

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos do programa experimental realizado nesta pesquisa. Os respectivos procedimentos de ensaios foram descritos no capítulo 3 - Materiais e Métodos. Os resultados estão apresentados em forma de tabelas onde se encontram os valores mais relevantes para futura análise no capítulo 5.

4.1. Ensaios Preliminares de Flexão Estática

Na tabela 4 estão indicados os resultados dos ensaios preliminares realizados para cada peça individual utilizada para compor as vigas compostas. Foram obtidos três valores de módulo de elasticidade à flexão para cada peça. O resultados indicados na coluna $E_{M, flecha}$ foram obtidos com os pares de força aplicada e o correspondente deslocamento transversal no meio do vão. As colunas $E_{M, ext. sup.}$ e $E_{M, ext. inf.}$ indicam os resultados obtidos de pares de força aplicada e a correspondente deformação específica dos extensômetros superior e inferior respectivamente. Estes resultados de módulo de elasticidade são utilizados para a análise de comportamento das vigas compostas.

Tabela 4: Módulo de elasticidade das peças individuais das vigas compostas.

Viga	Peça	Dimensões (b x h) (cm)	Comp. (cm)	Vão do ensaio (cm)	$E_{M, flecha}$	$E_{M, ext. sup.}$	$E_{M, ext. inf.}$
A1	Mesa Sup.	15,50 x 2,50	380	220	14981	12826	14575
	Alma	5,60 x 15,10		370	21246	24726	27198
	Mesa Inf.	15,50 x 2,50		220	14731	13942	14252
A2	Mesa Sup.	15,50 x 2,50	380	220	15627	17333	17333
	Alma	5,60 x 15,10		370	18247	18377	19427
	Mesa Inf.	15,50 x 2,50		220	15127	14575	18323
A3	Mesa Sup.	15,50 x 2,50	380	220	15881	-----	-----
	Alma	5,60 x 15,10		370	21700	-----	-----
	Mesa Inf.	15,50 x 2,50		220	16895	-----	-----

Viga	Peça	Dimensões (b x h) (cm)	Comp. (cm)	Vão do ensaio (cm)	$E_{M, flecha}$	$E_{M, ext. sup.}$	$E_{M, ext. inf.}$
C1	Mesa Sup.	13,50 x 5,10			10234	10891	10693
	Alma	5,00 x 18,40	400	390	8957	10297	9010
	Mesa Inf.	13,50 x 5,10			8933	8554	9602
C2	Mesa Sup.	13,50 x 5,10			8920	10693	10228
	Alma	5,00 x 18,40	400	390	12143	12910	13515
	Mesa Inf.	13,50 x 5,10			10665	10228	10693
C3	Mesa Sup.	13,50 x 5,10			7546	-----	-----
	Alma	5,00 x 18,40	400	390	9717	-----	-----
	Mesa Inf.	13,50 x 5,10			8316	-----	-----
P1	Mesa Sup.	16,00 x 2,55		150	7750	9787	8775
	Alma	5,80 x 15,80	310	300	12903	13891	13260
	Mesa Inf.	16,00 x 2,55		150	7507	8209	8209
P2	Mesa Sup.	15,50 x 5,30			11050	11160	10739
	Alma	5,65 x 18,90	400	390	8831	7955	9966
	Mesa Inf.	15,50 x 5,30			9785	10163	11160
P3	Mesa Sup.	15,00 x 5,05			7081	7657	5016
	Alma	5,65 x 19,65	400	390	8208	8177	9744
	Mesa Inf.	15,00 x 5,05			7794	11767	11335

4.2. Ensaio das Vigas Compostas

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios das nove vigas compostas, em forma de tabelas. Os valores de força aplicada são indicados na primeira coluna. As respectivas leituras de deformações específicas dos extensômetros são indicadas nas colunas (Ext.1,2,3,4,5 e 6). Os valores com sinal (-) indicam compressão. O deslizamento máximo entre as peças é indicado na coluna (Rel.1), e a flecha na coluna (Rel. 2). A partir de certo valor da força aplicada, com o intuito de evitar danos, os relógios comparadores foram retirados e as leituras de flecha foram registradas por meio de régua posicionada na lateral da viga no centro do vão. Ao final de cada tabela encontra-se o valor de ruptura das vigas.

Tabela 7: Resultados do ensaio de flexão da viga A3.

Viga A3 – Angelim Pedra Verdadeiro			
Força (kN)	Rel. 1 (mm/100)	Rel. 2 (mm/100)	Régua (mm)
0	0	0	0
2,16	1	190	-----
4,33	2	360	-----
6,49	4	515	-----
8,66	5	675	-----
10,82	6	840	-----
12,99	8	1010	-----
15,15	10	1180	-----
17,32	12	1350	-----
19,48	15	1530	-----
21,65	19	1720	-----
23,81	25	1925	-----
25,98	31	2130	-----
28,14	37	2350	-----
30,30	-----	-----	25
32,47	-----	-----	28
34,63	-----	-----	30
36,80	-----	-----	32
38,96	-----	-----	34
41,13	-----	-----	36
43,29	-----	-----	40
45,46	-----	-----	43
47,62	-----	-----	45
49,79	-----	-----	48
51,95	-----	-----	53
54,12	-----	-----	56
56,28	-----	-----	60
58,44	-----	-----	63
60,61	-----	-----	68
62,77	-----	-----	72
64,94	-----	-----	78
67,10	-----	-----	82
69,27	-----	-----	88
73,60		Ruptura	

Tabela 8: Resultados do ensaio de flexão da viga C1.

Viga C1 - Cedrilho										
Força (kN)	Ext. 1 ($\mu\epsilon$)	Ext. 2 ($\mu\epsilon$)	Ext. 3 ($\mu\epsilon$)	Ext. 4 ($\mu\epsilon$)	Ext. 5 ($\mu\epsilon$)	Ext. 6 ($\mu\epsilon$)	Rel. 1 (mm/100)	Rel. 2 (mm/100)	Régua (mm)	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4,33	-160	-100	-110	130	130	180	3	280	-----	
8,66	-310	-190	-200	250	240	350	8	595	-----	
12,99	-460	-290	-300	380	350	510	18	940	-----	
17,32	-620	-380	-410	520	460	690	29	1395	-----	
21,65	-780	-490	-520	660	580	850	43	1670	-----	
25,98	-930	-590	-650	810	690	1010	60	2090	-----	
30,30	-1110	-680	-780	970	780	1150	94	2525	-----	
34,63	-1250	-780	-950	1180	860	1340	-----	-----	32	
38,96	-1410	-830	-1160	1410	960	1500	-----	-----	38	
43,29	-1590	-880	-1430	1710	1000	1700	-----	-----	50	
47,62	-1750	-880	-1750	2000	1030	1870	-----	-----	60	
51,95	-1910	-850	-2100	2350	1030	2050	-----	-----	67	
56,28	-2100	-850	-2280	2730	990	2220	-----	-----	83	
60,61	-2280	-820	-3050	3060	870	2350	-----	-----	93	
70,89					Ruptura					

Tabela 9: Resultados do ensaio de flexão da viga C2.

Viga C2 – Cedrilho									
Força (kN)	Ext. 1 ($\mu\epsilon$)	Ext. 2 ($\mu\epsilon$)	Ext. 3 ($\mu\epsilon$)	Ext. 4 ($\mu\epsilon$)	Ext. 5 ($\mu\epsilon$)	Ext. 6 ($\mu\epsilon$)	Rel. 1 (mm/100)	Rel. 2 (mm/100)	Régua (mm)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4,33	-200	-100	-100	130	130	180	2	300	-----
8,66	-350	-200	-200	250	250	330	6	613	-----
12,99	-500	-330	-330	380	380	480	14	945	-----
17,32	-630	-430	-430	500	450	630	23	1290	-----
21,65	-800	-500	-550	650	550	750	36	1658	-----
25,98	-980	-630	-700	800	650	900	54	2055	-----
30,30	-1130	-750	-850	930	750	1050	88	2600	-----
34,63	-1330	-880	-1000	1080	880	1180	-----	-----	34
38,96	-1500	-930	-1150	1230	980	1380	-----	-----	41
43,29	-1650	-1000	-1330	1400	1050	1500	-----	-----	47
47,62	-1850	-1100	-1550	1600	1130	1650	-----	-----	59
51,95	-2000	-1180	-1850	1880	1230	1800	-----	-----	69
56,28	-2230	-1230	-2100	2100	1300	2000	-----	-----	80
60,61	-2400	-1250	-2400	2350	1380	2130	-----	-----	-----
63,86					Ruptura				

Tabela 10: Resultados do ensaio de flexão da viga C3.

Viga C3 - Cedrilho			
Força (kN)	Rel. 1 (mm/100)	Rel. 2 (mm/100)	Régua (mm)
0	0	0	0
4,33	2	330	-----
8,66	5	665	-----
12,99	13	1030	-----
17,32	22	1400	-----
21,65	32	1800	-----
25,98	43	2200	-----
30,30	65	2720	-----
34,63	-----	-----	34
38,96	-----	-----	38
43,29	-----	-----	46
47,62	-----	-----	54
51,95	-----	-----	63
54,12	-----	-----	70
58,44	-----	-----	76
62,77	-----	-----	80
63,31		Ruptura	

Tabela 11: Resultados do ensaio de flexão da viga P1.

Viga P1 – Pinus Hondurensis								
Força (kN)	Ext. 1 ($\mu\epsilon$)	Ext. 2 ($\mu\epsilon$)	Ext. 3 ($\mu\epsilon$)	Ext. 4 ($\mu\epsilon$)	Ext. 5 ($\mu\epsilon$)	Ext. 6 ($\mu\epsilon$)	Rel. 1 (mm/100)	Rel. 2 (mm/100)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
2,16	-120	-120	-120	140	140	170	0	170
4,33	-240	-190	-220	240	240	310	2	350
6,49	-360	-310	-340	360	340	430	5	530
8,66	-460	-380	-460	500	460	550	9	730
10,82	-600	-530	-580	620	580	700	12	900
12,99	-720	-650	-670	740	670	820	15	1065
15,15	-820	-740	-820	860	770	940	20	1250
17,32	-960	-860	-960	1030	910	1080	22	1440
19,48	-1080	-980	-1080	1180	1000	1200	30	1660
21,65	-1200	-1080	-1200	1320	1100	1340	40	1900
25,98	-1420	-1300	-1510	1680	1320	1610	65	2405
30,30	-1680	-1540	-1870	2040	1540	1870	94	2970
34,63	-1880	-1680	-2280	2450	1680	2110	135	3641
38,96	-2110	-1900	-2740	2880	Ruptura		190	4474

Tabela 12: Resultados do ensaio de flexão da viga P2.

Viga P2 – Pinus Hondurensis								
Força (kN)	Ext. 1 (μ€)	Ext. 2 (μ€)	Ext. 3 (μ€)	Ext. 4 (μ€)	Ext. 5 (μ€)	Ext. 6 (μ€)	Rel. 1 (mm/100)	Rel. 2 (mm/100)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
2,16	-80	-40	-40	50	50	70	0	121
4,33	-140	-80	-80	100	100	130	2	238
6,49	-200	-130	-130	150	150	190	7	371
8,66	-250	-170	-170	200	180	250	12	517
10,82	-320	-200	-220	260	220	300	17	662
12,99	-390	-250	-280	320	260	360	22	816
15,15	-450	-300	-340	370	300	420	27	986
17,32	-530	-350	-400	430	350	470	32	1118
19,48	-600	-370	-460	490	390	550	37	1268
21,65	-660	-400	-530	560	420	600	44	1430
23,81	-740	-440	-620	640	450	660	55	1640
25,98	-800	-470	-740	750	490	720	-----	-----
28,14	-890	-490	-840	840	520	800	-----	-----
30,30	-960	-500	-960	940	550	850	-----	-----
32,47	-1000	-540	-1050	1000	550	900	-----	-----
34,63	-1100	-550	-1200	1140	600	970	-----	-----
36,80	-1190	-550	-1350	1250	600	1050	-----	-----
38,96	-1260	-550	-1520	1400	600	1120	-----	-----
41,13	-1350	-550	-1700	1550	600	1200	-----	-----
43,29	-1420	-550	-1850	1680	640	1250	-----	-----
45,46	-1500	-540	-2050	1850	630	1340	-----	-----
47,62	-1600	-----	-2250	2000	620	1400	-----	-----
49,79	-1680	-----	-2500	2200	600	1500	-----	-----
51,95	-1750	-----	-2650	2350	600	1580	-----	-----
54,12	-1820	-----	-2850	2550	600	1600	-----	-----
56,28	-1930	-----	-3080	2760	600	1730	-----	-----
58,44	-2020	-----	-3700	3000	600	1800	-----	-----
60,61	-2100	-----	-3500	3200	600	1900	-----	-----
61,69								

Ruptura

Tabela 13: Resultados do ensaio de flexão da viga P3.

Viga P3 – Pinus Hondurensis									
Força (kN)	Ext. 1 ($\mu\epsilon$)	Ext. 2 ($\mu\epsilon$)	Ext. 3 ($\mu\epsilon$)	Ext. 4 ($\mu\epsilon$)	Ext. 5 ($\mu\epsilon$)	Ext. 6 ($\mu\epsilon$)	Rel. 1 (mm/100)	Rel. 2 (mm/100)	Régua (mm)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2,16	-110	-110	-80	40	40	70	0	145	-----
4,33	-210	-200	-140	80	80	130	0	272	-----
6,49	-300	-290	-210	120	120	190	1	400	-----
8,66	-390	-370	-280	150	160	250	2	530	-----
10,82	-480	-460	-340	190	200	310	3	660	-----
12,99	-580	-560	-410	230	240	370	5	795	-----
15,15	-670	-650	-480	270	270	430	8	935	-----
17,32	-770	-740	-550	310	310	490	11	1075	-----
19,48	-850	-830	-620	340	350	550	13	1215	-----
21,65	-950	-940	-690	380	380	610	17	1350	-----
23,81	-1020	-1050	-770	430	420	670	24	1530	-----
25,98	-1100	-1180	-840	470	460	730	30	1700	-----
28,14	-1190	-1300	-920	510	500	790	36	1875	-----
30,30	-1290	-1410	-980	560	530	850	43	2040	-----
32,47	-1390	-1530	-1060	600	570	910	50	2220	-----
34,63	-1490	-1640	-1130	650	610	980	58	-----	24
36,80	-1600	-1770	-1210	690	650	1040	-----	-----	26
38,96	-1700	-1870	-1280	730	680	1100	-----	-----	28
41,13	-1800	-1980	-1360	780	720	1160	-----	-----	29
55,74									Ruptura

4.3. Ensaio de Caracterização da Madeira

Neste item são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização das peças de madeira. Após a realização dos ensaios de flexão das vigas compostas foram extraídos os corpos-de-prova para a caracterização de cada peça. As tabelas indicam os valores médios e os respectivos coeficientes de variação obtidos em uma série de seis ensaios. Os valores de rigidez e resistência não foram corrigidos para a umidade padrão de 12%, para efeito de comparação na análise das vigas.

Tabela 14: Médias e coeficiente de variação (%) - Angelim Pedra Verdadeiro.

Prop.	Vigas de Angelim Pedra Verdadeiro					
	A1		A2		A3	
	Alma	Mesas	Alma	Mesas	Alma	Mesas
U (%)	14,6 (2,5%)	16,3 (2,6%)	14,2 (3,2%)	13,0 (4,3%)	13,9 (3,2%)	14,0 (2,3%)
$\rho_{ap, verde}$ (kg/m ³)	1070 (2,0%)	985 (1,2%)	1157 (1,2%)	1068 (0,7%)	1110 (1,6%)	1073 (0,8%)
$\rho_{ap (12\%)}$ (kg/m ³)	1070 (2,0%)	983 (1,2%)	1157 (1,2%)	1068 (0,7%)	1110 (1,6%)	1073 (0,8%)
f_{c0} (MPa)	87,1 (4,6%)	66,9 (4,2%)	76,9 (7,8%)	68,3 (3,2%)	73,3 (1,8%)	72,1 (10,4%)
f_{t0} (MPa)	77,9 (10,4%)	80,3 (18,9%)	86,1 (17,9%)	99,1 (10,5%)	79,1 (16,7%)	72,6 (16,6%)
f_v (MPa)	15,5 (9,3%)	-----	21,2 (13,5%)	-----	19,1 (7,5%)	-----
E_{c0} (MPa)	26496 (9,0%)	16951 (5,8%)	20626 (12,9%)	18413 (10,4%)	21307 (12,7%)	23273 (10,9%)
E_{t0} (MPa)	19309 (7,4%)	16180 (18,4%)	16631 (15,7%)	18968 (7,7%)	17334 (12,1%)	18358 (11,1%)

Tabela15: Médias e coeficiente de variação (%) - Cedrilho.

Prop.	Vigas de Cedrilho								
	C1			C2			C3		
	Mesa Sup.	Alma	Mesa Inf.	Mesa Sup.	Alma	Mesa Inf.	Mesa Sup.	Alma	Mesa Inf.
U (%)	26,8 (3,2%)	24,9 (8,8%)	46,7 (2,2%)	39,1 (3,0%)	20,2 (5,7%)	23,8 (1,7%)	17,3 (6,4%)	18,0 (3,9%)	16,7 (9,5%)
$\rho_{ap, verde}$ (kg/m ³)	720 (1,0%)	680 (2,9%)	770 (0,7%)	725 (0,8%)	558 (1,3%)	677 (1,8%)	577 (2,6%)	660 (2,5%)	572 (3,7%)
$\rho_{ap (12\%)}$ (kg/m ³)	670 (0,9%)	640 (1,2%)	655 (1,6%)	715 (0,7%)	533 (1,5%)	657 (1,8%)	562 (2,1%)	645 (1,9%)	557 (4,0%)
f_{c0} (MPa)	39,0 (7,7%)	29,4 (6,4%)	36,7 (10,5%)	31,2 (7,7%)	25,6 (0,9%)	33,3 (3,3%)	31,5 (2,7%)	30,4 (9,8%)	33,6 (5,9%)
f_{t0} (MPa)	67,7 (14,5%)	50,3 (17,3%)	66,3 (16,5%)	75,5 (9,4%)	54,8 (1,7%)	96,1 (4,7%)	40,3 (17,0%)	65,1 (7,2%)	46,0 (10,1%)
f_v (MPa)	-----	8,3 (12,9%)	-----	-----	6,3 (15,9%)	-----	-----	8,3 (9,7%)	-----
E_{c0} (MPa)	10820 (7,8%)	9130 (11,8%)	9594 (15,5%)	10446 (13,8%)	12323 (4,6%)	11664 (8,0%)	9517 (10,6%)	9109 (14,1%)	9917 (15,2%)
E_{t0} (MPa)	10513 (7,3%)	8721 (15,1%)	9202 (12,9%)	9801 (7,9%)	11680 (3,2%)	11686 (5,8%)	7570 (10,4%)	11832 (11,6%)	8536 (8,7%)

Tabela 16: Médias e coeficiente de variação (%) - Pinus Hondurensis.

Prop.	Vigas de Pinus Hondurensis							
	P1		P2			P3		
	Alma	Mesas	Mesa Sup.	Alma	Mesa Inf.	Mesa Sup.	Alma	Mesa Inf.
U (%)	21,5 (2,1%)	17,1 (1,4%)	15,7 (1,6%)	14,4 (3,8%)	14,3 (0,6%)	13,8 (1,9%)	14,4 (3,0%)	14,2 (5,0%)
$\rho_{\text{ap, verde}}$ (kg/m ³)	522 (3,0%)	525 (2,6%)	551 (1,5%)	481 (1,2%)	457 (0,8%)	493 (1,4%)	511 (0,9%)	506 (0,5%)
$\rho_{\text{ap}} (12\%)$ (kg/m ³)	500 (0,6%)	510 (1,2%)	530 (1,4%)	456 (0,8%)	448 (1,9%)	493 (2,6%)	511 (1,6%)	506 (2,7%)
f_{c0} (MPa)	35,0 (5,3%)	39,9 (1,4%)	40,4 (10,2%)	32,0 (5,4%)	36,0 (4,0%)	34,3 (2,7%)	33,9 (4,2%)	33,9 (11,2%)
f_{t0} (MPa)	48,5 (13,4%)	60,3 (3,0%)	75,1 (2,8%)	68,7 (14,1%)	52,5 (9,8%)	83,5 (11,4%)	58,3 (16,7%)	74,3 (15,8%)
f_v (MPa)	8,7 (10,8%)	-----	-----	9,3 (7,2%)	-----	-----	10,3 (15,6%)	-----
E_{c0} (MPa)	10930 (4,0%)	12518 (3,2%)	13280 (7,1%)	12160 (5,2%)	10738 (12,1%)	11323 (10,6%)	9526 (11,5%)	9852 (16,9%)
E_{t0} (MPa)	10433 (12,8%)	13146 (8,0%)	15457 (9,6%)	9727 (3,8%)	9064 (15,1%)	12036 (6,8%)	9479 (18,6%)	13674 (5,4%)

4.4. Ensaios de Ligações

Nas tabelas 17, 18 e 19 são apresentados os valores de módulo de deslizamento (K), resistência máxima (R_u) e resistência convencional ($R_{2\%}$) dos corpos-de-prova de ligação.

Os ensaios de ligação para as vigas A1, A2 e A3 foram conduzidos em corpos-de-prova tipo 2 e carregamento aplicado com dois ciclos de carga e descarga, definido pelos níveis de 10% e 50% da resistência máxima. Os ensaios para as vigas C1, C2 e C3 foram conduzidos em corpos-de-prova tipo 1 e carregamento aplicado com dois ciclos de carga e descarga, definido pelos níveis de 5% e 25% da resistência máxima.

Os ensaios para a viga P2 foram conduzidos em corpos-de-prova tipo 2 e carregamento aplicado sem ciclo. Já para as vigas P1 e P3 foram utilizados corpos-de-prova tipo 1 e carregamento aplicado com dois ciclos de carga e descarga, sendo definido pelos níveis de 10% e 50% da resistência máxima para viga P1 e 5% e 25% para a viga P3.

Tabela 17: Resultados dos ensaios de ligação de Angelim Pedra Verdadeiro.

Viga	Angelim Pedra Verdadeiro			
	CP	K (N/mm)	R _u (N)	R _{2%} (N)
A1	1	10526	5000	2500
	2	10000	4930	2600
	3	11111	5500	2500
	4	11765	5000	2600
	Média	10850	5110	2550
A2	1	9524	6550	2550
	2	8000	6350	2600
	3	15385	5300	2560
	Média	10970	6070	2570
A3	1	15385	5920	2500
	2	17391	6150	2650
	3	8889	5500	2500
	4	11765	6250	2600
	Média	13358	6000	2560

Tabela 18: Resultados dos ensaios de ligação de Cedrilho.

Viga	Cedrilho			
	CP	K (N/mm)	R _u (N)	R _{2%} (N)
C1	1	36000	6830	2350
	2	36000	7350	2750
	3	22500	6500	2350
	4	20000	6120	2250
	Média	28625	6700	2420
C2	1	25714	6750	2350
	2	36000	6620	2250
	3	12857	6500	2500
	4	18000	6380	2150
	Média	23143	6560	2310
C3	1	11250	7100	2700
	2	25714	6430	2400
	3	22500	6220	2250
	Média	19820	6580	2450

Tabela 19: Resultados dos ensaios de ligação de *Pinus Hondurensis*.

Viga	Pinus Hondurensis			
	CP	K (N/mm)	R _u (N)	R _{2%} (N)
P1	1	6061	3000	1750
	2	4762	2500	1600
	3	5000	2500	1550
	Média	5274	2670	1630
P2	1	1633	4050	2400
	2	2319	3700	2000
	3	3137	4020	2200
	Média	2363	3920	2200
P3	1	11250	3370	1750
	2	11250	4700	1800
	3	7105	3350	1750
	4	12000	3450	1800
	Média	10401	3710	1780

4.5. Ensaio dos Pregos

Na tabela 20 estão indicados os resultados de tensão de escoamento (f_y) e resistência máxima (f_u) do aço dos pregos determinados por ensaio de tração simples seguindo os procedimentos descritos no item 3.8 do capítulo Materiais e Métodos.

Tabela 20: Resultados dos ensaios de tração dos pregos.

CP	f_y (MPa)	f_u (MPa)
1	780	920
2	680	889
3	745	902
Média	735	903