NAS VIGAS DE MLC. (A) Ruptura na Parte Inferior da Viga; (B e C) Ruptura em regiões com a presença de agentes redutores de resistência); (D) Ruptura na zona de Cisalhamento.



FONTE: O autor

Salienta-se que as rupturas nas vigas ensaiadas foram observadas nos estágio finais da deformação plástica, sem grandes variações na proporção de deflexão, em relação ao limite proporcional.

ANDRIGHETO *et al* (2006) realizaram ensaios de flexão estática com dois pontos de aplicação de carga em Madeira Laminada Colada de *Pinus spp* com 3150 mm de comprimento e 315 mm de altura, sendo composta por 12 lâminas classificadas de acordo com análise visual e propriedades físicas / mecânicas da madeira. Os resultados demonstraram nas vigas com $\frac{1}{4}$ de lâminas com qualidade superior MOE médio de 12.695 MPa e MOR de 41 MPa; para as vigas com $\frac{1}{6}$ de lâminas com qualidade superior MOE de 10.252 MPa e MOR de 38 MPa; já quando foram utilizadas lâminas invertidas nas regiões de maior esforço, o MOE foi de 11.685 MPa e o MOR de 33 MPa.

Em estudo realizado por NIELSEN (1998) com vigas laminadas coladas de *Eucalyptus spp*, com seção retangular de 10 X 23 cm e adesivo Resorcinol Formaldeído, demonstrou que as vigas formadas com peças de material genético de *Eucalyptus grandis* de árvores com idade média de 9 anos, de duas procedências distintas, um MOE de 10.885 MPa e MOR de 41 kgf/cm² para densidade média de 630 kg/m³; 11.607 MPa e 36 MPa para densidade média de 680 kg/m³; já o material da segunda procedência apresentou MOE e MOR de 10.171 MPa e 35 MPa, respectivamente para a primeira densidade e para a segunda densidade 12.730 MPa e 49 MPa.

Comparando-se os resultados do presente estudo com os estudos mencionados, verifica-se que quando comparado com os ensaios em MLC tanto de *Pinus spp* como de *Eucalyptus spp*, os resultados foram superiores na variável Módulo de Elasticidade, onde o menor valor do presente estudo 13.374 MPa obtido com o adesivo MUF foi superior aos encontrados pelos pesquisadores. Já o MOR foi inferior, com

média entre os três adesivos de 27 MPa, representando somente 82% do menor valor do estudo com madeira de *Pinus spp.* Esta inversão indica que a carga necessária para romper as vigas foram menores, refletindo diretamente nos valores da variável módulo de ruptura. Quanto ao módulo de elasticidade, pode-se dizer que as vigas apresentaram menor deformabilidade e maior resistência, conseqüentemente, melhores as características da madeira para uso estrutural. Assim, mesmo com os expressivos resultados, deve-se enfatizar que os valores de módulo de elasticidade encontrados para as vigas de MLC podem ser aumentados com o efetivo controle dos níveis de defeitos da madeira admitidos para a classificação.

5.2 VIGA PERFIL I

5.2.1 Módulo de Elasticidade e Módulo de Ruptura Estático das Vigas

Neste perfil de viga estrutural foram repetidos os mesmos ensaios destrutivos aplicados à madeira laminada colada, onde o Quadro 16 apresenta os valores de Módulo de Elasticidade encontrados como resultados dos ensaios. Observa-se novamente a superioridade das vigas que utilizaram o PUR como adesivo com MOE médio de 15.805 MPa, seguido das vigas com o adesivo RFF e finalmente as vigas com MUF. Esta superioridade não foi significativa dentro do tratamento e entre os tratamentos implantados, como pode ser verificado no Quadro 17 que apresenta a Análise da Variância.

QUADRO 16 - VALORES DE MOE ESTÁTICO DAS VIGAS COM PERFIL I COMPOSTAS PELOS TRÊS ADESIVOS UTILIZADOS NO ESTUDO

Viga	MOE (RFF) MPa	MOE (MUF) MPa	MOE (PUR) MPa
1	13.939	15.935	15.788
2	17.850	11.288	15.921
3	14.732	17.751	19.220
4	18.820	14.566	17.208
5	16.020	14.967	11.207
6	15.280	11.531	15.306
7	17.900	21.106	16.585
8	12.500	11.957	15.203
9	10.757	18.656	-----
10	14.195	20.520	-----
Média	15.199	14.888	15.805

QUADRO 17 - ANÁLISE DA VARIÂNCIA PARA MOE DE VIGA PERFIL I

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F	Nível de Significância
Entre Grupos	2	$1,9745 \cdot 10^6$	$9,8726 \cdot 10^5$	0,106	0,9003
Dentro Grupos	25	$2,3389 \cdot 10^8$	$9,3558 \cdot 10^6$		
Total	27	$2,3587 \cdot 10^8$			

Em estudo realizado por PEDROSA (2003) com vigas de perfil I constituídas por PLP (Painel de Lâminas Paralelas), Compensado de *Pinus taeda* e *Eucalyptus dunnii* e OSB de *Pinus spp*, encontrou como melhores resultados as vigas formadas com chapas de OSB como alma, e PLP de *Pinus sp* e *Eucalyptus sp* como flanges, com módulos de elasticidade aproximados de 14.000 MPa e 20.000 MPa, respectivamente; enquanto que o valor médio de MOE entre os três tratamentos do presente estudo foi de 15.297 MPa, mesmo as flanges sendo compostas por duas peças de madeira serrada coladas face a

face; sendo que segundo especificações de fabricantes o material mais indicado para este fim seriam chapas de PLP. Quanto ao emprego de chapas de OSB em vigas com perfil I, pode-se afirmar que é o material mais adequado para a composição da alma, pois durante a confecção das vigas, tentou-se por algumas vezes o emprego de chapas de compensado, mas em virtude da necessidade de fresamento para a melhoria do desempenho dos encaixes, todos apresentaram imperfeições na sua formação devido à fragilidade das lâminas, comprometendo a sua utilização.

A fabricação das vigas estruturais com perfil I exige uma maior atenção, tendo em vista a necessidade da implementação de encaixes dentados tanto nas faces internas das flanges, como nas laterais das chapas que serão conectadas. Outro fator que dificulta a fabricação destas vigas é a falta de equipamento específico para este fim, como aplicadores de adesivo.

Caso o adesivo utilizado na composição seja o PUR, os cuidados devem ser redobrados, devido o pouco tempo em aberto, seu alto poder corrosivo e seu alto poder de adesão, podendo ficar aderida aos pratos da prensa, sendo necessário à aplicação de desmoldante na mesma para evitar esse problema.

Quanto ao tempo em aberto, observa-se que no Quadro 16, que foram apresentadas somente 8 vigas com adesivo PUR, este fato é devido a alta temperatura ambiente que estava no momento da montagem das vigas, o que reduziu o tempo de assemblagem do adesivo, impedindo a consolidação do adesivo durante a prensagem, ou seja, ocorreu uma pré-cura que poderia comprometer o desempenho das vigas durante os ensaios estáticos.

Da mesma forma, nos valores de MOE da madeira laminada coladas, evidencia-se uma grande dispersão dos valores dentro dos

tratamentos, como por exemplo no tratamento com adesivo melamínico que tem seu maior valor em 21.106 MPa e o menor valor em 12.288 MPa, correspondendo a quase a metade do primeiro valor de MOE mencionado. Esta dispersão é devido a constituição das flanges, pois o material utilizado na alma do composto, chapas de OSB.

Os valores encontrados para Módulo de Ruptura em Vigas com Perfil I são apresentados no Quadro 18, onde verifica-se que as vigas coladas com adesivo RFF e MUF apresentam 13 MPa de resistência nesta variável, enquanto as vigas que utilizaram o adesivo PUR 23 MPa, cerca de 42% superior as demais.

QUADRO 18 - VALORES DE MOR ESTÁTICO DAS VIGAS COM PERFIL I COMPOSTAS PELOS 3 ADESIVOS UTILIZADOS NO ESTUDO

Viga	MOR (RFF) MPa	MOR (MUF) MPa	MOR (PUR) MPa
1	18	11	18
2	18	18	32
3	19	11	24
4	11	15	22
5	9	11	12
6	16	13	28
7	13	14	23
8	10	14	27
9	9	12	----
10	12	14	----
Média	13	13	23

Este fato fez com que houvesse uma diferença estatística, neste ensaio, ao contrário do que estava sendo apresentado nos ensaios anteriores. Esta diferenciação foi comprovada pela Análise da Variância e pelo Teste de Tukey a 5% de significância, que estão apresentados nos Quadros 19 e 20.

Na análise da variância observa-se que o F calculado (14,473) é superior ao F tabelado (0,0001), caracterizando a diferenciação entre os tratamentos. No teste de tukey evidenciou-se que a diferença está entre os tratamentos que utilizaram os adesivos resorcinólico e melamínico em relação ao poliuretano que apresentou desempenho superior, conforme as diferenças entre os tratamentos que se situaram acima dos limites de tolerância permitidos pelo teste realizado.

QUADRO 19 - ANÁLISE DA VARIÂNCIA PARA MOR DE VIGA PERFIL I

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F	Nível de Significância
Entre Grupos	2	524,43065	262,21532	14,473	0,0001
Dentro Grupos	25	452,93684	18,11747		
Total	27	977,36749			

QUADRO 20 - TESTE DE TUKEY A 95% DE SIGNIFICÂNCIA PARA MOR DE VIGA PERFIL I

Tratamento	Número de Repetições	Média	Grupos Homogêneos
2	8	22,954600	a
1	10	13,386590	b
3	10	13,362770	b
Contraste			Diferença +/- Limite
1 - 2			-95,6801 50,3055*
1 - 3			0,2382 47,4285
2 - 3			95,9183 50,3055*

A superioridade das vigas onde foi utilizado o adesivo poliuretano estava evidenciada em todos os ensaios, mas nunca de forma significativa. Este fato é decorrente das características da

madeira utilizada nas flanges, madeira serrada coladas face a face, que apresentaram vários fatores redutores de resistência como a presença de defeitos naturais, que pode ser eliminado durante a fase de classificação das peças e devido as junções através de dentes colados com os adesivos utilizados; neste caso destacando-se o adesivo PUR; tendo em vista que defeitos nas peças todas as vigas possuíam e os dentes das junções foram implementados de forma uniforme na fresadeira.

5.3 Análise Econômica

Na análise do desempenho dos adesivos no decorrer dos ensaios das vigas estruturais, não foram verificadas diferenças significativas entre os tratamentos, com exceção somente do módulo de ruptura para vigas com perfil I, onde ocorreu a superioridade do adesivo poliuretano. O módulo de ruptura, como já mencionado anteriormente no decorrer deste capítulo, vem a ser uma variável de comparação de resistência máxima entre os tratamentos, tendo em vista que a variável utilizada para a classificação da madeira para uso estrutural vem a ser o módulo de elasticidade. Sendo assim, com base no presente estudo, evidencia-se que o ponto que deve ser abordado na escolha do adesivo vem a ser a quantidade do material a ser utilizado e o preço de aquisição do mesmo no mercado.

Observa-se nos Quadros 21 e 22, que a área a ser colada é sempre a mesma, ou seja, entre os encaixes e nas faces das peças, independe do adesivo a ser utilizado, mantendo sempre as mesmas condições de classificação; tendo em vista que pode variar o número de junções dependendo da qualidade da madeira utilizada para a fabricação das vigas. Observa-se que a gramatura utilizada para o

adesivo PUR é de 200 g/m² em linha simples, cerca de 50% menor que o adesivo MUF e 40% menor que o RFF, isto representa uma grande diminuição da quantidade de adesivo a ser utilizado por unidade de área.

Para Madeira Laminada Colada, utilizando-se as características das vigas do presente estudo, tem-se para o adesivo PUR 378,20 g de adesivo para a colagem face a face e 15,22 g para a colagem das 24 junções necessárias no composto, totalizando 383,42 g; quando faz-se um comparativo com as vigas coladas com o adesivo resorcinólico, tem-se 945,50 g para a colagem das faces e 38,06 g para as junções, totalizando 983,56 g; ou seja, aproximadamente 256% a mais de adesivo para se produzir o mesmo composto. Quando compara-se com o adesivo melamínico, tem 205% de acréscimo na quantidade de cola. Estas variações estão relacionadas diretamente a gramatura utilizada para aplicação dos adesivos, segundo a recomendação dos catálogos das empresas fornecedoras dos adesivos.

Quando relatá-se as vigas com perfil I, a situação não é diferenciada da madeira laminada colada, o adesivo poliuretano permanece com a aplicação de menores quantidades do produto, refletindo na diminuição dos custos de produção; tendo em vista que em termos líquidos, sem a incorporação dos impostos o adesivo PUR apresenta preço por quilograma de adesivo de R\$ 22,80, a MUF R\$12,51 e a RFF R\$40,00. Desta forma, para a produção de uma viga estrutural com perfil I utilizando o adesivo PUR seria gasto R\$ 4,19, para o MUF 4,60 e para o RFF, R\$ 18,38.

QUADRO 21 - QUANTIFICAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA UTILIZADA PARA FABRICAÇÃO DAS VIGAS ESTRUTURAIS.

Vigas	Adesivo / viga				Madeira / viga	
	Formulação	Emenda (g)*	Face (g)	Fresa (g)	Madeira Serrada (m ³)	Painel OSB (m ³)
MLC	RFF	38,06	945,50	-----	0,059	-----
	MUF	30,45	756,40	-----	0,059	-----
	PUR	15,22	378,20	-----	0,059	-----
I-joist	RFF	25,38	378,20	56,00	0,039	0,0043
	MUF	20,30	302,56	44,80	0,039	0,0043
	PUR	10,15	151,28	22,40	0,039	0,0043

* 4 junções por lamela, totalizando 24 junções para MLC e 16 para I-joist

O fator que coloca o adesivo PUR em posição de destaque frente aos demais é o reduzido tempo de cura em temperatura ambiente; enquanto os adesivos tradicionais atingem o tempo de cura em 12 horas, o PUR atinge em 30 minutos, aumentando o rendimento do processo.

Desta forma, destaca-se com base no presente estudo, a utilização do adesivo PUR para a fabricação de vigas estruturais, salientando que devem ser tomados alguns cuidados na sua aplicação como na sua grande velocidade de cura e no poder corrosiva quando em contato com roupas e com a pele. Outro fator que deve ser exposto é a necessidade de equipamento específico para a aplicação do adesivo e a distribuição de desmoldante na prensa para que não ocorra um mecanismo de adesão entre a viga e os pratos da mesma.

O tempo em aberto, ou seja, o tempo desde a aplicação do adesivo até o momento da prensagem deve ser o menor possível para que não ocorra um aumento na viscosidade, passando do momento elástico máximo de aplicação; tendo como consequência a falha penetração do adesivo na madeira e a queda na qualidade da colagem.

Exemplifica-se que em condições de temperatura ambiente de 20°C e a madeira com 12% de umidade tem-se como tempo de início do processo da solidificação de aproximadamente de 8 minutos para o adesivo PUR, o que pode ser uma grande vantagem em processos que contam com equipamentos adequados e grande velocidade de produção, ou desvantagem em outros, pois deve-se aplicar o adesivo e na seqüência realizar a prensagem, caso contrário, perde-se todo o material que está sendo trabalhado. O tempo citado pode ser diminuído ainda mais com o aumento da temperatura ambiente.

Em termos de diferença de resistência entre os dois modelos de viga utilizados no estudo, não foram evidenciadas diferenças estatísticas entre os mesmos para o Módulo de Elasticidade, somente para MOR que apresentou valores médios de 26 MPa para MLC e 16 MPa para Perfil I; sendo assim, as vigas com perfil I apresentam algumas características de destaque frente à MLC como o seu peso em relação à resistência, a quantidade de madeira serrada utilizada, a utilização de chapas de partículas reconstituídas (OSB) e a menor quantidade de adesivo a ser utilizado na sua composição; em contrapartida, tem-se a necessidade de adotar maiores cuidados no decorrer do processamento das vigas como na montagem e o acréscimo de algumas operações como o fresamento das flanges e das chapas.

O Quadro 22 apresenta a quantidade de material utilizado para a fabricação das vigas estruturais com os respectivos custos de aquisição dos produtos sem a incorporação dos impostos como ICMS. Entre os valores relativos à matéria – prima madeira, tem-se conforme informações coletadas em empresas do município de Lages que um metro cúbico de madeira serrada, tem custo aproximado de R\$ 370,00 e uma chapa de OSB de 1,22 X 2,44 m, R\$36,00.

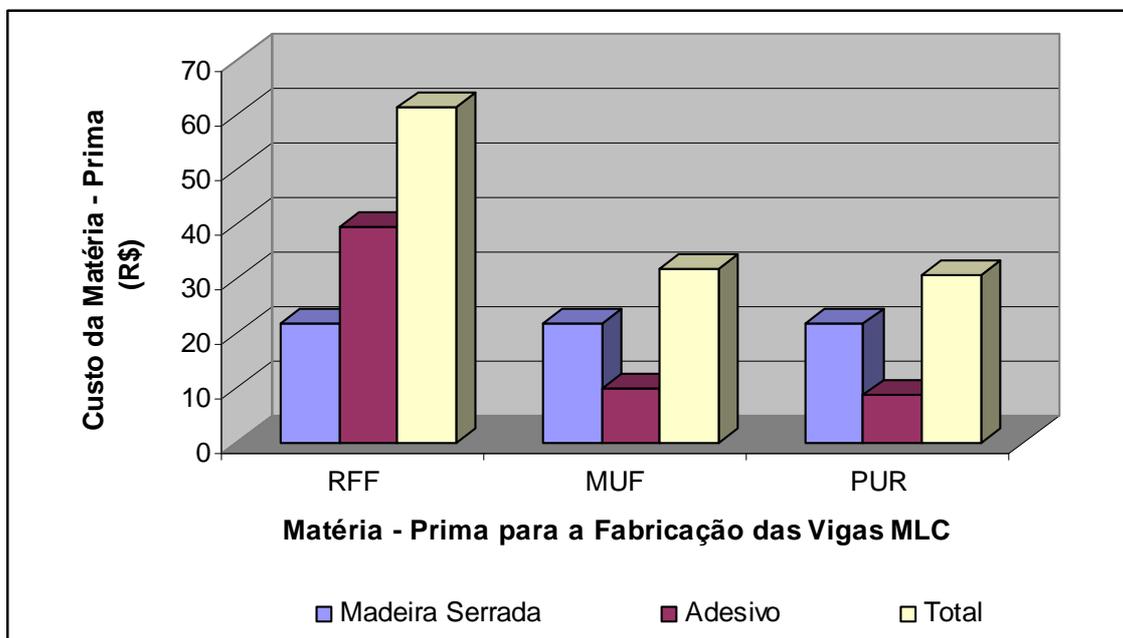
QUADRO 22 - CUSTO PARA A FABRICAÇÃO DAS VIGAS ESTRUTURAIS DE MLC E COM PERFIL I

Vigas	Adesivo / viga			Mad. /viga m ³	MOE MPa	MOR MPa	Custo (R\$ / viga)
	Adesivo	Gramatura (g/m ²)	Peso (g)				
MLC	RFF	500-dupla	983,56	0,059	15.589	26	61,17
	MUF	400-dupla	786,95	0,059	15.463	28	31,67
	PUR	200-simples	383,42	0,059	16.106	26	30,57
I- joist	RFF	500-dupla	459,58	0,043	15.199	13	35,68
	MUF	400-dupla	367,66	0,043	14.888	13	21,89
	PUR	200-simples	183,83	0,043	15.805	23	21,49

Desta forma, pode-se verificar que as vigas que apresentaram maior custo de produção foram as que utilizam o Adesivo Resorcina Fenol Formaldeído, independente do modelo de viga, tendo em vista o custo deste insumo. Sendo assim, observa-se que com a exceção destas vigas, o grupo de vigas estruturais que apresentou os maiores valores de matéria-prima foram as vigas de madeira laminada colada, devido a quantidade e o custo da madeira serrada no mercado nacional.

A Figura 29 apresenta os custos dos materiais utilizados para a produção das Vigas Estruturais de MLC, onde se destaca o custo da madeira, do adesivo e total. O maior custo, em termos de matéria-prima, na formação do composto foi a madeira, apresentando a mesma quantidade em todas as vigas produzidas durante o desenvolvimento do projeto. Dentro do grupo de adesivos, as vigas coladas com resorcina fenol formaldeído apresentam maior custo, seguido da melamina uréica formaldeído e com menor valor as vigas coladas com adesivo poliuretano.

FIGURA 29 - MATÉRIA-PRIMA UTILIZADA PARA A PRODUÇÃO DAS VIGAS MLC.



Na composição das vigas estruturais com perfil I, mantém-se inalterável em termos de quantidade de matéria-prima as peças de madeira serrada e as chapas de OSB, conforme pode ser observado na Figura 30. A variável adesivo, quando comparada com as vigas MLC apresentam-se em menor quantidade e conseqüentemente com menor influência na composição do custo das vigas, da mesma forma pode ser citada a utilização das chapas de OSB que substituem duas camadas de lamelas da vigas de MLC, reduzindo o custo de produção.

FIGURA 30 - MATÉRIA-PRIMA UTILIZADA PARA A PRODUÇÃO DAS VIGAS COM PERFIL I.

