



Dissertação

Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas

***Avaliação da Resistência de Vigas de
Madeira Lamelada Colada de Pinheiro Bravo***

Daniel Monteiro Gomes

Leiria, Outubro de 2013



Dissertação

Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas

***Avaliação da Resistência de Vigas de
Madeira Lamelada Colada de Pinheiro Bravo***

Daniel Monteiro Gomes

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor Florindo José Mendes Gaspar, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e co-orientação do Doutor Rui Miguel Barreiros Ruben, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, Outubro de 2013

Agradecimentos

Agradeço, do fundo do coração, a todas as pessoas que me ajudaram e aconselharam ao longo da elaboração desta dissertação, especialmente:

Ao Prof. Dr. Florindo Gaspar, por me ter ensinado a fazer ciência e pelo conhecimento que me transmitiu, tanto geral, como sobre madeira como material estrutural. Agradeço a paciência inesgotável e a disponibilidade constante;

Ao Prof. Dr. Rui Ruben, pela disponibilidade e pela ajuda preciosa na elaboração dos modelos de elementos finitos, sem a qual esta dissertação não teria sido possível;

À Dra. Sandra Alves, por me ouvir. Por ter estado lá sempre que eu precisei. Por me ter tornado uma pessoa melhor;

À minha família, José, Elisabete e Diana, por me encorajarem, pelo apoio e por terem tornado esta dissertação possível;

Aos amigos e companheiros de jornada, Pedro, David, Gisela, Ana Rita e Marta.

Esta página foi deixada intencionalmente em branco.

Resumo

Ao longo dos anos, têm sido desenvolvidos vários modelos para prever a resistência de uma viga de madeira lamelada colada a partir das propriedades mecânicas das lamelas, desde os empíricos aos numéricos estocásticos.

A presente dissertação pretende estudar se o uso de informação detalhada acerca das propriedades mecânicas das lamelas permite com maior exatidão prever a resistência de uma viga de madeira lamelada colada que outros modelos já existentes. Para estudar esta hipótese, usou-se os dados provenientes de estudos anteriores de Gaspar (2006, 2010) sobre a viabilidade da aplicação de madeira de pinheiro bravo (*pinus pinaster* Ait.) tratada com produto preservador em estruturas de madeira lamelada colada. Este autor mediu o módulo de elasticidade longitudinal das lamelas em vários pontos, cujos dados foram aplicados em modelos de elementos finitos 3D e foram sujeitos a tratamento estatístico no presente estudo.

A modelação das vigas mostrou que, em vigas de lamelado colado de pinheiro bravo sujeitas a flexão, se atinge a rotura na lamela exterior à compressão antes de a viga romper na lamela exterior à tração.

Uma análise de componentes principais veio a mostrar que a presença de ligações de entalhes múltiplos (LEM) nas zonas de maior tração é o fator mais condicionante e limita significativamente a resistência de uma viga, constituindo um ponto mais fraco que os defeitos da madeira. Este fenómeno agrava-se com a presença de tratamento preservador na madeira, suspeitando-se que a cola usada tenha um papel na falta de resistência das LEM.

A lamela exterior comprimida nas vigas de pinheiro bravo tem maior influência na resistência da viga que o módulo de elasticidade da lamela tracionada, contrariando alguns modelos que apenas consideram a lamela tracionada como sendo condicionante para a resistência.

Uma simulação de Monte-Carlo mostra que o uso da classificação visual da NP 4305 (1995) nas lamelas de pinheiro bravo resulta em vigas de lamelado colado com resistência compatível com as classes de resistência da NP EN 1194 (2002).

Palavras-chave: previsão de resistência, pinheiro bravo, lamelado colado, flexão, MEF

Abstract

Several bending strength prediction models for glulam beams have been developed throughout the years using the laminations' mechanical properties as input, ranging from empirical to stochastic.

The object of this dissertation is to determine whether detailed mechanical properties of the laminations beam allow a more accurate prediction of a glued laminated beam's strength than existing models. In order to study this further, previous studies on treated maritime pine (*pinus pinaster* Ait.) applicability in glulam beams (Gaspar 2006, 2010) were used. The author measured the modulus of elasticity (MOE) of all the laminations at several points along their length. This data was used to model glulam beams using the 3D finite elements and was subject to statistical analysis.

Study of the modeled beams under bending showed that the compressed outer lamination yields first. Only after that does the tensioned outer lamination crack, resulting in beam failure.

Principal component analysis show that having finger-joints (FJ) in the most tensioned areas of the beam affects beam strength the most, also limiting it significantly. FJ are weaker than wood defects in the outer laminations. This effect worsens in heavily treated wood, which leads to believe that the type of glue used affects FJ strength.

The compressed outer lamination has a bigger influence on beam strength than the tensioned outer lamination, disproving some strength prediction models which consider only the tension lamination as critical.

A Monte-Carlo simulation showed that visual grading of maritime pine laminations using the NP 4305 (1995) standard results in glulam beam compatible with NP EN 1194 (2002) strength classes.

Keywords: strength prediction, maritime pine, glulam, bending, finite element

Esta página foi deixada intencionalmente em branco

Índice de Figuras

Figura 1: Tipos de rotura à flexão de madeira maciça sem defeitos	4
Figura 2: Tipos de rotura de madeira maciça à flexão causada por nós	4
Figura 3: Modos de propagação de fenda.....	4
Figura 4: Distribuição de tensões a meio vão de uma viga com uma zona fraca	11
Figura 5: Vizinhança de uma célula que entrou em rotura (célula a escuro).	19
Figura 6: Esquema do ensaio de flexão.	25
Figura 7: Sumário gráfico da tensão de rotura das vigas.....	27
Figura 8: Elemento finito 3D de 8 nós.	28
Figura 9: Elemento finito 3D de 20 nós.	28
Figura 10: Elemento finito linear de integração completa sob flexão pura.	30
Figura 11: Elemento finito quadrático de integração completa sob flexão pura.	30
Figura 12: Disposição geométrica dos modelos das vigas sem tratamento (C)	35
Figura 13: Disposição geométrica dos modelos das vigas com tratamento A	36
Figura 14: Disposição geométrica dos modelos das vigas com tratamento B	37
Figura 15: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VCP1a	43
Figura 16: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VCP1b	44
Figura 17: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VCP1c	45
Figura 18: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VCP2a	46
Figura 19: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VCP2b	47
Figura 20: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VCP2c	48

Figura 21: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VCP3a	49
Figura 22: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VCP3b	50
Figura 23: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VCP3c	51
Figura 24: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VAP1a	53
Figura 25: Mapa do critério de Hill da VAP1a sem LEM na L1	54
Figura 26: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VAP1b	55
Figura 27: Tensão tangencial S12 no topo da L3-VAP1b	55
Figura 28: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VAP1c	56
Figura 29: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VAP2a	57
Figura 30: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VAP2b	58
Figura 31: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VAP2c	59
Figura 32: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VAP3a	60
Figura 33: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VAP3b	61
Figura 34: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VAP3c	62
Figura 35: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VBP1a	64
Figura 36: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VBP1b	65
Figura 37: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VBP1c	66
Figura 38: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VBP2a	67

Figura 39: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VBP2b	68
Figura 40: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VBP2c	69
Figura 41: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VBP3a	70
Figura 42: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VBP3b	71
Figura 43: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VBP3c	72
Figura 44: Tensão S22 no topo da lamela L4 da VCP1a.....	74
Figura 45: Tensão S11 na zona superior da L5 da VAP2a.....	75
Figura 46: Tensão S11 na junta L4L5 da VAP2a.....	75
Figura 47: ACP de todas as variáveis identificadas	76
Figura 48: ACP – nível de tratamento preservador	77
Figura 49: ACP – influência do módulo de elasticidade médio das lamelas na rotura ..	78
Figura 50: Regressão por PLSR	79

Esta página foi deixada intencionalmente em branco

Índice de Quadros

Quadro 1: Determinação das propriedades mecânicas da madeira lamelada colada segundo a NP EN 1194 (2002).....	16
Quadro 2: Exemplos de constituição de vigas de lamelado colado de acordo com a NP EN 1194 (2002).....	17
Quadro 3: Quantidades percentuais das classes de qualidade para cada nível de tratamento.....	24
Quadro 4: Teste de diferentes tipos de elemento finitos e abertura de malha.....	29
Quadro 5: Relações entre as restantes tensões de rotura e f_m	39
Quadro 6: Comparação entre módulos de elasticidade e força de rotura - vigas C.....	52
Quadro 7: Comparação entre módulos de elasticidade e força de rotura - vigas A.....	63
Quadro 8: Comparação entre módulos de elasticidade e força de rotura - vigas B.....	73
Quadro 9: Coeficiente de determinação das matrizes de regressão por PLSR.....	79
Quadro 10: Resultados da simulação de Monte Carlo.....	80

Esta página foi deixada intencionalmente em branco.

Lista de Siglas

ACP – análise de componentes principais

ACQ – *alkaline copper quat*

b – largura da secção

C3D8 – elemento finito paralelepípedo de 8 nós, integração completa

C3D8R – elemento finito paralelepípedo de 8 nós, integração reduzida

C3D20 – elemento finito paralelepípedo de 20 nós, integração completa

C3D20R – elemento finito paralelepípedo de 20 nós, integração reduzida

CA – azóis de cobre

CCA – cobre-crómio-arsénio

e – espessura da lamela

F – força de rotura

f_b – tensão de rotura à flexão de dimensionamento

f_{c,0} – tensão de rotura à compressão paralela ao fio

f_{c,90} – tensão de rotura à compressão perpendicular ao fio

f_{t,j,k} – tensão de rotura característica das ligações de topo à tração;

f_m – tensão de rotura à flexão

f_{m,g} - tensão de rotura à uma viga de madeira lamelada colada

f_{m,g,k} - tensão de rotura característica à flexão de uma viga de madeira lamelada colada

f_{m,k} – tensão de rotura característica à flexão

f_{m,médio} – tensão de rotura médio à flexão

f_{m,j,k} – tensão de rotura característica das ligações de topo à flexão;

f_{t,0} – tensão de rotura à tração paralela ao fio

f_{t,90} – tensão de rotura à tração perpendicular ao fio

f_{t,0,l} - tensão de rotura à tração da lamela exterior

f_{t,0,l,k} - tensão de rotura característica à tração da lamela exterior

f_{t,0,j} – tensão de rotura à tração da ligação de topo

f_{t,0,l,k} – tensão de rotura característica das lamelas à tração.

f_v – tensão de rotura ao corte
 E – módulo de elasticidade
 E_0 – módulo de elasticidade paralelo ao fio
 E_{90} – módulo de elasticidade perpendicular ao fio
 $E_{0,l,mean}$ - módulo de elasticidade paralelo ao fio médio da lamela exterior
 E_L – módulo de elasticidade longitudinal
 E_R – módulo de elasticidade radial
 E_T – módulo de elasticidade tangencial
 G_c – energia de fratura
 G_{LR} – módulo de distorção longitudinal - radial
 G_{LT} – módulo de distorção longitudinal - tangencial
 G_{RT} – módulo de distorção radial- tangencial
 h – altura da viga
 I_K – momento de inércia dos nós na secção crítica
 I_G – momento de inércia da secção bruta
 k_h – fator de efeito de volume
 k_{size} – fator de escala
 KAR – knot area ratio
 LEM – ligação de entalhes múltiplos
 Li – lamela i , $i \in [1,5]$
 $LiLj$ – junta de colagem longitudinal, entre a lamela i e a lamela j , $i, j \in [1,5]$, $i \neq j$
 PCA – ver ACP
 PRF – fenol-resorcinol-formol
 $PLSR$ – regressão por mínimos quadrados parciais (*partial least squares regression*)
 $S11$ – tensão normal segundo o eixo 1-1 da viga (longitudinal)
 $S11,c$ – tensão normal, de rotura, segundo o eixo 1-1 da viga (longitudinal)
 $S12$ – tensão tangencial (corte) segundo o plano 1-2 da viga
 $S12,c$ – tensão tangencial de rotura, (corte) segundo o plano 1-2 da viga
 $S13$ – tensão tangencial (corte) segundo o plano 1-3 da viga
 $S13,c$ – tensão tangencial, de rotura, (corte) segundo o plano 1-3 da viga
 $S22$ – tensão normal segundo o eixo 2-2 da viga (vertical)
 $S22,c$ – tensão normal de rotura, segundo o plano 2-2 da viga (vertical)
 $S23$ – tensão tangencial (corte) segundo o plano 2-3 da viga
 $S23,c$ – tensão tangencial de rotura, (corte) segundo o plano 2-3 da viga

S_{33} – tensão normal segundo o eixo 3-3 da viga (ao longo da largura)

$S_{33,c}$ – tensão normal de rotura, segundo o eixo 3-3 da viga (ao longo da largura)

SI_b – valor da tensão resistente à flexão da madeira sem defeitos (*stress index, bending*)

SMF_b – fator de modificação da tensão (*stress modification factor*).

λ – efeito de homogeneização

σ – tensão de Hill

σ_{crit} – tensão crítica de Petersson

ν – coeficiente de Poisson

ν_{LR} – coeficiente de Poisson longitudinal - radial

ν_{LT} – coeficiente de Poisson longitudinal - tangencial

ν_{RT} – coeficiente de Poisson radial- tangencial

Esta página foi deixada intencionalmente em branco

Índice

DEDICATÓRIA	I
AGRADECIMENTOS	I
RESUMO.....	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE QUADROS	XI
LISTA DE SIGLAS.....	XIII
ÍNDICE.....	XVII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO	1
1.2 OBJETIVO	2
1.3 ESTRUTURA	2
2 REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1 FATORES QUE AFETAM A RESISTÊNCIA DOS LAMELADOS COLADOS	3
2.1.1 Generalidades	3
2.1.2 Madeira lamelada colada.....	5
2.1.2.1 Disposição e módulo de elasticidade das lamelas.....	5
2.1.2.2 Ligações de topo e espessura das lamelas.....	6
2.1.2.3 Efeito de volume e distribuição de tensões.....	8
2.1.2.4 Efeito da distribuição de tensões na secção transversal.....	9
2.1.3 Efeito de homogeneização em lamelados colados	9
2.1.3.1 Efeito de dispersão.....	10
2.1.3.2 Efeito da tensão de tração	10
2.1.3.3 Efeito de reforço	10
2.1.3.4 Dependência da espécie.....	12
2.1.3.5 Quantificação do efeito de homogeneização.....	12
2.2 PREVISÃO DA RESISTÊNCIA.....	13
2.2.1 Norma americana ASTM D 3737-04.....	13
2.2.2 Norma portuguesa NP EN 1194:2002.....	14
2.2.2.1 Conformidade baseada em ensaios	15
2.2.2.2 Conformidade baseada em cálculos	15
2.2.3 Homogeneização da secção.....	17

2.2.4	Modelos de elementos finitos.....	17
2.2.5	Análise estatística das propriedades mecânicas das lamelas.....	20
3	AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE VIGAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA.....	23
3.1	TRABALHOS EXPERIMENTAIS REALIZADOS ANTERIORMENTE.....	23
3.1.1	Generalidades.....	23
3.1.2	Matéria-prima.....	23
3.1.3	Fabrico.....	24
3.1.4	Ensaio de flexão das vigas.....	25
3.2	MODELAÇÃO NUMÉRICA.....	28
3.2.1	Método dos elementos finitos.....	28
3.2.1.1	<i>Escolha do tipo de elementos finitos.....</i>	<i>28</i>
3.2.1.2	<i>Ortotropia.....</i>	<i>31</i>
3.2.1.3	<i>Limitação de concentração de tensões.....</i>	<i>32</i>
3.2.1.4	<i>Modelo final.....</i>	<i>32</i>
3.2.2	Dados de entrada dos modelos.....	33
3.2.2	Cargas.....	38
3.2.3	Critério de rotura.....	38
4	DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	41
4.1	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	41
4.1.1	Vigas de madeira sem tratamento preservador (C).....	42
4.1.1.1	<i>VCP1a.....</i>	<i>42</i>
4.1.1.2	<i>VCP1b.....</i>	<i>43</i>
4.1.1.3	<i>VCP1c.....</i>	<i>44</i>
4.1.1.4	<i>VCP2a.....</i>	<i>45</i>
4.1.1.5	<i>VCP2b.....</i>	<i>46</i>
4.1.1.6	<i>VCP2c.....</i>	<i>47</i>
4.1.1.7	<i>VCP3a.....</i>	<i>48</i>
4.1.1.8	<i>VCP3b.....</i>	<i>49</i>
4.1.1.9	<i>VCP3c.....</i>	<i>50</i>
4.1.1.10	<i>Comparação entre vigas sem tratamento preservador (C).....</i>	<i>51</i>
4.1.2	Vigas de madeira com tratamento preservador A.....	52
4.1.2.1	<i>VAP1a.....</i>	<i>52</i>
4.1.2.2	<i>VAP1b.....</i>	<i>54</i>
4.1.2.3	<i>VAP1c.....</i>	<i>56</i>
4.1.2.4	<i>VAP2a.....</i>	<i>57</i>
4.1.2.5	<i>VAP2b.....</i>	<i>57</i>
4.1.2.6	<i>VAP2c.....</i>	<i>59</i>
4.1.2.7	<i>VAP3a.....</i>	<i>60</i>
4.1.2.8	<i>VAP3b.....</i>	<i>61</i>
4.1.2.9	<i>VAP3c.....</i>	<i>62</i>
4.1.2.10	<i>Comparação entre vigas com tratamento preservador A.....</i>	<i>62</i>
4.1.3	Vigas de madeira com tratamento preservador B.....	63
4.1.3.1	<i>VBP1a.....</i>	<i>63</i>
4.1.3.2	<i>VBP1b.....</i>	<i>64</i>
4.1.3.3	<i>VBP1c.....</i>	<i>65</i>
4.1.3.4	<i>VBP2a.....</i>	<i>66</i>

4.1.3.5	<i>VBP2b</i>	67
4.1.3.6	<i>VBP2c</i>	68
4.1.3.7	<i>VBP3a</i>	69
4.1.3.8	<i>VBP3b</i>	70
4.1.3.9	<i>VBP3c</i>	71
4.1.3.10	<i>Comparação entre vigas com tratamento preservador B</i>	72
4.1.4	Considerações finais relativas aos resultados dos modelos	73
4.2	ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS	75
4.3	MODELOS DE PREVISÃO DA FORÇA DE ROTURA.....	79
5	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	83
	BIBLIOGRAFIA	85

Esta página foi deixada intencionalmente em branco

1 Introdução

1.1 Enquadramento

A madeira é um material que tem tido uma utilização crescente em Portugal para a execução de estruturas. A utilização de madeira em estruturas pode ser vantajosa em várias situações, especialmente em grandes vãos. A madeira tem outras características desejáveis, tais como os seus fatores económicos, o seu carácter “ecológico”, valor estético, elevada resistência ao fogo e elevada durabilidade, especialmente em ambientes corrosivos para aço e betão armado.

A madeira correntemente usada em Portugal para estruturas provém, em grande parte, do norte da Europa, sendo o espruce (*picea abies*) uma das espécies mais usadas, facto que se tem refletido na normalização europeia, que habitualmente traduz as propriedades do espruce.

Um dos recursos naturais de Portugal é a sua floresta, que ocupa cerca de 38% do território nacional, e onde cerca de 29% são árvores resinosas. Entre estas, o pinheiro bravo (*pinus pinaster* Ait.) é a espécie dominante (Cachim 2007). O pinheiro bravo é uma madeira com propriedades mecânicas superiores à do espruce, tendo como eventuais desvantagens, em relação ao espruce, a sua massa volúmica e o seu carácter mais nodoso.

Correntemente, grande parte dos elementos de madeira usados em estruturas são de madeira lamelada colada, que permite o uso de secções maiores que a madeira maciça e permite que se use madeira de qualidade inferior à requerida para uma peça de madeira maciça de secção igual. No entanto, as normas e recomendações técnicas existentes são insuficientes para obter uma utilização eficiente e racional da resistência em peças de madeira lamelada colada de pinheiro bravo, sendo esta subaproveitada (Gaspar 2006).

1.2 Objetivo

O facto de as normas correntes subestimarem a resistência das vigas de madeira lamelada colada de pinheiro bravo criou a necessidade de estudar e, conseqüentemente, estimar melhor a resistência destas.

Refira-se que o uso de informação detalhada das lamelas permite remover algumas incógnitas na previsão de resistência da viga acabada e identificar as várias zonas fracas das lamelas.

O presente estudo pretende, através da utilização de informação detalhada acerca das propriedades mecânicas das lamelas prever a resistência com maior exatidão que outros métodos já existentes, usando como base os estudos de Gaspar (2006, 2010) sobre a viabilidade e durabilidade do uso de madeira lamelada colada de pinheiro bravo tratada em profundidade. Pretende-se usar o módulo de elasticidade longitudinal ao longo das várias lamelas das vigas, o nível de retenção de tratamento preservador, a pressão de aperto utilizada na colagem e a posição das ligações de entalhes múltiplos na viga.

1.3 Estrutura

A presente dissertação está dividida em 5 capítulos. Após o capítulo introdutório, abordam-se os fatores que afetam a resistência da madeira, no capítulo 2, com especial incidência na madeira lamelada colada, indicando-se as principais causas que influenciam a resistência da madeira lamelada colada e descrevem-se alguns métodos propostos por normas e outros autores para previsão da resistência.

No capítulo 3, descrevem-se sumariamente os ensaios realizados por Gaspar (2006), de onde provem a informação utilizada neste trabalho sobre as lamelas e os valores de rotura das vigas, que permitiu fazer uma modelação usando um método numérico, justificando-se as escolhas tomadas na modelação em elementos finitos das vigas, assim como o critério de rotura usado.

No capítulo 4, apresenta-se, numa primeira fase, os resultados obtidos com os modelos de elementos finitos e como estes se comparam com os resultados obtidos por Gaspar (2006) no ensaio das vigas reais.

No capítulo 5, apresenta-se as conclusões do trabalho e os possíveis desenvolvimentos futuros.

2 Revisão da literatura

2.1 Fatores que afetam a resistência dos lamelados colados

2.1.1 Generalidades

A rotura à flexão de madeira maciça e sem defeitos, segundo Bodig e Jayne (1993), pode ocorrer conforme os modos ilustrados na Figura 1:

- a) Tração paralela ao fio pura. Modo de rotura pouco comum, que só ocorre em madeira totalmente livre de defeitos ou madeira de densidade elevada;
- b) Tração com rotura a um ângulo do fio devida a fio inclinado;
- c) Rotura à tração com superfície irregular. Rotura típica de madeira com baixo teor de água;
- d) Rotura à tração súbita na direção do fio. Pode dever-se a estrutura molecular invulgar da madeira, à presença de lenho de compressão ou à presença de fungos;
- e) Cedência da zona comprimida. Aparece antes de ser aplicada a carga última;
- f) Corte horizontal nas proximidades da zona da linha neutra. Pode dever-se a diferenças abruptas nos anéis de crescimentos ou a defeitos na madeira limpa, tais como fendas ou destacamento dos anéis de crescimento.

A rotura da madeira a flexão é progressiva: vai abrindo fendas à medida que vai sendo carregada. Apenas quando se uma fenda se propaga ao longo da peça é que se dá a rotura. A fenda que dá início à rotura pode encontrar-se em qualquer ponto da peça, mas, geralmente, a rotura inicia-se numa zona fraca localizada nas zonas de maior tensão (Bodig e Jayne 1993).

Na Figura 2, apresentam-se exemplos de rotura de vigas de madeira maciça com defeitos sujeitas a flexão, nomeadamente devido a: tração em fio inclinado, compressão junto a um nó e tração junto a um nó.

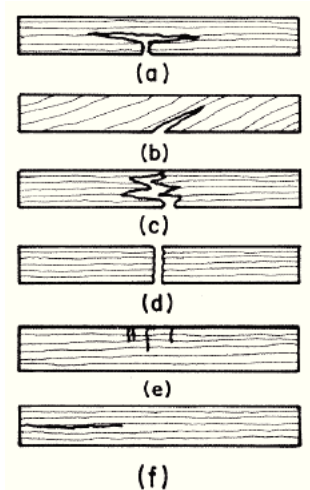


Figura 1: Tipos de rotura à flexão de madeira maciça sem defeitos

- (a) tração paralela ao fio pura,
- (b) tração com rotura a um ângulo por fio inclinado,
- (c) rotura à tração com superfície irregular,
- (d) rotura à tração súbita na direção do fio,
- (e) cedência da zona comprimida,
- (f) corte horizontal nas proximidades da linha neutra.

Fonte: Bodig e Jayne (1993)

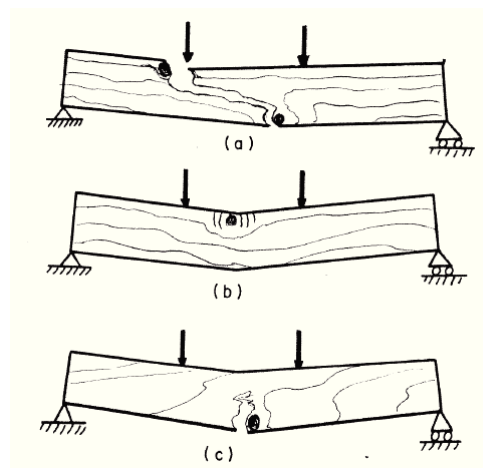


Figura 2: Tipos de rotura de madeira maciça à flexão causada por nós

- (a) tração em fio inclinado,
- (b) compressão junto a um nó,
- (c) tração junto a um nó.

Fonte: Bodig e Jayne (1993)

A propagação de uma fenda pode ocorrer de 3 modos (Wernersson 1991), ilustrados na Figura 3:

- Modo I – abertura por alavancagem;
- Modo II – escorregamento longitudinal por corte;
- Modo III – escorregamento transversal por corte.

Os três modos indicados são os da Figura 3, sendo os modos predominantes em madeira serrada são os modos I e II (Bodig e Jayne 1993).

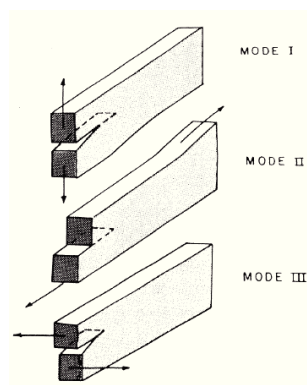


Figura 3: Modos de propagação de fenda

Fonte: Bodig e Jayne (1993)

2.1.2 Madeira lamelada colada

A resistência de vigas de madeira lamela colada à flexão ou tração, segundo Foschi e Barrett (1980), depende dos seguintes fatores:

- Disposição da classe de resistência das lamelas;
- Módulo de elasticidade das lamelas;
- Defeitos que reduzem a resistência das lamelas individuais, tais como nós ou a inclinação do fio, permitidos na classe de resistência da lamela;
- Resistência e localização das ligações de topo;
- Espessura das lamelas;
- Dimensão da viga e distribuição de tensões devida ao carregamento aplicado.

2.1.2.1 Disposição e módulo de elasticidade das lamelas

A classe de resistência das lamelas usadas influencia a resistência final da viga de lamelado colado. Quanto maior a classe de resistência das lamelas, maior será a resistência da viga, mas com ganhos decrescentes com o aumento da resistência da viga (Gaspar 2006). Segundo Hernandez e Moody (1996), a espécie ou proveniência da madeira usada no fabrico de vigas de lamelado colado tem pouca influência na resistência das vigas, desde que se use madeira da mesma classe de resistência.

Yang *et al.* (2007) constataram que, para vigas sujeitas a flexão, as lamelas exteriores foram as que tiveram maior influência nas propriedades mecânicas das vigas. A utilização mais racional da madeira é colocar as lamelas de classe de resistência mais elevada nas lamelas exteriores, pois são as que estão sujeitas a maiores tensões. A este respeito, a norma europeia NP EN 1194 (2002) prevê dois tipos de disposição das lamelas: madeira lamelada colada homogénea e madeira lamelada colada combinada. Ambos os tipos usam a mesma espécie de madeira em todas as lamelas (Yang *et al.* 2007). Na madeira lamelada colada homogénea, todas as lamelas são da mesma classe de resistência. Na madeira lamelada colada combinada, as propriedades mecânicas da madeira à flexão são dadas pela classe de resistência das lamelas compreendidas nas extremidades superior e inferior da secção da peça, com altura de um sexto da altura total, e as propriedades mecânicas aos esforços axial e de corte são dadas pela classe de resistência das lamelas interiores, que têm propriedades mecânicas inferiores às lamelas exteriores. O módulo de elasticidade da viga está também relacionado com o módulo

de elasticidade das lamelas. Quanto maior for o módulo de elasticidade das lamelas exteriores, maior será o módulo de elasticidade da viga (Wang 2004).

2.1.2.2 Ligações de topo e espessura das lamelas

As ligações de topo são pontos fracos significativos e a sua posição tem influência na resistência à flexão de uma viga de madeira lamelada colada. A norma NP EN 1194 (2002) exige que as ligações de topo tenham resistência superior à resistência característica das lamelas para prevenir a rotura frágil (Larsen 2004).

Gaspar (2006) ensaiou 27 vigas de lamelado colado de pinheiro bravo, com vários graus de pressão de aperto e de retenção de tratamento preservador e constatou que, em grande parte das vigas, a rotura teve início numa ligação de entalhes múltiplos nas lamelas tracionadas. Gaspar (2006) verificou uma marcada influência do posicionamento das ligações de topo na resistência à flexão quando estes se localizavam na zona de tensões de tração mais elevadas.

Petersson (1994) desenvolveu uma fórmula para determinar a tensão crítica para que uma fissura numa lamela extrema solicitada à tração, numa viga à flexão, inicie a propagação na junta colada adjacente. Esta fissura pode ser, por exemplo, uma ligação de topo que atingiu a rotura.

$$\sigma_{crit} = \frac{1}{\sqrt{h}} \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot G_c \cdot E_0}{\left(\frac{h}{h-e}\right)^3 - 1}} \quad (2.1)$$

onde:

σ_{crit} – tensão crítica de propagação de fenda [kPa]

G_c – energia de fratura [J/m^2]

E_0 – módulo de elasticidade paralelo ao fio [MPa]

h – altura da viga [m]

e – espessura da lamela [m]

O valor da energia de fratura de madeira em modo I puro varia entre 200 e 400 J/m^2 . Em modo II puro, a energia atinge cerca de 3 vezes o valor do modo I (Gaspar 2006; Larsen

2004). Em colas do tipo resorcinol-formol, Wernersson (1991, 1994) obteve o valor de 360 J/m^2 para fratura de modo I e entre 850 a 1000 J/m^2 para fratura de modo II.

A expressão 2.1 depende, essencialmente, da relação entre a espessura das lamelas e a altura da viga. Quanto maior for a espessura das lamelas, menor será a tensão crítica. Se a resistência à tração da lamela exterior exceder a tensão crítica, a fenda formada pela rotura dessa lamela propaga-se ao longo da linha de cola e tem-se o colapso total da viga.

Serrano e Larsen (1999) levaram a cabo simulações usando elementos finitos 2D numa peça sujeita à flexão, onde foi introduzida uma fissura na lamela mais solicitada à tração, e confirmaram a aplicabilidade da equação de Petersson. Estes autores concluíram que o modo de rotura determinante muda do modo I para se aproximar do modo II à medida que se diminui a espessura. Lamelas com cerca de 3 mm têm tendência para levar à rotura por corte (modo II), enquanto a rotura de lamelas de espessuras maiores, com cerca de 5 cm, terá a tendência de ser um modo misto entre os modos I e II.

Em relação à espessura das lamelas, conclui-se da análise da expressão de Petersson (1994) (expressão 2.1) que a resistência à flexão aumenta com a diminuição da espessura das lamelas. Tendo em conta o estudo de Serrano e Larsen (1999) referido anteriormente, para lamelas de espessura muito pequena, o aumento de resistência é significativo pois o modo de propagação da fenda na junta colada requer mais energia do que para lamelas mais espessas.

Gaspar (2010) verificou a aplicabilidade da equação 2.1 aos ensaios de vigas de lamelado colado de pinheiro bravo (*pinus pinaster Ait.*), assumindo a rotura da linha de cola por modo II como sendo condicionante. Gaspar verificou que a gama de valores obtidos para a tensão crítica está de acordo com os valores experimentais obtidos, em vigas com rotura frágil e rápida propagação das fendas.

Gaspar (2010) comparou também a resistência de dimensionamento à flexão de uma viga de lamelado colado da classe de resistência GL24h obtida através da aplicação do Eurocódigo 5 (norma EN 1995-1-1 2004) com os valores obtidos pela expressão 2.1 para vigas de espruce (*picea abies*) e de pinheiro bravo também da classe de resistência GL24h. Uma viga de lamelado colado GL24h de espruce é composta por lamelas da classe C24, que têm um módulo de elasticidade de 11 GPa, segundo a norma EN 338 (2009). O fabrico de uma viga de lamelado colado de pinheiro bravo da classe de resistência GL24h requer uma mistura de 50% de madeira de classe de qualidade E e de classe de qualidade EE (Gaspar 2006), o que

resulta num módulo de elasticidade médio da viga de pinheiro bravo de 13 GPa (Gaspar 2010). As classes de qualidade são definidas na NP 4305 (1995). Gaspar (2010) mostrou que a resistência de dimensionamento é bastante inferior à resistência obtida pela equação 2.1. Quanto aos valores obtidos para a tensão crítica, a rotura de uma viga de pinheiro bravo dá-se a uma tensão mais elevada que uma viga de espruce, caso haja uma fenda na lamela exterior mais tracionada. Isto deve-se ao módulo de elasticidade do pinheiro bravo ser superior ao do espruce. Gaspar (2010) demonstrou ainda que a tensão crítica é inferior a resistência à flexão característica ($f_{m,g,k}$) de GL24h.

É importante referir que, apesar da sua marcada influência da espessura das lamelas na resistência, esta é habitualmente condicionada por razões de durabilidade. A norma EN 386 (2001) limita a espessura das lamelas e a área da secção transversal das lamelas por razões de durabilidade. Segundo esta norma, a espessura máxima das lamelas de madeira de resinosas é de 45 mm para condições de serviço de interior (classe de serviço 1 e 2) ou 35 mm para condições de serviço de exterior (classe de serviço 3). Esta diferença deve-se às maiores variações dimensionais, devidas à variação de teor de água, a que está sujeita uma peça de madeira no exterior. Adicionalmente, a norma EN 386 (2001) limita a espessura das lamelas de peças de lamelado colado curvas em função do raio de curvatura e da resistência à flexão pretendida.

2.1.2.3 Efeito de volume e distribuição de tensões

Em vigas de pequenas dimensões, a probabilidade de encontrar um defeito nas lamelas extremas é menor relativamente às vigas de maiores dimensões. Isto contribui para um aumento da resistência das vigas de menores dimensões, denominado de efeito de volume no Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 2004). Adicionalmente, Astrup *et al.* (2007) concluíram que este efeito é também devido a concentrações de tensões, causadas pela anisotropia da madeira. No Eurocódigo 5, o efeito de volume é tido em conta com o fator k_h , que aumenta a resistência característica à flexão ou tração paralela ao fio até 110%. Este fator depende apenas da altura da peça e é aplicável a peças de madeira lamelada colada de altura inferior ou igual a 600 mm.

2.1.2.4 Efeito da distribuição de tensões na secção transversal

A posição da linha neutra tem influência na distribuição de tensões numa viga à flexão, pois a madeira tem comportamento elastoplástico quando sujeita a compressão paralela ao fio. Enquanto a tensão de compressão for inferior à tensão do limite proporcional, a madeira está na região elástica. Ultrapassada essa tensão de compressão, a linha neutra move-se em direção à zona tracionada até se dar a rotura (Bodig e Jayne 1993). A distribuição de tensões é não linear para o carregamento último e esta depende da altura da peça e das tensões de rotura à tração e compressão paralelas ao fio.

Nos ensaios à flexão que Yang *et al.* (2007) realizaram em vigas de lamelado colado de pitespaine (denominação que abrange um conjunto de espécies - *Pinus palustris* Miller, *Pinus elliottii* Engelm, *Pinus echinata* Mill. e *Pinus taeda* - designadas por “*Southern Pine*”), houve uma deslocação muito pequena da linha neutra e a sua posição no momento de rotura ficou muito próxima posição inicial. Por outro lado, houve uma translação da linha neutra significativa nos ensaios que os mesmos autores realizaram em vigas de lamelado colado de criptoméria (*Cryptomeria japonica* David Don Linné fils). Pensa-se que isto se deve à rotura da madeira na zona comprimida. (modo (e) da Figura 1). Segundo Bodig e Jayne (1993), não é usual que a rotura à compressão da madeira resulte no colapso total da viga, o que só acontece quando a zona tracionada romper. Este é um tipo de rotura comum para madeiras de baixa massa volúmica, o que não é consistente com a massa volúmica de criptoméria. A massa volúmica média da madeira de criptoméria usada por Yang *et al.* (2007) é de 502 kg/m^3 , o que corresponde a uma massa volúmica mediana. Para comparar, a massa volúmica média da madeira de pitespaine usado por Yang *et al.* (2007) foi de 622 kg/m^3 , que é uma massa volúmica elevada.

2.1.3 Efeito de homogeneização em lamelados colados

A vantagem do uso de madeira lamelada colada em relação à madeira maciça é a menor influência dos defeitos na resistência da viga, pois os defeitos são distribuídos pelo volume da peça. Assim poderá conseguir-se vigas com maior resistência à flexão do que a que as lamelas usadas no fabrico da viga. Este efeito é designado de efeito de homogeneização (vulgarmente designado por *laminating effect* na literatura inglesa) e pode ser subdividido em 3 componentes: efeito de dispersão, efeito da tensão de tração e efeito de reforço (Foschi e Barrett 1980; Larsen 2004).

2.1.3.1 Efeito de dispersão

Um defeito singular em madeira maciça causa um decréscimo da resistência superior ao que ocorreria se a peça de madeira maciça fosse serrada em peças de menores dimensões e posteriormente distribuídas pelo volume de uma viga de madeira lamelada colada, obtendo-se um material mais homogêneo. A resistência à flexão de uma viga de lamelado colado é determinada pela resistência característica à tração da lamela exterior mais tracionada (Hernandez e Moody 1996; NP EN 1194 2002). A resistência característica à tração de uma população de lamelas reflete a lamela de menor resistência, mas a probabilidade desta lamela ser aplicada numa zona de elevadas tensões é menor, pelo que a resistência da viga é superior (Gaspar 2006).

O efeito de dispersão não existe se fossem usadas as propriedades efetivas das lamelas individuais para prever a resistência da madeira (Larsen 2004).

2.1.3.2 Efeito da tensão de tração

Uma lamela sujeita a um esforço de tração com um defeito excêntrico em relação à linha média, tal como um nó ou uma fenda, flete lateralmente devido à excentricidade do esforço na zona de secção reduzida. A combinação de tração com flexão reduz a resistência à tração da lamela. A mesma lamela, colada às lamelas adjacentes numa viga, está travada em todo o seu comprimento e não tem a redução de resistência referida. Como tal, a lamela integrada numa peça de lamelado colado pode ter uma resistência superior à obtida quando a lamela isolada é classificada, que é um ensaio onde a lamela não é travada (Foschi e Barrett 1980).

2.1.3.3 Efeito de reforço

Segundo a hipótese da conservação das seções planas da teoria da elasticidade, uma lamela de uma viga de lamelado colado que tenha zonas de baixa rigidez, tais como nós ou fendas, será reforçada pelas lamelas adjacentes, mais rígidas (Bodig e Jayne 1993). Assume-se também que, quando uma das lamelas rompe, as tensões são transferidas para as lamelas adjacentes, caso não haja colapso imediato da viga (Larsen 2004).

Serrano e Larsen (1999) fizeram investigações de elementos finitos 2D, onde analisaram uma viga com 600 mm de comprimento e 315 mm de altura composta por 7 lamelas sujeita a flexão pura. A meio vão da lamela exterior mais tracionada, introduziram uma zona fraca,

com uma redução de rigidez entre 25 e 100% e de comprimento variável. Na Figura 4, encontram-se os resultados que Serrano e Larsen (1999) obtiveram para uma zona fraca com 30 mm de comprimento. Os resultados são apresentados em formato de tensão normalizada, que é a tensão no ponto dividida pela tensão máxima obtida através da teoria da elasticidade.

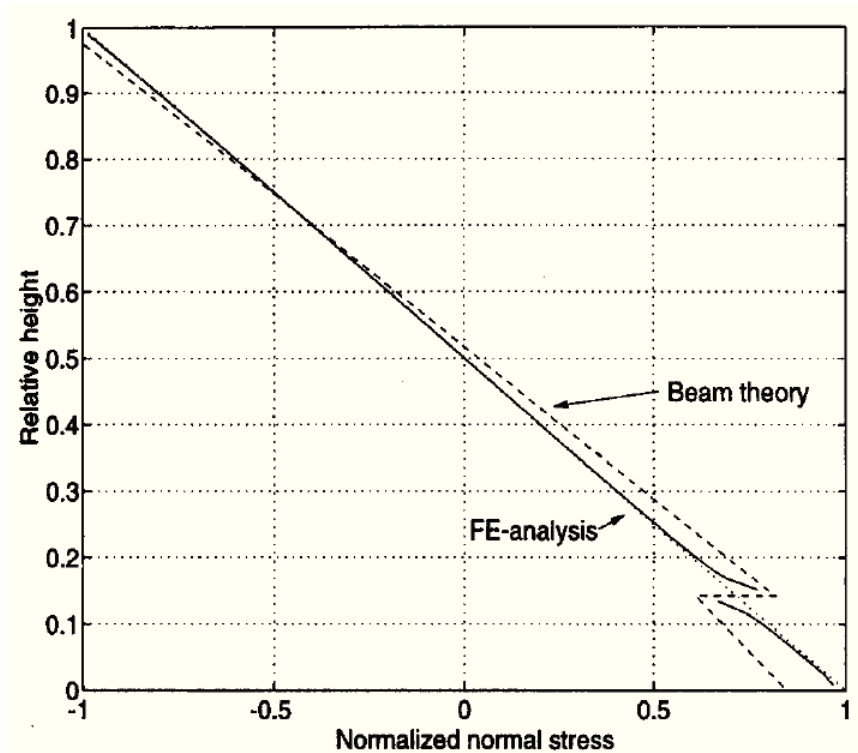


Figura 4: Distribuição de tensões a meio vão de uma viga com uma zona fraca com 30 mm de comprimento e uma redução de rigidez de 25%, calculado através da teoria da elasticidade (tracejado) e elementos finitos (a cheio). A pontilhado, a tensão na secção sem zona fraca.

Altura de uma lamela = $0,143H$. Fonte: Serrano e Larsen (1999).

A Figura 4 mostra que as tensões obtidas pelo método dos elementos finitos (linha a cheio) ao longo da altura da secção são muito próximas do que seriam se não houvesse zona fraca (linha a pontilhado). A redistribuição de tensões em zonas fracas de pequena dimensão é muito localizada. Larsen (2004) acrescenta que para uma zona fraca de comprimento zero, a distribuição de tensões seria linear, como a linha a pontilhado da Figura 4.

Daqui se conclui que a assunção de que uma zona fraca é reforçada pelas lamelas vizinhas não é válida para zonas fracas de pequena dimensão, como nós ou ligações de entalhes múltiplos (LEM). A tensão na zona fraca está perto mais perto da sua resistência limite do que a teoria da elasticidade deixaria antever (Larsen 2004).

2.1.3.4 Dependência da espécie

Analisando os resultados obtidos por Yang *et al.* (2007), o efeito de reforço depende da espécie de madeira. Yang *et al.* (2007) estudaram os módulos de elasticidade das lamelas de vigas de lamelado colado de criptoméria (*Cryptomeria japonica* David Don Linné fils) e pitespaine (denominação que abrange um conjunto de espécies - *Pinus palustris* Miller, *Pinus elliottii* Engelm, *Pinus echinata* Mill. e *Pinus taeda* - designadas por “*Southern Pine*”) antes e depois de coladas, utilizando extensômetros no 2º caso. As lamelas de criptoméria não apresentaram aumento de rigidez após terem sido coladas, mas as lamelas de pitespaine apresentaram um aumento de rigidez significativo após colagem.

2.1.3.5 Quantificação do efeito de homogeneização

A quantificação mais comum do efeito de homogeneização é dada pela razão (λ) entre a tensão de rotura à flexão da viga de lamelado colado ($f_{m,g}$) e a tensão de rotura à tração das lamelas ($f_{t,0,l}$) ou das ligações de topo ($f_{t,0,j}$), conforme a rotura se dê pelas lamelas ou pelas ligações de topo (Gaspar 2006; Larsen 2004).

$$\lambda = \frac{f_{m,g}}{f_{t,0,l}} \quad \text{ou} \quad \lambda = \frac{f_{m,g}}{f_{t,0,j}} \quad (2.2 \text{ e } 2.3)$$

Falk e Colling (1995) recolheram os resultados de vários autores e concluíram que o valor de λ , relativo à resistência à tração das lamelas, pode oscilar entre 1,06 e 1,59 para vigas de lamelado colado fabricado com espécies europeias e entre 0,95 e 2,51 para espécies norte americanas. A razão λ é maior para os valores caraterísticos do que para os valores médios, devido ao maior coeficiente de variação apresentado pela resistência à flexão da madeira maciça.

O efeito de homogeneização decresce com o aumento da classe de resistência das lamelas, havendo menor influência dos efeitos de reforço, devido ao menor tamanho dos nós, e do efeito da tensão de tração, devido à maior homogeneidade da madeira das classes mais elevadas de resistência. A norma NP EN 1194 (2002) considera uma variação linear da razão λ , decrescente com o aumento da classe de resistência das lamelas.

No que diz respeito a ligações de topo, Gaspar (2006) compilou os resultados de alguns autores relativamente à razão entre a resistência à flexão da madeira lamelada e das ligações

de entalhes múltiplos, que situaram λ entre 0,8 e 1,0. A norma NP EN 1194 (2002) considera um valor de λ de cerca de 0,83 (Gaspar 2006).

2.2 Previsão da resistência

Para determinar a resistência de madeira lamelada colada a partir do produto acabado é necessário ensaiar destrutivamente um número suficiente de vigas para obter uma distribuição estatística da resistência. Isto é um processo que tem de ser repetido para cada tamanho e configuração de lamelas usada (Hernandez *et al.* 1992). Uma vez que as dimensões das peças não são normalizadas, recorrer a este processo não é economicamente viável nem prático. Recorre-se às propriedades mecânicas da madeira das lamelas e das ligações de topo, obtidas por classificação visual ou mecânica, para prever a resistência do produto acabado.

Algumas das propriedades da madeira que podem ser usadas para estimar a resistência da madeira são maus estimadores, como os nós (isoladamente), a densidade ou os anéis de crescimento. O módulo de elasticidade, obtido por ensaio não destrutivo, é um bom estimador de resistência, pois não só contém informação acerca das propriedades da madeira, como também sobre os nós e a inclinação do fio. Um estimador melhor é a informação conjunta do módulo de elasticidade e dos nós (Cachim 2007).

Existem métodos determinísticos e métodos estocásticos para prever da resistência da madeira lamelada colada. Os métodos determinísticos usam as propriedades da madeira das lamelas que compõem a peça de lamelado colado para prever a sua resistência. Os métodos estocásticos usam modelos matemáticos, em que se introduzem as propriedades mecânicas da lamelas geradas aleatoriamente a partir distribuições estatísticas. Essas distribuições são obtidas através de ensaios de uma população de lamelas. A geração aleatória de propriedades mecânicas é usada nos modelos matemáticos, obtendo-se uma distribuição da resistência das vigas de lamelado colado com as dimensões e disposição de lamelas escolhidas.

2.2.1 Norma americana ASTM D 3737-04

O método I_K/I_G é um método adotado pela norma americana ASTM D 3737-04 (2004), desenvolvido nos anos 40 e 50 (Hernandez *et al.* 1992). Este método modifica a tensão resistente da madeira sem defeitos *SI* (*stress index*), tabelada na norma para algumas espécies

americanas, com um fator de redução de resistência SMF (*stress modification factor*). Este é um método empírico, usado para obter a resistência à flexão para cada viga individual.

A tensão resistente à flexão a adotar para dimensionamento é:

$$f_b = SI_b \cdot SMF_b \quad (2.4)$$

onde:

f_b – tensão de rotura à flexão de dimensionamento;

SI_b – valor da tensão resistente à flexão da madeira sem defeitos;

SMF_b – fator de modificação da tensão

Existem dois fatores de redução de resistência SMF_b : um que depende da inclinação do fio e outro que depende da razão I_K/I_G , usando-se o menor dos dois. I_K representa o momento de inércia dos nós na secção crítica, ou de maior momento e I_G representa o momento de inércia bruto da secção. O valor de SMF_b , que tem em conta a inclinação do fio, é obtido partir de uma tabela da norma.

O uso do momento de inércia dos nós, em vez da área, no fator de redução de resistência, permite ter em conta a maior influência dos nós mais afastados da linha neutra na resistência à flexão da peça, onde as tensões são mais elevadas.

O método I_K/I_G não tem em conta a influência das ligações de topo na resistência (Hernandez *et al.* 1992).

2.2.2 Norma portuguesa NP EN 1194:2002

A NP EN 1194 (2002) prevê oito classes de resistência para madeira lamela-colada. Estas são divididas em dois tipos, conforme mencionado na secção 0. Para madeira lamelada colada homogénea, a norma prevê as classes GL24h, GL28h, GL32h e GL36h. As classes GL24c, GL28c, GL32c e GL36c aplicam-se a madeira lamelada colada combinada. A parte numérica da designação da classe refere-se à resistência característica à flexão ($f_{m,g,k}$).

A NP EN 1194 (2002) prevê dois métodos para verificar a conformidade à classe de resistência: através de ensaios ou através de cálculos.

2.2.2.1 Conformidade baseada em ensaios

A conformidade baseada em ensaios usa os valores característicos obtidos por ensaios realizados segundo a EN 408 (2003) e a NP EN 1193 (2000) para atribuir uma classe de resistência a um elemento de madeira lamelada colada, caso estes valores não sejam inferiores aos valores estipulados na NP EN 1194 (2002).

Se se quiser tratar os ensaios de uma forma simplificada, a NP EN 1194 (2002) estipula que é suficiente apenas determinar a resistência à flexão e o módulo de elasticidade à flexão usando o ensaio da EN 408 (2003). Os provetes devem ter, pelo menos, uma ligação de entalhes múltiplos nas lamelas onde a tensão de tração é máxima.

A NP EN 1194 (2002) assume que os provetes de flexão são efetuados em provetes com secção igual ou superior a 150 mm de largura e 600 mm de altura. Quando são usados provetes com dimensões inferiores, a estes valores de referência, os resultados dos ensaios devem ser multiplicados por (ver efeito de volume, secção 2.1.2.3):

$$k_{size} = \left(\frac{b}{150}\right)^{0,05} \left(\frac{h}{600}\right)^{0,10} \quad (2.5)$$

onde:

b - largura da secção [mm]

h - altura da secção [mm]

2.2.2.2 Conformidade baseada em cálculos

Hernandez e Moody (1996) concluíram que a classificação mecânica das lamelas exteriores é um indicador eficiente para classificar vigas de lamelado colado sujeitas a flexão. Este é o método usado pela conformidade baseada em cálculos da norma NP EN 1194 (2002).

As propriedades mecânicas são estimadas a partir do valor característico da resistência à tração ($f_{t,0,1,k}$) e do valor médio do módulo de elasticidade à tração ($E_{0,1,mean}$) das lamelas, conforme as expressões dadas no quadro A.1 da NP EN 1194 (2002) que se apresentam no Quadro 1.

No caso de lamelado colado combinado, as expressões do Quadro 1 aplicam-se às diferentes zonas homogêneas da secção, assumindo-se que as zonas exteriores representam pelo menos um sexto da altura da secção ou o mínimo de 2 lamelas.

Quadro 1: Determinação das propriedades mecânicas da madeira lamelada colada segundo a NP EN 1194 (2002)

Flexão	$f_{m,g,k}$	$= 7 + 1,15f_{t,0,1,k}$
Tração	$f_{t,0,g,k}$	$= 5 + 0,08f_{t,0,1,k}$
	$f_{t,90,g,k}$	$= 0,2 + 0,015f_{t,0,1,k}$
Compressão	$f_{c,0,g,k}$	$= 7,2f_{t,0,1,k}^{0,45}$
	$f_{c,90,g,k}$	$= 0,7f_{t,0,1,k}^{0,50}$
Corte	$f_{v,g,k}$	$= 0,32f_{t,0,1,k}^{0,80}$
Módulo de elasticidade	$E_{0,g,mean}$	$= 1,05E_{0,1,mean}$
	$E_{0,g,05}$	$= 0,85E_{0,1,mean}$
	$E_{90,g,mean}$	$= 0,035E_{0,1,mean}$
Módulo de distorção	$G_{g,mean}$	$= 0,065E_{0,1,mean}$
Massa volúmica	$\rho_{g,k}$	$= 1,10 \rho_{l,k}$

A conformidade baseada em cálculos tem em conta a influência das ligações de topo de forma indireta, exigindo que tenham resistência superior à resistência característica das lamelas, cumprindo pelo menos um dos seguintes requisitos:

Requisito a):

$$f_{t,j,k} \geq 5 + f_{t,0,l,k} \quad (2.6)$$

Requisito b):

$$f_{m,j,k} \geq 8 + 1,4 f_{t,0,l,k} \quad (2.7)$$

onde:

$f_{t,j,k}$ – tensão de rotura característica das ligações de topo à tração;

$f_{m,j,k}$ – tensão de rotura característica das ligações de topo à flexão;

$f_{t,0,l,k}$ – tensão de rotura característica das lamelas à tração.

A resistência superior exigida às ligações de topo serve para resolver o problema da rotura frágil das ligações de topo (Larsen 2004).

As propriedades mecânicas obtidas através do uso das expressões do Quadro 1 têm de ser iguais ou superiores aos valores estabelecidos nos quadros 1 e 2 da NP EN 1194 (2002) para a classe de resistência pretendida. No Quadro 2, apresentam-se exemplos de constituição de vigas de lamelado colado de acordo com os requisitos da norma NP EN 1194 (2002).

Quadro 2: Exemplos de constituição de vigas de lamelado colado de acordo com a NP EN 1194 (2002)

Fonte: Gaspar (2006)

Tipo de madeira lamelada colada	Classe de resistência da madeira lamelada colada		
	GL24	GL28	GL32
	Classe de resistência das lamelas		
Homogénea (h)	C24	C30	C40
Combinada (c)	C24/C18	C30/C24	C40/C30

2.2.3 Homogeneização da secção

Este tipo de método é originário dos anos 70 (Hernandez *et al.* 1992) e baseia-se na homogeneização da área da secção em função do módulo de elasticidade. É um método computacionalmente menos exigente que os modelos de elementos finitos.

Hernandez *et al.* (1992) desenvolveram um método de homogeneização da secção que gera aleatoriamente o comprimento das lamelas. O módulo de elasticidade e a resistência da madeira das lamelas são gerados aleatoriamente e atribuídos em troços de 61 cm (2 pés). Isto deve-se ao facto de as propriedades das lamelas serem mais exatas se forem ensaiadas em vãos curtos do que em vãos longos. O módulo de elasticidade e resistência das juntas de topo são também gerados aleatoriamente. A disposição das lamelas na viga é simulada, de modo a obter a posição das juntas de topo.

A rotura progressiva é simulada atribuindo um módulo de elasticidade de zero à porção de lamela que atingiu a rotura e a secção é homogeneizada novamente. Se o novo momento resistente da secção for inferior aos momentos resistentes anteriores, atingiu-se a rotura da viga.

Govindarajoo (1989) comparou o método dos elementos finitos ao método da secção homogeneizada e os resultados indicaram que ambos os métodos produziam resultados semelhantes.

2.2.4 Modelos de elementos finitos

Foschi e Barrett (1980) foram os primeiros investigadores a modelar madeira lamelada colada usando um modelo estocástico. No modelo que Foschi e Barrett (1980) desenvolveram, as lamelas são divididas em células, a que são atribuídas densidades e tamanhos de nó

aleatoriamente, provenientes de distribuições estatísticas. O módulo de elasticidade e a tensão de rotura são correlacionados com a densidade e tamanho do nó atribuídos à célula. As distribuições de probabilidade e rigidez são caracterizadas usando simulações de Monte Carlo. Os vários fatores que afetam a resistência são contemplados no modelo de Foschi e Barrett (1980), mas este não contempla o efeito das ligações de topo (Hernandez *et al.* 1992).

Ehlbeck *et al.* (1985) desenvolveram um modelo semelhante ao de Foschi e Barrett (1980), conhecido como o “Modelo de Karlsruhe”. As duas grandes melhorias em relação ao modelo de Foschi e Barrett foram a inclusão do efeito das ligações de topo e a capacidade de simular o colapso progressivo da viga (Larsen 2004). O modelo de Karlsruhe é um dos mais conhecidos e foi descrito sucintamente por Larsen (2004): o modelo de Karlsruhe subdivide uma viga de lamelado colado em células, onde cada célula corresponde a 150 mm de uma lamela. Uma célula pode consistir em um de dois ‘materiais’: madeira ou ligações de entalhes múltiplos (ligações de topo). O modelo consiste em dois programas de computador. Um simula a disposição das lamelas, usando distribuições estatísticas da distância entre ligações de entalhes múltiplos e o segundo faz o cálculo do método dos elementos finitos. Os parâmetros atribuídos a uma secção de lamela de madeira entre 2 ligações de entalhes múltiplos são a densidade e o *Knot Area Ratio* (KAR). O KAR é a razão entre a área da projeção de todos os nós de uma célula num plano perpendicular à lamela e a área da secção. Em cada célula, o KAR é multiplicado por um fator, proveniente de uma distribuição estatística. Este fator serve para simular a presença de múltiplos nós numa zona limitada, ou seja, numa célula. A densidade e o KAR de cada célula são usados para calcular o módulo de elasticidade e a tensão resistente da célula usando equações de regressão contendo elementos aleatórios. Assim, mesmo que a densidade e KAR sejam iguais em duas células, o módulo de elasticidade e a tensão resistente não se repetem. A tensão resistente provém do ensaio de lamelas com 150 mm de comprimento travadas lateralmente, pelo que não há efeito da tensão de tração.

As células de ligação de entalhes múltiplos são modeladas da mesma maneira, mas têm as propriedades das ligações de entalhes múltiplos em vez das propriedades de madeira.

O ponto fraco do modelo de Karlsruhe, assim como o de todos os outros modelos, são os critérios de rotura. O modelo de Karlsruhe usa 4 critérios de rotura, baseados na calibração do modelo com ensaios de flexão de vigas (Larsen 2004):

1. Se uma ligação de entalhes múltiplos das lamelas exteriores à tração romper, assume-se a rotura da viga, o que se deve ao facto de uma ligação de entalhes múltiplos romper em toda a largura da lamela, em vez de parcialmente, como é o caso dos nós;
2. Se duas células vizinhas entrarem em rotura para o mesmo ‘regime’ de tensões, assume-se a rotura da viga, o que simula rotura frágil à tração;
3. Se uma célula entrar em rotura à tração na vizinhança de outra célula que entrou em rotura previamente, assume-se rotura da viga. A vizinhança, ilustrada na Figura 5, é numa região que contém todas as células adjacentes à célula rompida, a uma distância de 2 células desta. Isto simula rotura devido a tensões de corte muito elevadas na região, apesar de o modelo não entrar com a resistência de corte;
4. Se não se atingir os critérios anteriores, considera-se que a viga atingiu a rotura total quando 5 células entrarem em rotura.

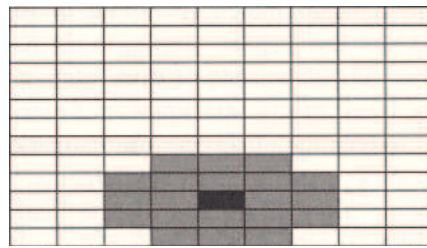


Figura 5: Vizinhança de uma célula que entrou em rotura (célula a escuro).

Fonte: Colling (1990).

O modelo de Karlsruhe assume que uma zona fraca, de menor rigidez, está sujeita a tensões menores, transferindo as tensões para as lamelas vizinhas, mais rígidas. Como se exemplificou na secção 2.1.3.4, Serrano e Larsen (1999) mostraram que esta assunção não é correta.

Colling (1990) comparou o modelo de Karlsruhe com ensaios experimentais e obteve resultados teóricos inferiores aos experimentais. Colling defendeu que isto se deveria ao facto do modelo de Karlsruhe não ter em conta o efeito de reforço quando uma ligação de entalhes múltiplos rompe. Larsen (2004) defende que a discrepância entre os valores teóricos e os valores experimentais de Colling se deve às vigas que iniciaram a rotura por uma ligação de entalhes múltiplos terem resistência superior à média. Devido a isto, não é possível tirar conclusões do trabalho de Colling acerca do efeito de reforço no modelo de Karlsruhe.

Adicionalmente, o modelo de Karlsruhe tem um forte efeito de altura da peça, independentemente do seu comprimento, algo que nem sempre é suportado pelos ensaios (Larsen 2004).

No entanto, Aasheim *et al.* (1993) compararam os resultados do modelo de Karlsruhe com os resultados experimentais de cerca de 100 vigas e obtiveram resultados consistentes.

2.2.5 Análise estatística das propriedades mecânicas das lamelas

Gaspar (2006) fez uma análise estatística para saber qual a classe resistência que pode ser obtida com madeira lamelada colada de pinheiro bravo (*pinus pinaster Ait.*). Este não é um método de previsão de resistência, mas pode ser usado quando não se dispõe de madeira suficiente para obter distribuições de probabilidade da resistência das lamelas (Gaspar *et al.* 2010). Neste caso, dispunha-se de porções semelhantes de tábuas de pinheiro bravo das classes de qualidade E e EE, cujo módulo de elasticidade foi medido mecanicamente em vários pontos de cada tábua. Foram analisados dois cenários: um primeiro com as tábuas de maior resistência colocadas nas lamelas exteriores das vigas, correspondente à disposição das vigas ensaiadas (lamelado colado combinado). O segundo cenário corresponde às tábuas de classe E e EE serem dispostas de forma aleatória nas vigas, em porções iguais, o que simula lamelado colado homogêneo.

Para o primeiro cenário, este autor fez uma simulação de Monte Carlo para estimar a resistência das tábuas usadas nas lamelas exteriores das vigas. O módulo de elasticidade mínimo de cada tábua foi usado para estimar a resistência característica média à flexão da tábua, usando a reta de regressão obtida por Machado e Cruz (1992). A resistência de cada tábua foi obtida com os coeficientes de variação da madeira de pinheiro bravo obtidos por Machado *et al.* (1998), que são iguais a 40% e a 22% para as classes de qualidade E e EE, respectivamente, para gerar uma distribuição normal obtida a partir de 200 valores aleatórios gerados para cada tábua. As resistências à flexão características foram obtidas usando o método não paramétrico da distribuição normal, conforme a norma EN 384 (2004). As resistências características à tração foram tomadas iguais a 60% da resistência à flexão, conforme a mesma norma. Usando as expressões do Quadro 1, a classe de resistência para o primeiro cenário foi GL28c, o que é consistente com os resultados obtidos nas vigas ensaiadas por Gaspar (2006).

Para o segundo cenário, o mesmo processo foi repetido para a totalidade das tábuas, o que resultou na classe de resistência GL24h.

Esta página foi deixada intencionalmente em branco

3 Avaliação da resistência de vigas de madeira lamelada colada

3.1 Trabalhos experimentais realizados anteriormente

3.1.1 Generalidades

A dissertação de mestrado de Gaspar (2006) incidiu sobre a viabilidade de estruturas de madeira lamelada colada de pinheiro bravo (*pinus pinaster Ait.*) com tratamento preservador. Gaspar (2006) ensaiou à flexão, segundo a EN 408 (2003), 27 vigas de madeira lamelada colada de pinheiro bravo (*pinus pinaster Ait.*) com as dimensões 2880 mm x 150 mm x 80 mm (comprimento x altura x espessura). As vigas eram constituídas por 5 lamelas de 30 mm de espessura. Tal como era seu objetivo, o trabalho realizado por Gaspar (2006) permitiu apurar a viabilidade do uso de madeira tratada de pinheiro bravo no fabrico da madeira lamelada colada, mais propriamente, no que diz respeito à capacidade resistente. O procedimento experimental utilizado pelo referido autor permite avaliar a influência do nível de retenção de produto preservador, da pressão de aperto e do módulo de elasticidade na resistência, estudo este que constitui o objetivo do presente trabalho.

3.1.2 Matéria-prima

Gaspar (2006) usou três lotes de tábuas de madeira de pinheiro bravo (*pinus pinaster Ait.*) para as lamelas, sendo todas de classe visual E ou EE (NP 4305 1995):

- Lote C, constituído por tábuas sem tratamento preservador;
- Lote A (tratamento A), constituído por tábuas com nível de retenção de produto preservador média, adequado a estruturas de classe de risco 3 (NP EN 335-1 2011);

- Lote B (tratamento B), constituído por tábuas com um nível de retenção de produto preservador alta, adequado a estruturas de classe de risco 4 (NP EN 335-1 2011).

O produto preservador usado foi o Tanalith E 3492 da ARCH Timber Protection, um produto aquoso da família dos azóis de cobre. O lote A corresponde a um nível de retenção aproximado de 7,1 kg/m³ deste produto, enquanto o tratamento B a um nível retenção aproximado de 16,4 kg/m³. A madeira tratada foi seca em estufa até atingir 14% de teor de água. A distribuição das classes de qualidade por nível de tratamento foram as constantes no Quadro 3.

Quadro 3: Quantidades percentuais das classes de qualidade para cada nível de tratamento

Fonte: (Gaspar 2006).

Tipo de madeira	Classe de qualidade E	Classe de qualidade EE
Não tratada	51%	49%
Tratamento A	64%	36%
Tratamento B	56%	44%

Gaspar (2006) verificou a conformidade dos topos das tábuas em relação aos requisitos do projeto de norma prEN 14081-1 (2003) e eliminou os topos das peças que não cumpriam os requisitos mínimos, verificando também a conformidade das tábuas usadas para as lamelas das vigas com a norma EN 385 (2001), a qual define as regras para as ligações de topo de entalhes múltiplos.

As tábuas foram classificadas mecanicamente, usando um ensaio de flexão de 3 pontos. O ensaio de flexão foi efetuado num vão de 900 mm, medindo em vários pontos ao longo de toda a tábua, afastados 150 mm entre si. Devido ao vão do ensaio, a primeira leitura do módulo de elasticidade é afastada 475 mm do topo e a última leitura encontra-se entre 475 mm e 625 mm de distância do topo oposto. Como tal, não é possível ter uma medição do módulo de elasticidade local junto aos topos das tábuas. No global, as tábuas foram ensaiadas entre 5 e 8 pontos (Gaspar 2006).

3.1.3 Fabrico

Gaspar (2006) separou a madeira de cada tipo de tratamento em três lotes, de modo a estudar a influência da pressão de aperto na colagem, perfazendo um total de 9 lotes. A cola usada foi

do tipo fenol-resorcinol-formol (PRF) e as pressões de aperto usadas foram: $P1 = 1,12$ MPa, $P2 = 0,90$ MPa e $P3 = 0,60$ MPa.

A determinação do módulo de elasticidade mínimo das tábuas permitiu que se realizassem três lotes idênticos para cada tipo de tratamento. Em cada lote, as tábuas foram ordenadas para que as tábuas de maior rigidez ficassem nas lamelas exteriores e as de menor rigidez nas lamelas interiores, de forma decrescente, sendo a do meio a menos rígida.

As tábuas foram unidas de topo usando ligações de entalhes múltiplos de modo a formar lamelas com cerca de 8700 mm de comprimento. Posteriormente à colagem das lamelas, as vigas de 8700 mm foram cortadas em 3 partes (a, b e c), obtendo-se 27 vigas com 2880 mm de comprimento.

Um exemplo da nomenclatura doravante usada é:

VCP1a – viga sem tratamento (C), com pressão de aperto $P1$ (1,12 MPa), parte a.

3.1.4 Ensaio de flexão das vigas

Os ensaios de flexão das vigas foram realizados segundo a EN 408 (2003) num vão de 2700 mm, sendo as cargas aplicadas a um terço e dois terços do vão, conforme a Figura 6. A força de ensaio (F) foi aplicada com um macaco hidráulico numa viga metálica que distribuiu a força pelos 2 pontos de aplicação na viga de madeira.

Os apoios da viga consistiram em chapas metálicas com uma concavidade inferior, apoiadas sobre cilindros, para permitir a livre rotação da viga nos apoios. Os pontos de apoio da viga metálica eram do mesmo tipo.

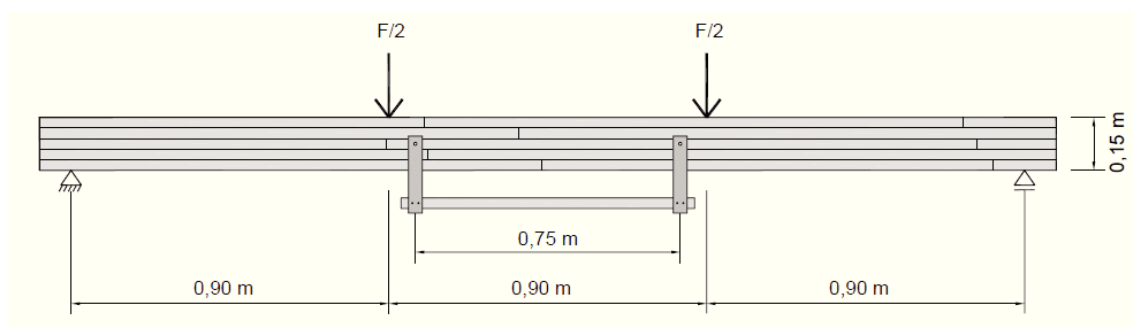


Figura 6: Esquema do ensaio de flexão.

Fonte: Gaspar (2006).

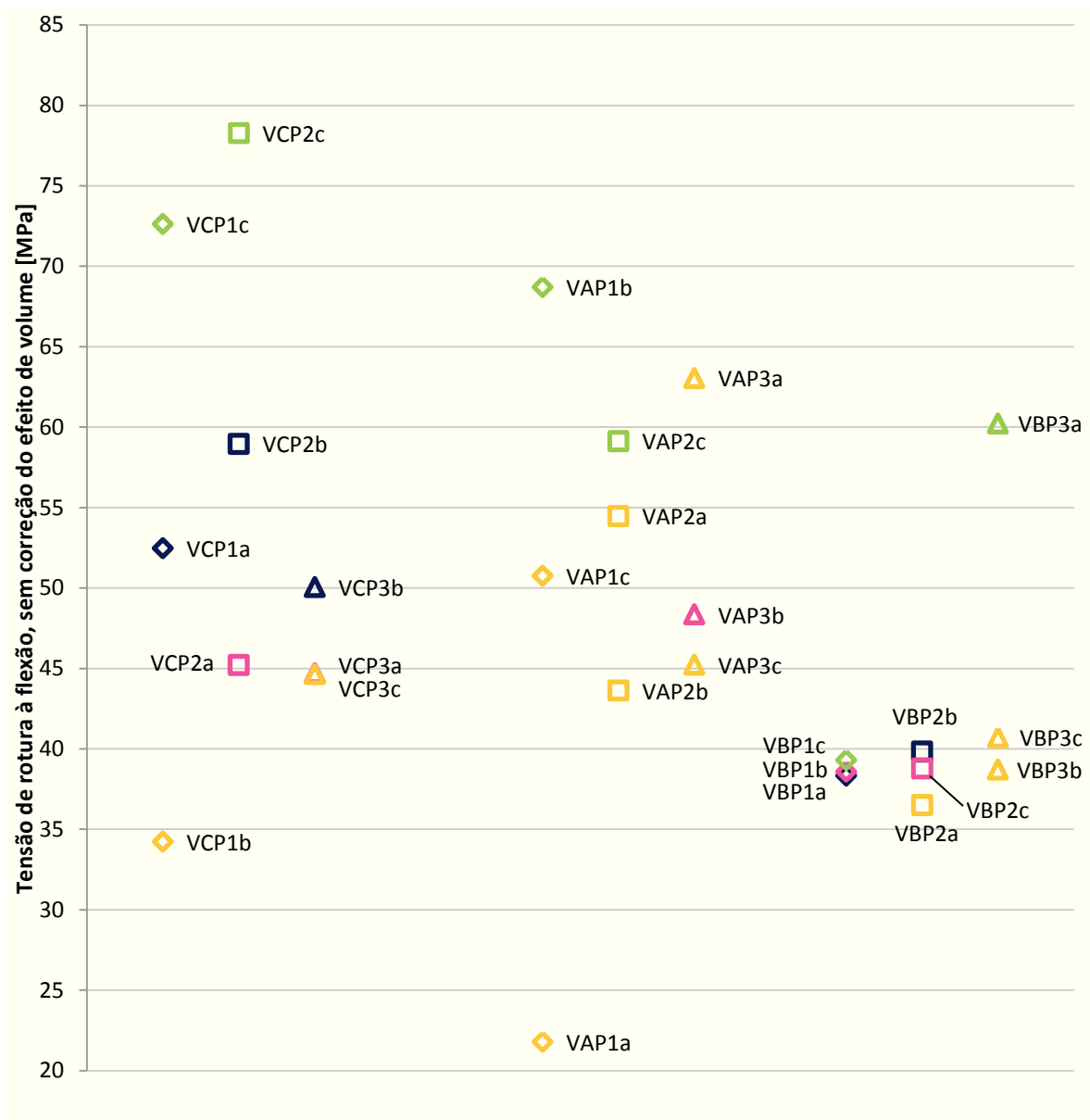
Gaspar (2006) constatou que a rotura das vigas se deu de forma frágil, com rápida propagação das fendas.

O autor concluiu que, na maioria das vigas, o início provável da rotura se deu nas ligações de entalhes múltiplos, dentro ou fora do terço central da viga, nas duas lamelas inferiores. Em 4 das vigas, o início da rotura deu-se em nós situados nas duas lamelas inferiores. A Figura 7 apresenta um sumário gráfico dos resultados obtidos por Gaspar (2006).

Destes ensaios, Gaspar (2006) concluiu que a origem da rotura nas vigas de madeira não tratada (C), parece ter um efeito bem definido na tensão de rotura obtida, aumentando de acordo com a seguinte ordem:

- 1) Localização de ligações de topo no terço central ou a pequena distância deste, nas lamelas inferiores;
- 2) Localização de nós no terço central, nas duas lamelas inferiores;
- 3) Localização de ligações de topo fora do terço central, a uma distância deste superior a 15 cm.

Nas vigas de madeira tratada, Gaspar (2006) constatou que este efeito não era tão marcado. Para além disso não se observou qualquer aparente influência da pressão de aperto na resistência das vigas, nem está definida a influência do tratamento preservador.



Legenda:

Pressão de aperto	Início provável de rotura (nas duas lamelas inferiores)
◇ 1,12 MPa	◇, □ ou △ ligação de entalhes múltiplos no terço central
□ 0,90 MPa	◇, □ ou △ nós no terço central
△ 0,60 MPa	◇, □ ou △ ligação de entalhes múltiplos a distância inferior a 150 mm do terço central
	◇, □ ou △ ligação de entalhes múltiplos a distância superior a 150 mm do terço central

Figura 7: Sumário gráfico da tensão de rotura das vigas
Resultados obtidos por Gaspar (2006)

3.2 Modelação numérica

Para modelar as vigas ensaiadas por Gaspar (2006) escolheu-se o método dos elementos finitos, com recurso a elementos finitos tridimensionais do tipo paralelepédico.

3.2.1 Método dos elementos finitos

3.2.1.1 Escolha do tipo de elementos finitos

O *software* escolhido para modelar as vigas ensaiadas por Gaspar (2006) foi o SIMULIA Abaqus CAE 6.10, da Dassault Systèmes.

Neste trabalho foi avaliada a possibilidade de usar elementos finitos de 8 nós (Figura 8) ou de 20 nós (Figura 9).

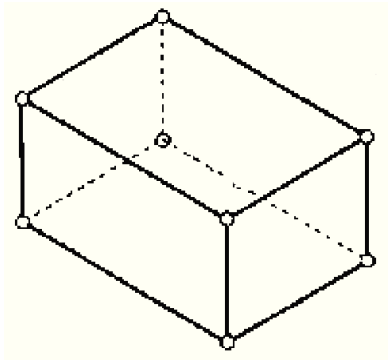


Figura 8: Elemento finito 3D de 8 nós.
Adaptado de Zienkiewicz e Taylor (2000)

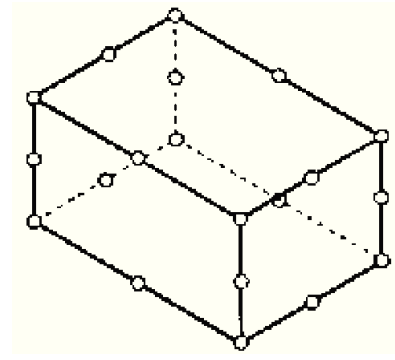


Figura 9: Elemento finito 3D de 20 nós.
Fonte: Zienkiewicz e Taylor (2000)

Os elementos finitos tridimensionais de 8 nós (Figura 8) têm apenas um nó em cada vértice do paralelepípedo e usam funções interpoladoras lineares. Os de 20 nós (Figura 9) são elementos da família *serendipity* e têm um nó extra em cada aresta em relação ao elemento de 8 nós, o que requer o uso de funções interpoladoras quadráticas. Devido a isto, este último é computacionalmente mais lento que o elemento de 8 nós, mas a função de interpolação quadrática permite que o elemento finito se ajuste melhor à deformação da peça, pois permite-lhe acompanhar curvas.

- Para testar a adequabilidade do tipo de elemento finito e do tamanho da malha, modelou-se no Abaqus CAE uma viga isotrópica com as dimensões 2880 mm x 150 mm x 80 mm. O carregamento e configuração de apoio usados são os da Figura 6 e ainda de acordo com o seguinte: módulo de elasticidade (E) = 15 800 MPa;
- coeficiente de Poisson (ν) = 0,40;
- apoios lineares, um fixo, outro apenas com o deslocamento limitado segundo a vertical;
- carregamento $F/2 = 36,32$ kN, aplicado numa área de 10×80 mm².

Foram testados 3 tipos de elemento finito, aqui denominados segundo a nomenclatura do Abaqus (Dassault Systèmes 2010):

- C3D8R: elemento finito paralelepipedico de 8 nós, integração reduzida;
- C3D8: elemento finito paralelepipedico de 8 nós, integração completa;
- C3D20: elemento finito paralelepipedico de 20 nós, integração completa.

Integração reduzida ou completa refere-se à integração numérica usada pelo Abaqus CAE, mais propriamente à redução do número de pontos usados no método de Gauss. Em C3D8 há $2 \times 2 \times 2$ pontos de Gauss, mas um C3D8R tem apenas 1 ponto de Gauss (Dassault Systèmes 2010). Integração reduzida requer menos poder de computação do que integração completa.

A tensão das fibras inferiores da viga a meio vão, calculada pela teoria da Resistência dos Materiais é de 108,96 MPa. No Quadro 4, apresentam-se as tensões das mesmas fibras obtidas pelos vários tipos de elemento finito:

Quadro 4: Teste de diferentes tipos de elemento finitos e abertura de malha

Elemento finito	Tamanho médio do elemento	Tensão a meio vão	Tempo de cálculo (aproximado)
C3D8R	10 mm	102,46 MPa	1 min
C3D8R	5 mm	105,40 MPa	15 min
C3D8	10 mm	105,94 MPa	30 seg
C3D8	5 mm	107,43 MPa	40 min
C3D8 (não linear)	10 mm	107,50 MPa	-
C3D20	40 mm	108,96 MPa	30 seg
C3D20	20 mm	108,96 MPa	30 seg
C3D20	10 mm	108,96 MPa	11 min

Os resultados menos bons obtidos nos modelos com o elemento C3D8 podem-se dever ao fenómeno de *shear locking* a que poderão estar sujeitos os elementos lineares de integração

completa em flexão (Dassault Systèmes 2010). Como se pode ver na Figura 10, um elemento linear sob flexão pura fica distorcido, pois a interpolação das dimensões do elemento é linear. Este tipo de deformação só é compatível com um estado de tensão que inclua tensões de corte, os quais não existem em flexão pura. Em vez de ter apenas tensões normais no elemento, como seria expectável, parte das tensões normais são transformadas em tensões de corte, resultando em tensões normais de valor inferior ao esperado. Para todos os efeitos, isto corresponde a um aumento artificial da rigidez axial (*shear locking*).



Figura 10: Elemento finito linear de integração completa sob flexão pura.

Fonte: Dassault Systèmes (2010).

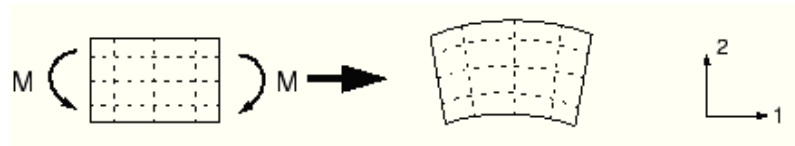


Figura 11: Elemento finito quadrático de integração completa sob flexão pura.

Fonte: Dassault Systèmes (2010)

Uma maneira de combater este problema é considerar a não linearidade geométrica durante a deformação. Para uma malha de 10 mm, C3D8 deu resultados mais próximos do correto, considerando a não linearidade (ver Quadro 4).

O problema do *shear locking* é muito menor nos elementos quadráticos, que simulam a rotação, devido às funções de forma serem quadráticas. Apenas em casos especiais há *shear locking*, tais como elementos distorcidos ou sujeitos a um gradiente de tensão de flexão.

Elementos finitos lineares de integração reduzida têm, geralmente, rigidez insuficiente (*hourglassing*). O Abaqus CAE introduz um pouco de rigidez artificial no C3D8R para combater este problema. Não obstante isto, os resultados não são os esperados.

Os elementos C3D20 deram bons resultados, mesmo com uma malha mais grosseira, e foi este o elemento finito escolhido para prosseguir com o trabalho.

O manual do *software* utilizado (Dassault Systèmes 2010) recomenda o elemento C3D20R, um elemento paralelepípedo, quadrático e de integração reduzida, para a grande maioria das situações. Este elemento também tem problemas de *hourglassing* como os elementos lineares,

mas estes não se propagam ao longo da malha numa situação habitual e tem também a vantagem de não ter problemas de *shear locking*. Usar C3D20R foi uma hipótese a considerar caso se viesse a verificar que um modelo completo com C3D20 requeresse demasiado tempo de computação, o que não se veio a verificar.

3.2.1.2 Ortotropia

Um dos objetivos, à partida, era fazer modelos ortotrópicos das vigas ensaiadas, para melhor simular o comportamento da madeira. Construiu-se um modelo ortotrópico no Abaqus CAE, usando o modo *Engineering Constants* para o material. O comportamento do material continua a ser puramente elástico.

Como o único parâmetro de entrada do modelo é o módulo de elasticidade paralelo ao fio (E_0), os módulos de elasticidade radial e tangencial têm de ser estimados. Como não é prático determinar estas direções para cada tábua de cada lamela, considerou-se apenas um módulo de elasticidade perpendicular ao fio (E_{90}), cujo valor é estimado usando a expressão 7.2.6 para resinosas da norma EN 384 (2004):

$$E_R = E_T = E_{90} = \frac{E_0}{30} \quad (3.1)$$

Para estimar G_{LR} e G_{LT} usou-se a expressão 7.2.7 da norma EN 384 (2004):

$$G_{LR} = G_{LT} = \frac{E_0}{16} \quad (3.2)$$

Para estimar G_{RT} , usou-se a relação sugerida por Bodig e Jayne (1993):

$$G_{RT} = \frac{E_0}{140} \quad (3.3)$$

dado que este valor é mais exato que o apresentado pela norma EN 384 (2004).

Gaspar (2010), num problema semelhante, realizou uma recolha bibliográfica de vários autores e, após uma análise de sensibilidade, chegou à conclusão que usar o valor genérico de 0,4 para o coeficiente de Poisson (ν) é suficiente e tem pouco impacto nos resultados se se usar valores de autores diferentes. Por este motivo, usou-se os coeficientes de Poisson $\nu_{LR} = \nu_{LT} = \nu_{RT} = 0,4$.

3.2.1.3 Limitação de concentração de tensões

Numa primeira tentativa de limitar a concentração de tensões nas singularidades, decidiu-se que o modelo teria apoios em aço com as dimensões 80 mm x 80 mm x 20 mm. As chapas apoiam a meio em apoios lineares (tipo cilíndrico, alinhados segundo a profundidade da peça), um fixo, outro limitando apenas o deslocamento segundo a vertical. Deste modo, a viga de madeira pode rodar nos apoios à medida que se deforma. A transmissão do carregamento fez-se por intermédio de chapas da mesma dimensão.

Tentou-se que as chapas e a viga de madeira fossem peças separadas e que as forças fossem transmitidas por contacto, de modo a que a viga pudesse deslizar livremente entre as placas à medida que se deforma. Dado que não se conseguiu obter bons resultados, optou-se por tratar a viga de madeira e os apoios da chapa como uma peça monolítica.

A introdução das chapas conduziu a um novo problema, nomeadamente, a inserção de tensões segundo o eixo 11 (longitudinal) que não deviam existir e picos de tensão segundo o eixo 22 (vertical) onde as arestas das chapas entram em contacto com a viga de madeira, originando valores com o triplo do esperado. De facto, é de esperar que no contacto com as chapas de apoio as tensões sejam um pouco elevadas, no entanto tal só será possível modelar de modo aceitável com um modelo não linear, dado que nas zonas de contacto dos apoios será de esperar a ocorrência de plastificação da madeira, uma vez que os dois materiais em contacto têm módulos de elasticidade substancialmente diferentes.

A alteração da dimensão da malha não é uma solução para este problema, tendo-se inclusivamente verificado que malhas mais finas produzem picos de tensão de maior valor.

Reduzir o módulo de elasticidade das chapas de 210 GPa para algo mais próximo do módulo de elasticidade da madeira de pinho bravo, tal como 30 GPa, mitiga o problema, tendo-se constatado que a influência das concentrações de tensões desaparece na vizinhança dos apoios. Por este motivo, escolheu-se não utilizar as chapas metálicas para a aplicação das cargas de ensaio na viga, uma vez que as tensões obtidas são mais próximas da realidade.

3.2.1.4 Modelo final

Escolheu-se usar elementos finitos de 20 mm x 20 mm x 15 mm, do tipo C3D20, exceto nos topos da viga, onde se usou elementos 25 mm x 20 mm x 15 mm num comprimento de 50 mm, devido restrições geométricas. O material da viga é ortotrópico, com o eixo paralelo ao

fio coincidente com a direção longitudinal da viga. As direções radial e tangencial da madeira são simplificadas como sendo perpendiculares ao fio.

A viga apoia sobre chapas de dimensão 80 mm x 80 mm x 20 mm, constituídas por material isotrópico com módulo de elasticidade igual a 30 GPa. Estas chapas são apoiadas a meio em apoios lineares (cilíndricos), sendo o apoio da esquerda fixo e o da direita móvel.

Cada uma das duas forças é aplicada numa área de 80 x 80 mm² da viga, sob a forma de uma pressão (convertida automaticamente para cargas nodais pelo *software*), sem qualquer material de interface.

3.2.2 Dados de entrada dos modelos

Os dados de entrada dos modelos de elementos finitos são os módulos de elasticidade longitudinais locais das lamelas. Conforme referido na secção 3.1.2, o módulo de elasticidade local das tábuas que constituem as lamelas foi medido de 150 em 150 mm, exceto nos topos. As restantes componentes da matriz de elasticidade ortotrópica são obtidos em função do módulo de elasticidade longitudinal e as relações adotadas são as constantes na secção 3.2.1.2.

Com recurso à informação de cada tábua e da sua disposição final nas vigas ensaiadas foi possível obter toda a geometria das vigas e a localização dos pontos onde as tábuas foram ensaiadas, como se pode ver nas Figuras 12, 13 e 14.

A cada ponto de ensaio, foi atribuído o módulo de elasticidade local medido, numa zona de influência com 150 mm de comprimento, centrado no referido ponto. Ao comprimento da tábua que fica fora destas zonas de influência, correspondendo aos topos da tábua, foi atribuído o módulo de elasticidade médio da tábua. Dado que os pontos de ensaios das tábuas não coincidem exatamente com a geometria da malha de elementos finitos, foram realizados os ajustamentos necessários para que esta correspondência fosse o mais próxima possível.

Não foram consideradas propriedades especiais para as ligações de entalhes múltiplos. São tratadas apenas como sendo a fronteira entre duas tábuas. Morita *et al.* (2003) estudaram a influência de uma ligação de entalhes múltiplos na rigidez de lamelas de criptoméria (*cryptomeria japonica* David Don Linné fils) e chegou à conclusão de que a rigidez da ligação de entalhes múltiplos à tração é aproximadamente igual à média da rigidez das tábuas

que são ligadas. No entanto, não seria relevante usar a média da rigidez das tábuas e, para além disso, não se dispõe de informação detalhada acerca do módulo de elasticidade na zona da ligação.

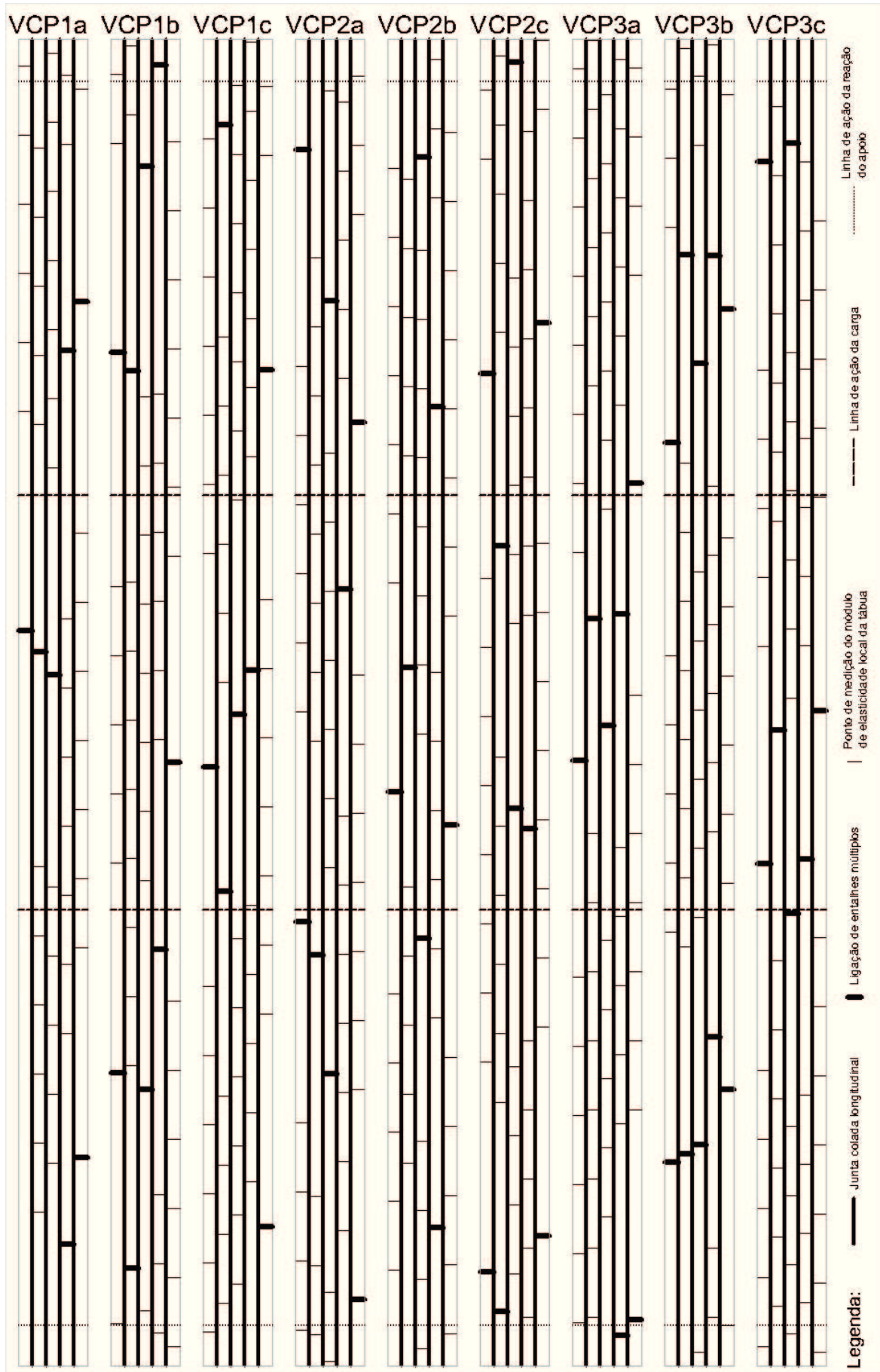


Figura 12: Disposição geométrica dos modelos das vigas sem tratamento (C)

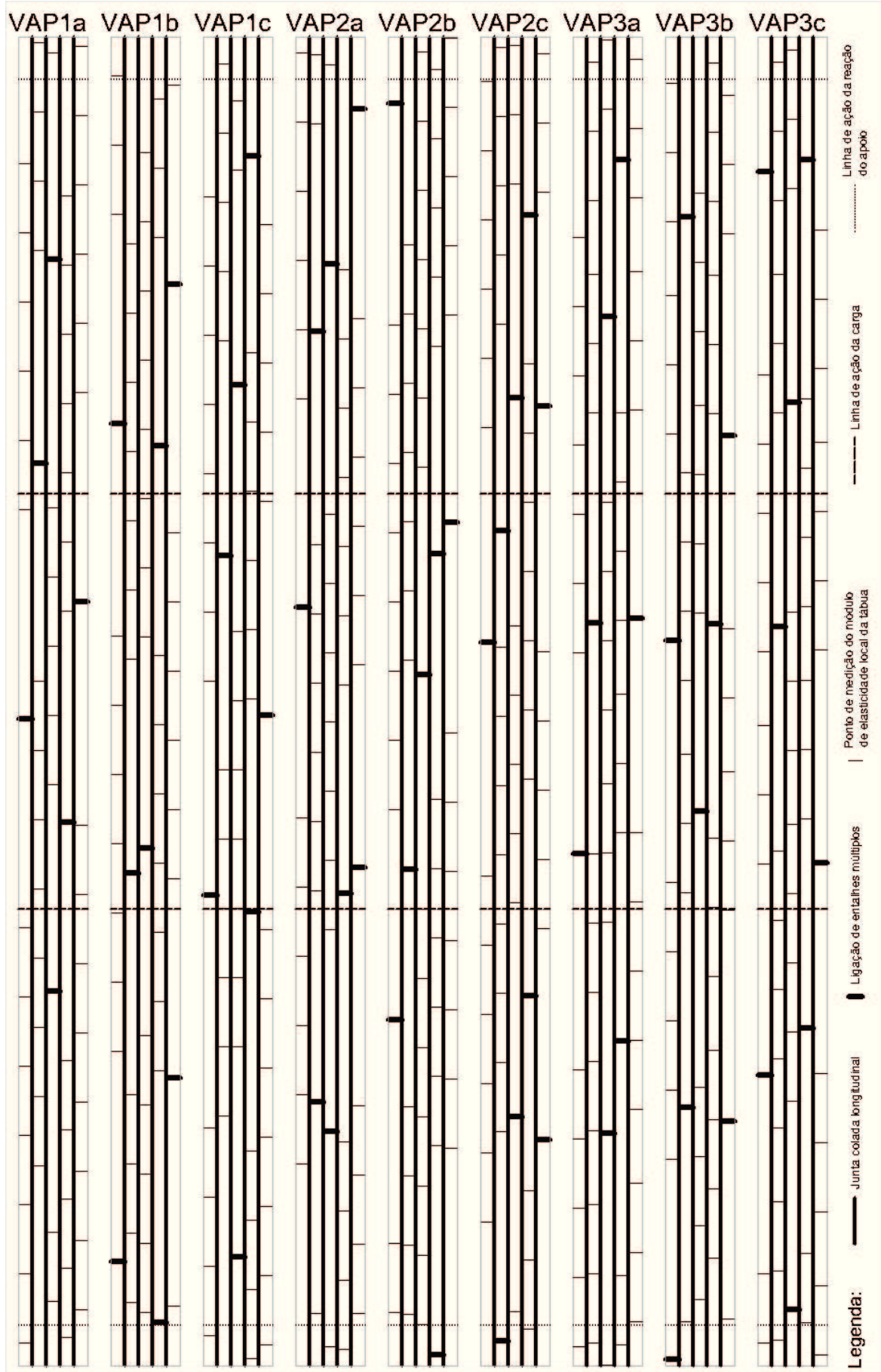


Figura 13: Disposição geométrica dos modelos das vigas com tratamento A

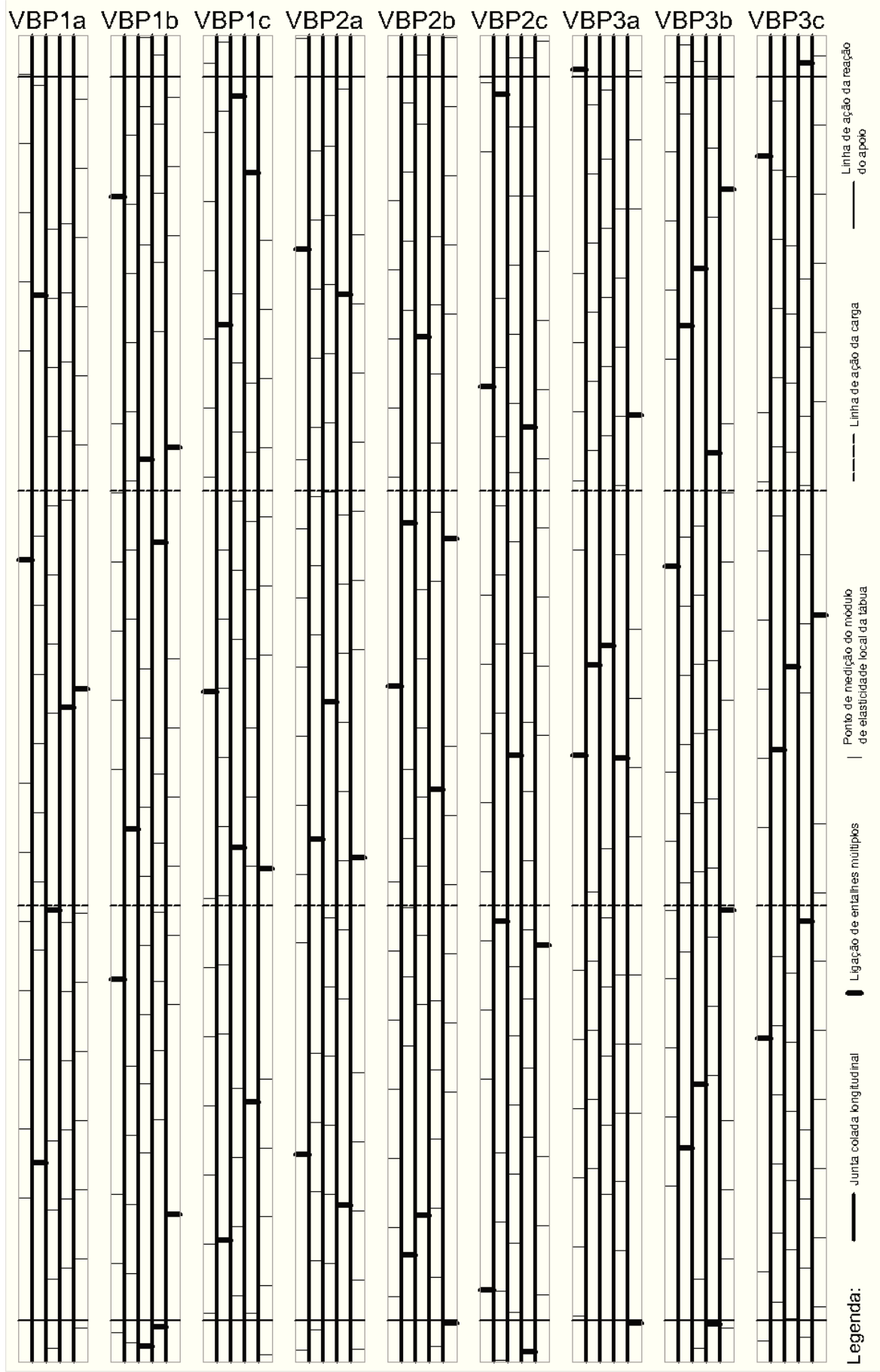


Figura 14: Disposição geométrica dos modelos das vigas com tratamento B

3.2.2 Cargas

As cargas usadas nos modelos das vigas foram as cargas de rotura obtidas por Gaspar (2006) em ensaio à flexão nas vigas correspondentes.

3.2.3 Critério de rotura

Para materiais isotrópicos, pode usar-se o critério rotura de Tresca ou de Von Mises é suficiente. Num material ortotrópico, a simples análise das tensões nas várias direções de ortotropia não é suficiente para determinar se o ponto em estudo atingiu a rotura. O estudo de S_{11} , S_{22} e S_{12} é adequado para ter a perceção do nível de esforço a que o ponto está sujeito, mas, para saber se o ponto atingiu a rotura, é necessário usar um critério. O critério de rotura escolhido é o critério de Hill (1950), que foi concebido para materiais ortotrópicos:

$$\sigma = F(S_{22} - S_{33})^2 + G(S_{33} - S_{11})^2 + H(S_{11} - S_{22})^2 + 2L(S_{23})^2 + 2M(S_{31})^2 + 2N(S_{12})^2 \quad (3.4)$$

com:

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{2} \left[-\frac{1}{(S_{11,r})^2} + \frac{1}{(S_{22,r})^2} + \frac{1}{(S_{33,r})^2} \right] & L &= \frac{1}{2(S_{23,r})^2} \\ G &= \frac{1}{2} \left[\frac{1}{(S_{11,r})^2} - \frac{1}{(S_{22,r})^2} + \frac{1}{(S_{33,r})^2} \right] & M &= \frac{1}{2(S_{31,r})^2} \\ H &= \frac{1}{2} \left[\frac{1}{(S_{11,r})^2} + \frac{1}{(S_{22,r})^2} - \frac{1}{(S_{33,r})^2} \right] & N &= \frac{1}{2(S_{12,r})^2} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Em que $S_{11,c}$, $S_{22,c}$ e $S_{33,c}$ são as tensões de rotura segundo os eixos de ortotropia e $S_{23,c}$, $S_{31,c}$ e $S_{12,c}$ são as tensões de rotura ao corte.

As tensões de rotura da madeira foram estimadas usando o único dado de entrada disponível: o módulo de elasticidade longitudinal (E_0) local das lamelas. Com a reta de regressão de Machado e Cruz (1992) (expressão 3.6), é possível estimar a tensão de rotura à flexão média (f_m).

$$f_m = 3.7 + 5.55 E_0 \quad (3.6)$$

f_m – tensão de rotura à flexão em MPa;

E_0 – módulo de elasticidade longitudinal em GPa.

As tensões de rotura à compressão perpendicular ao fio ($f_{c,0}$), à tração paralela ao fio ($f_{t,0}$), à compressão perpendicular ao fio ($f_{c,90}$), à tração perpendicular ao fio ($f_{t,90}$) e ao corte (f_v) foram estimadas usando as médias dos quocientes entre essas tensões e a tensão de rotura à flexão de todas as espécies de resinosas constantes no *Wood Handbook* do Forest Products Laboratory (2010). As médias dos quocientes estão explicitadas no Quadro 5.

Quadro 5: Relações entre as restantes tensões de rotura e f_m

$f_{c,0}/f_m$	$f_{t,0}/f_m$	$f_{c,90}/f_m$	$f_{t,90}/f_m$	f_v/f_m
0,57	1,06	0,06	0,03	0,11

O critério de Hill (1950) foi concebido para materiais ortotrópicos com igual tensão de rotura à tração e à compressão em cada direção de ortotropia. Uma vez que a madeira tem tensões de rotura diferentes à tração e à compressão, adaptou-se o critério de Hill de modo a usar a tensão de rotura à tração, caso a tensão correspondente do ponto seja de tração, ou a tensão de rotura à compressão, no caso contrário. Isto foi realizado usando expressões condicionais numa folha de cálculo. Logo:

- $S_{11,c} = f_{t,0}$ ou $f_{c,0}$;
- $S_{22,c} = S_{33,c} = f_{t,90}$ ou $f_{c,90}$;
- $S_{23,c} = S_{31,c} = S_{12,c} = f_v$.

Esta página foi deixada intencionalmente em branco

4 *Discussão de Resultados*



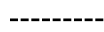

4.1 **Método dos elementos finitos**

Nesta secção faz-se uma análise dos resultados obtidos com os modelos de elementos finitos em cada uma das vigas. Os resultados são apresentados sob a forma de mapas de cores. A legenda dos mapas de cores da densidade das vigas, dos módulos de elasticidade paralelo ao fio usados no modelo de elementos finitos e do critério de Hill (quociente entre a tensão calculada pela equação 3.4 e a tensão de rotura estimada paralela ao fio, à tração ou à compressão, consoante o caso) são apresentados junto aos mapas de cada viga, por esta ordem.

Apresenta-se uma escala, em milímetros, no topo de cada mapa. Na descrição dos resultados obtidos, esta escala é denominada de posição. As lamelas foram identificadas de L1 a L5, por ordem crescente, da lamela inferior à lamela superior da viga. A linha de colagem entre as lamelas L_i e L_j é denominada L_iL_j . Por exemplo, a linha de colagem entre as lamelas L1 e L2 é designada L1L2.

Os mapas foram comparados com a linha de rotura que se verificou quando as vigas foram ensaiadas à flexão (Gaspar 2006). Esta linha de rotura foi desenhada nos mapas, com traçado aproximado, pois a fratura é tridimensional e pode não ser idêntica em ambas as faces da viga.

A restante simbologia dos mapas é a seguinte:

-  Linha da fratura da viga aproximada;
-  Ligação de entalhes múltiplos (LEM);
-  Limite do terço central / linha de ação do carregamento;
-  Limite da zona que dista 15 cm do terço central.

Quando a linha de rotura passa junto da junta de colagem longitudinal, foram consultadas as fotografias tiradas por Gaspar (2006) das vigas após ensaio destrutivo à flexão para determinar se a rotura se deu pela madeira ou pela junta colada.

São também mencionados defeitos, tais como nós e bolsa de resinas, para os quais não foi possível determinar o módulo de elasticidade local, por estarem demasiado perto dos topos das tábuas. Daí resulta que a possível redução de resistência local devida a estes defeitos não foi incluída nos modelos de elementos finitos. No entanto, a presença dos defeitos onde o módulo de elasticidade não foi medido na vizinhança perto da linha de rotura é importante, porque esta poderá ter um trajeto não consistente com os mapas de resultados nestas zonas de defeitos.

4.1.1 Vigas de madeira sem tratamento preservador (C)

4.1.1.1 VCP1a

Neste modelo da VCP1a (Figura 15) não se dispõe de dados para uma porção da lamela L5, correspondendo à porção a branco no mapa de massa volúmica. A esta porção foi atribuído a média do módulo de elasticidade de todas as tábuas sem tratamento em todo o seu comprimento.

A linha de rotura da viga VCP1a passa por três LEM em três lamelas adjacentes e muito próximas umas das outras. Na parte horizontal da linha de rotura, a fratura deu-se pela madeira. A rotura passa pelas zonas de menor módulo de elasticidade, contornando as zonas de maior rigidez. O início provável de rotura é uma bolsa de resina da lamela L1.

A linha de rotura não passou pela zona a laranja da lamela L4 no mapa do critério de Hill, apesar de estar mais esforçada, devido a um pico de tensão S22 resultante da proximidade da linha de aplicação da carga. O facto da rotura se ter dado pelas LEM e não pela zona mais esforçada, sugere que as LEM são zonas que suportam tensão de compressão inferior a uma zona fraca.

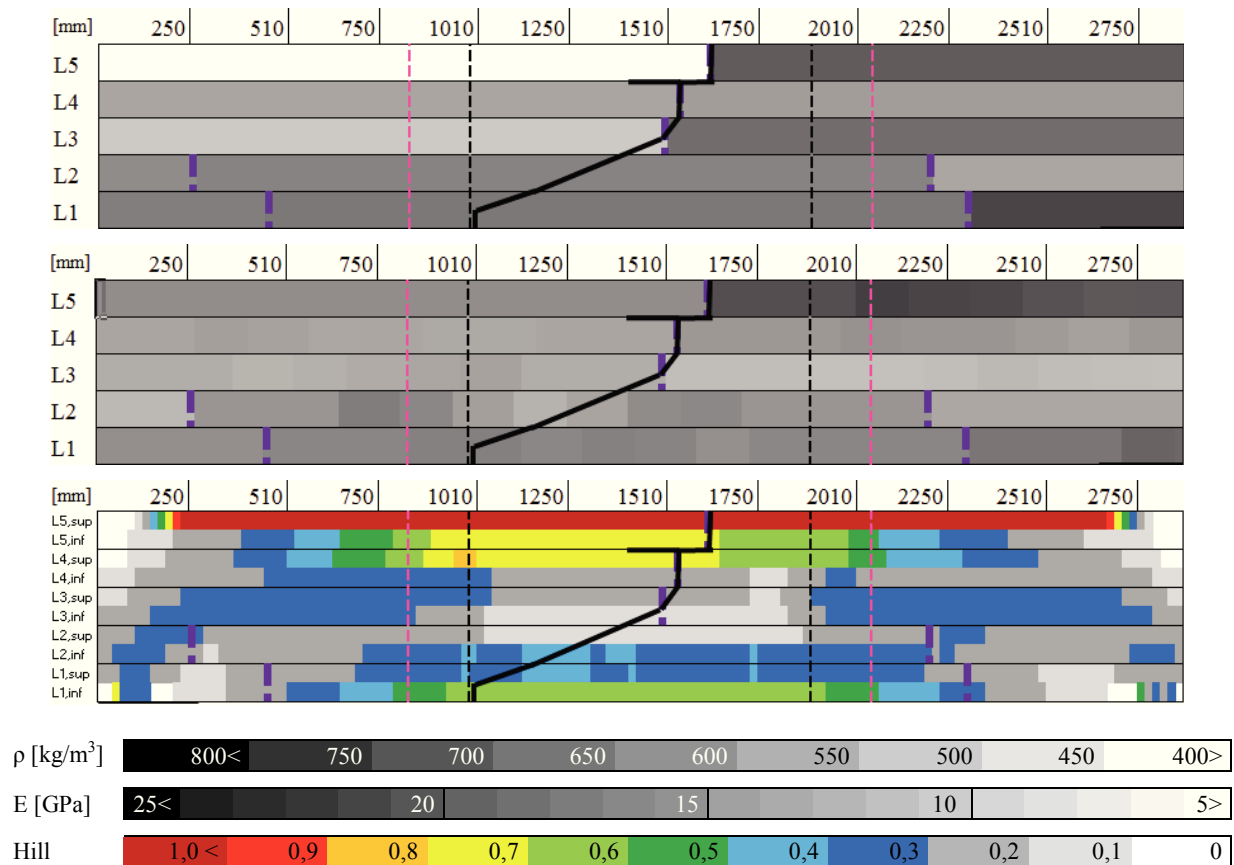


Figura 15: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VCP1a

4.1.1.2 VCP1b

A linha de rotura da VCP1b (Figura 16) passa por uma LEM. Na lamela L4, existe um nó de grandes dimensões, na posição 950 mm, próximo de onde o ramo esquerdo da linha de rotura termina. Este nó não apresenta redução do módulo de elasticidade, mas pode ter influenciado a colagem da junta longitudinal nesta zona. Na lamela L3, há um nó na posição 1100 mm, que é uma zona fraca e pode ser observada no mapa. Na lamela L2, há um nó numa secção onde o módulo de elasticidade não foi medido, junto à LEM da L1 (posição 1300 mm), mas não existem defeitos no ramo direito da linha de rotura na lamela L2. Não há defeitos na lamela L1 que tenham interferido na rotura. A zona a azul claro da L1 no mapa do critério de Hill corresponde a uma bolsa de resina.

As tensões atuantes nas lamelas ficam todas aquém da tensão de rotura estimada, exceto no topo da lamela L5, onde a tensão S11 quase excede a tensão de rotura estimada.

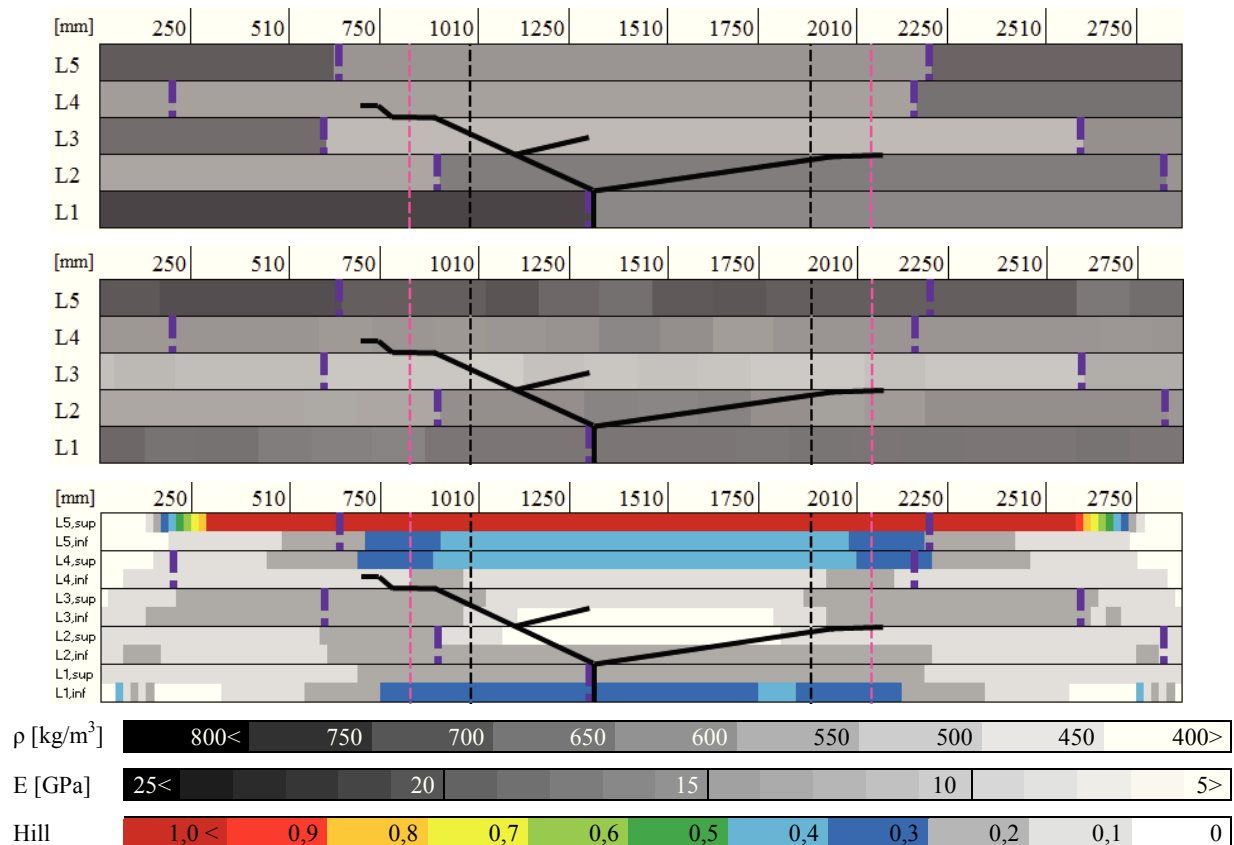


Figura 16: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VCP1b

4.1.1.3 VCP1c

A linha de rotura da VCP1c (Figura 17) passa por uma LEM na L5. Na lamela L5, há um nó na posição 1900 mm, na zona da aplicação da carga direita, que corresponde à zona a vermelho nessa área. No ramo esquerdo da linha de rotura, existe um nó na lamela L4, cuja posição é cerca de 590 mm. O ponto de inflexão do caminho de rotura do lado direito da viga, na lamela L3 na posição 1550 mm, à direita da LEM, deve-se a um nó numa zona onde o módulo de elasticidade não foi medido.

O modelo atinge a rotura na tensão S11 nas fibras superiores da viga e na junta L4L5, tanto a lamela L4 como a lamela L5 estão muito perto da rotura. A viga VCP1c aparenta ter rompido por compressão da LEM da lamela L5, com propagação da rotura para as zonas de corte máximo, onde também se está presente a concentração de tensão S22 devido à proximidade do ponto de aplicação das cargas.

Constata-se que para a viga VCP1c, que atingiu uma carga elevada nos ensaios em relação às outras vigas, o mapa do critério de Hill acompanha aproximadamente o trajeto da rotura da viga ensaiada.

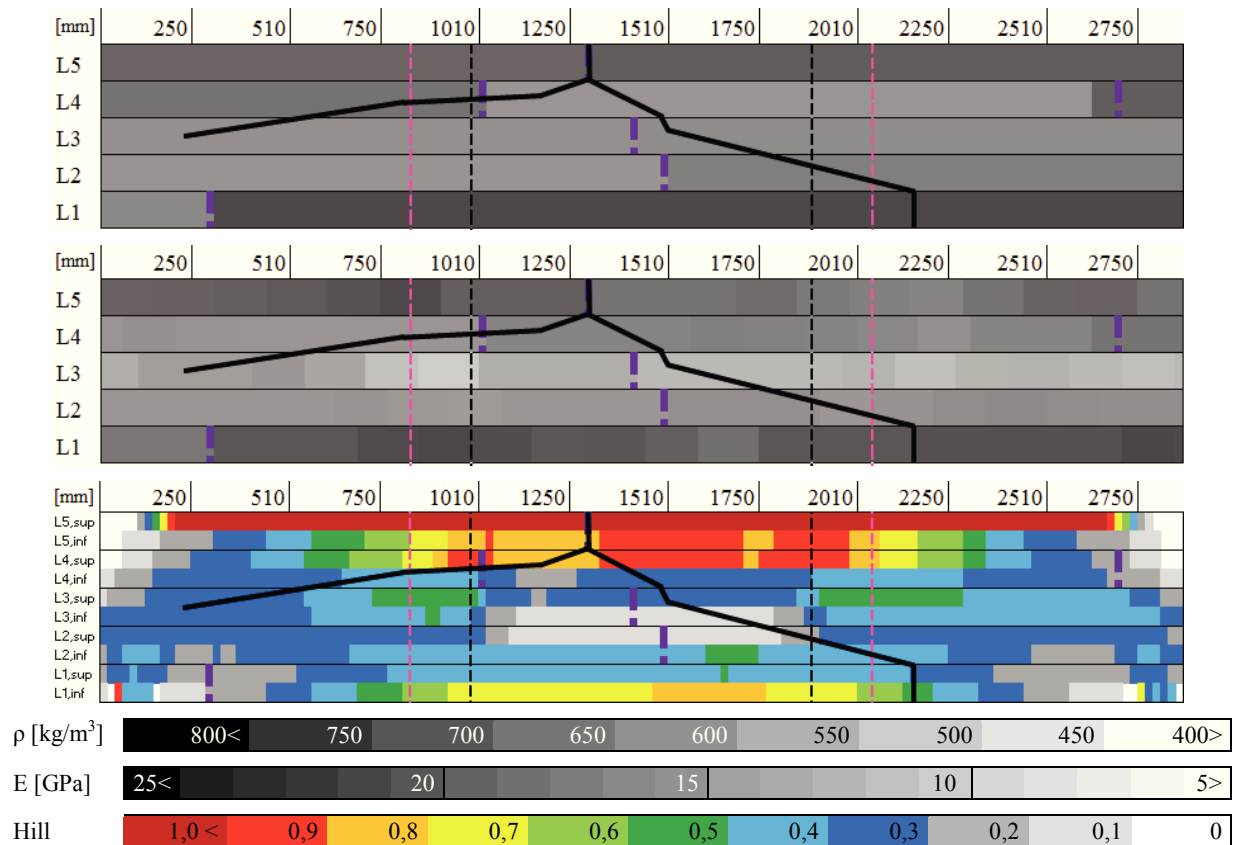


Figura 17: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VCP1c

4.1.1.4 VCP2a

A viga VCP2a (Figura 18) apresenta duas linhas de rotura. A principal une as zonas de corte máximo e passa por uma LEM na lamela L1. A linha de rotura desenvolveu-se principalmente na lamela L3, que apresenta dois grandes defeitos: nós múltiplos na posição 1230 mm e um nó de grandes dimensões agrupado com uma bolsa de resina, na posição 500 mm (aproximadamente), que é uma secção onde o módulo de elasticidade não foi medido e que corresponde ao início da rotura do lado esquerdo. A parte horizontal da linha de rotura que se desenvolve na junta L3L4 rompeu pela cola. Note-se que esta linha de rotura passou junto, mas não através de três LEM, o que sugere que as LEM terão maior resistência à propagação de fendas que a madeira circundante.

A outra linha de rotura é pequena, fica na vizinhança da posição 2150 mm da lamela L5 e une dois nós desta lamela.

Apenas tensão de rotura S11 estimada é ultrapassada e apenas nas zonas de aplicação das cargas (topo da lamela L5).

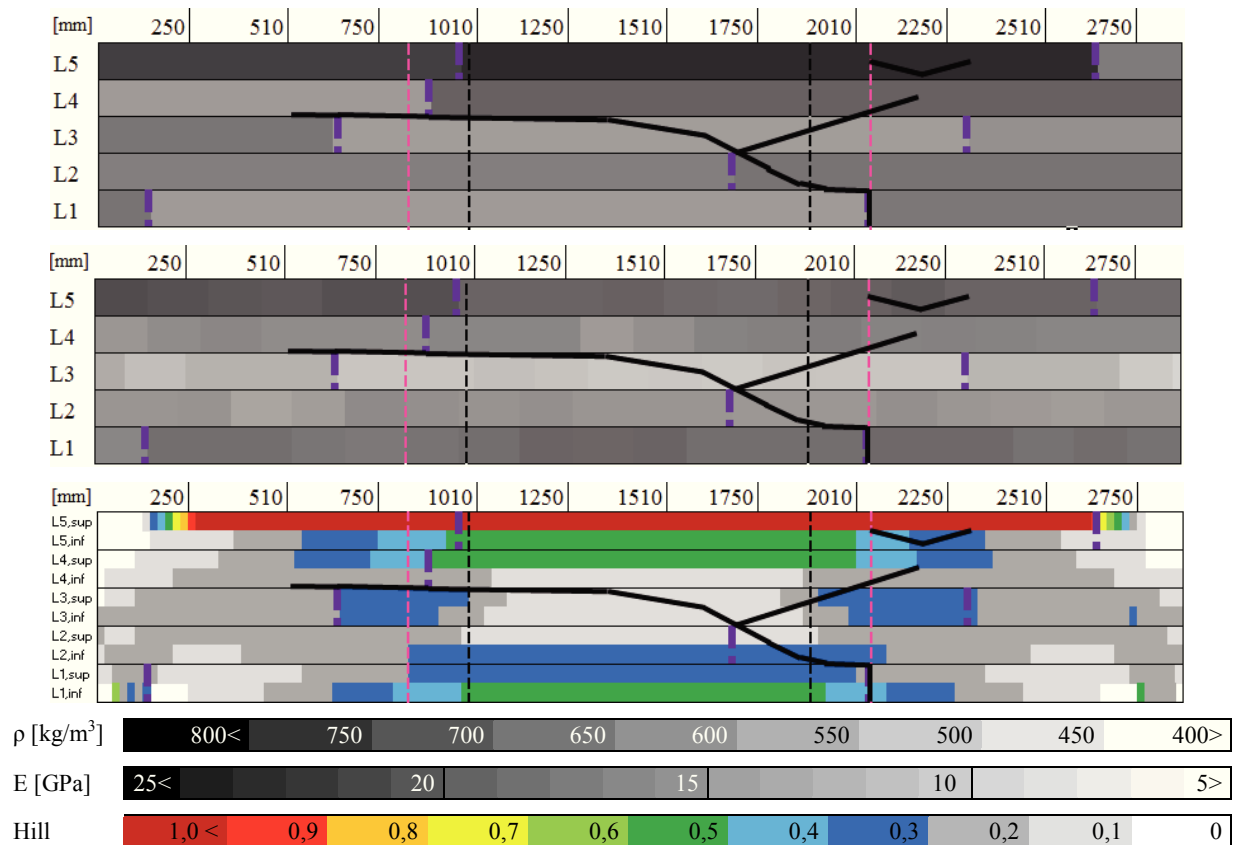


Figura 18: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VCP2a

4.1.1.5 VCP2b

A viga VCP2b (Figura 19) tem duas linhas de rotura separadas, uma na zona à compressão S11, outra na zona à tração.

Na linha de rotura da zona comprimida, há uma zona com duas bolsas de resina na lamela L4, numa secção onde o módulo de elasticidade não foi medido, imediatamente abaixo da LEM da lamela L5 (posição aproximada: 1250 mm). Sendo uma zona fraca, é de prever que a rotura passe por essa zona apesar de não aparecer no critério de Hill. A zona a laranja na lamela L5 no mapa do critério de Hill, na posição 1750 mm, deve-se a um decréscimo do módulo de elasticidade dessa zona da lamela L5, sem haver nenhum defeito visível.

Na linha de rotura da zona tracionada, existe um nó pequeno na lamela L3 e outro justaposto na lamela L2, na posição 1350 mm. A LEM da lamela L1 rompeu pelos dentes da ligação.

A linha de rotura acompanha muito bem as zonas mais esforçadas no mapa do critério de Hill.

No modelo, as fibras no topo da viga excedem a tensão de rotura S11 estimada e as fibras junto à junta colada L4L5 estão muito perto da tensão de rotura S11 estimada. Isto aponta para que o início da rotura se tenha dado por esmagamento da LEM da lamela L5.

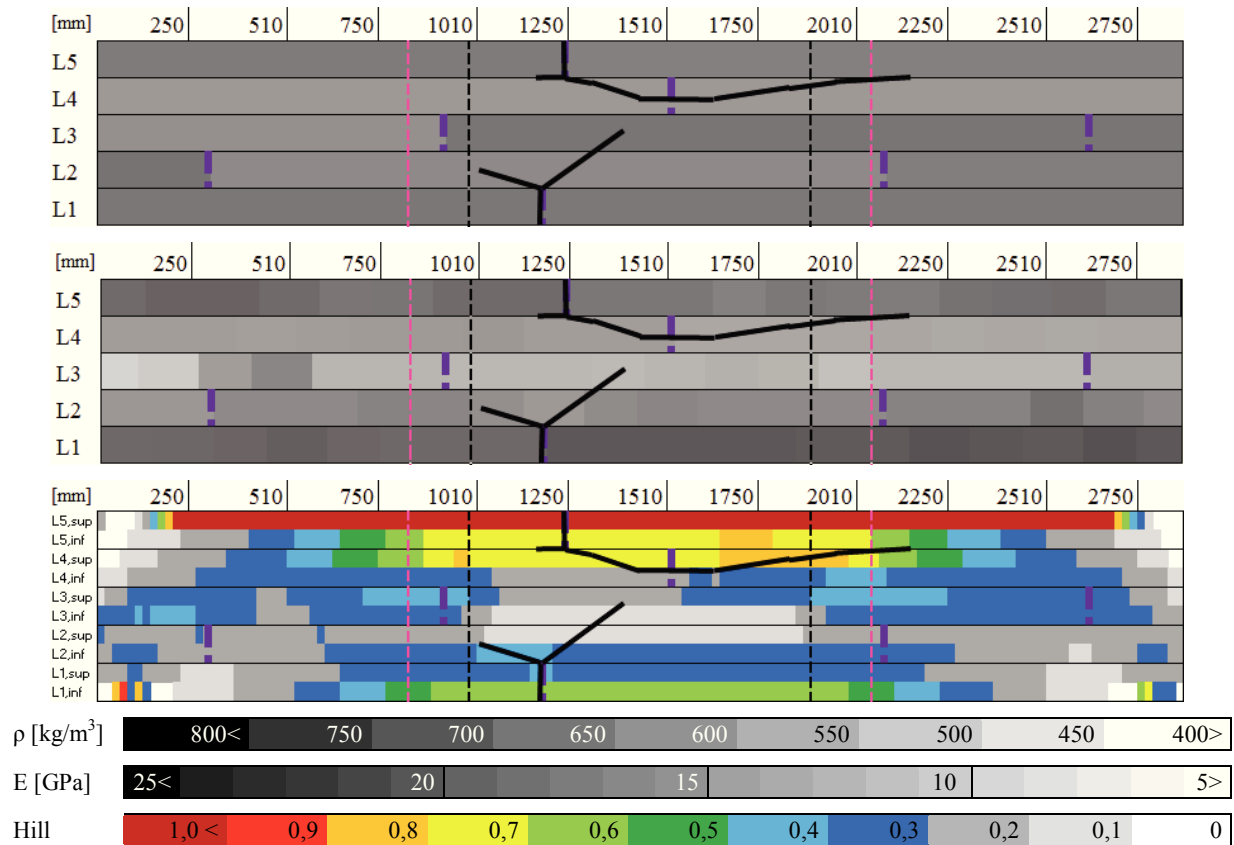


Figura 19: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VCP2b

4.1.1.6 VCP2c

A viga VCP2c foi a viga que suportou maior carga em ensaio.

A linha de rotura da VCP2c (Figura 20) passa por uma LEM, na lamela L1. Existem dois defeitos junto à linha de rotura. Um, é um nó pequeno na lamela L5 na posição 1450 mm, não repassado e numa secção onde o módulo de elasticidade não foi medido, onde termina a linha de rotura do lado esquerdo. Essa linha desenvolve-se ao longo da junta colada, mas rompeu pela madeira. Na lamela L4, existe um nó de grandes dimensões juntamente com uma bolsa de resina na posição 1900 mm, numa secção onde o módulo de elasticidade não foi medido. Esta é uma zona indicada pelo mapa do critério de Hill como tendo atingido a rotura, mesmo sem ter em conta a redução de resistência devida a um nó de grandes dimensões.

A tensão de rotura S11 estimada é excedida nas fibras superiores da lamela L5. Na junta colada L4L5, tanto na lamela L4 como L5, a tensão S11 está muito perto do seu valor de rotura estimado. Note-se as zonas que atingiram a rotura na lamela L4, devido à presença à proximidade das cargas (picos de tensão S22) e da menor resistência desta lamela em relação à lamela L5.

O início provável de rotura aparenta ser o esmagamento da zona fraca na vizinhança do nó na lamela L4. Outro fator que poderá ter contribuído para a propagação da fenda no lado direito da viga é o facto de a LEM no lado direito da lamela L1 estar mais próxima do terço central que a LEM do lado esquerdo.

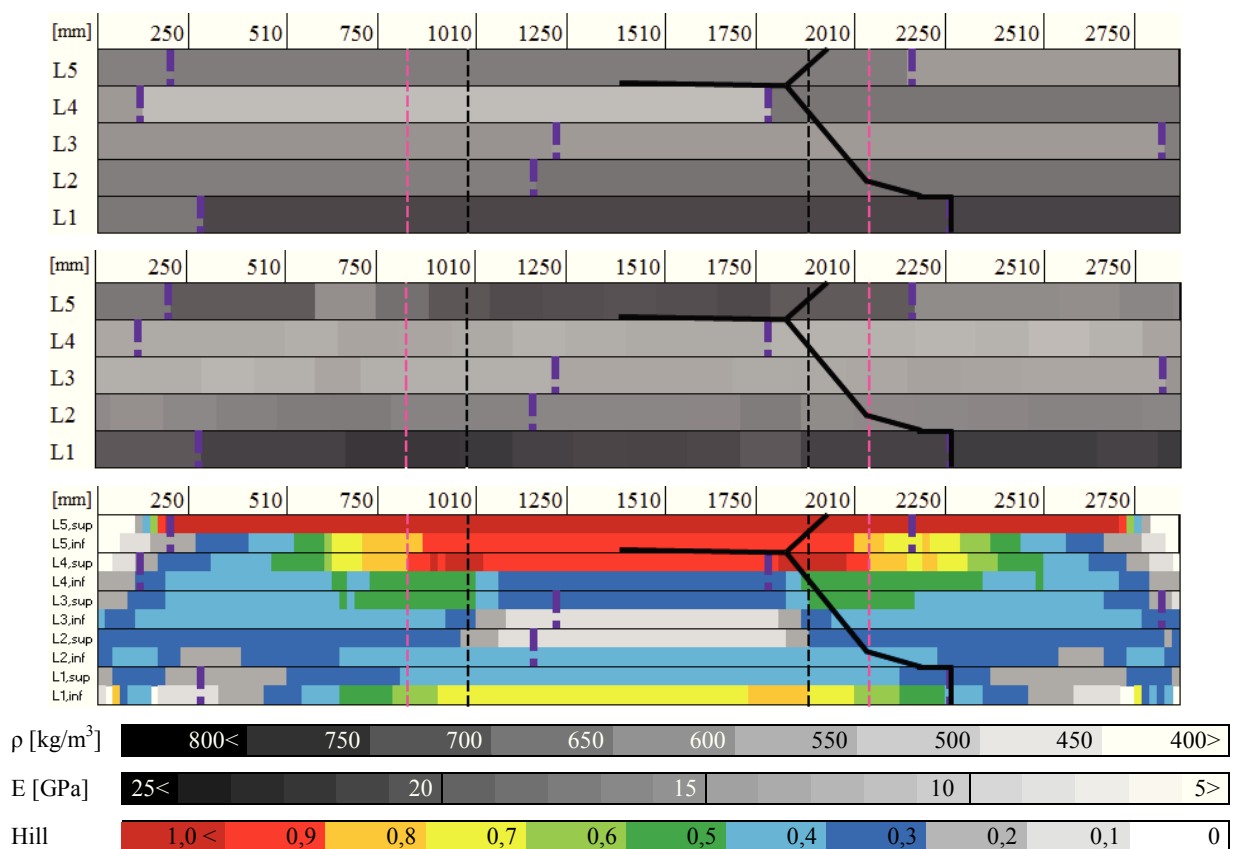


Figura 20: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VCP2c

4.1.1.7 VCP3a

A viga VCP3a (Figura 21) apresenta uma linha de rotura que passa por uma LEM na vertical, na lamela L5 e outra atravessando outra LEM, na lamela L4. Ao longo da linha de rotura não existem grandes defeitos, havendo um nó muito pequeno na lamela L5 na posição 1500 mm, numa secção onde o módulo de elasticidade não foi medido, e outro nó pequeno na lamela L3

na posição 1850 mm. A linha de rotura do lado direito termina num agrupamento de nós na posição 2600 mm.

A linha de rotura aparenta seguir aproximadamente as zonas mais esforçadas no mapa do critério de Hill. A linha de rotura do lado direito segue ao longo da junta colada, mas rompeu pela madeira. Esta última aparenta ter rompido por corte.

Na VCP3a, apenas a zona de aplicação das cargas excede a tensão de rotura S11 estimada. O início provável de rotura é a LEM na lamela L5, por compressão.

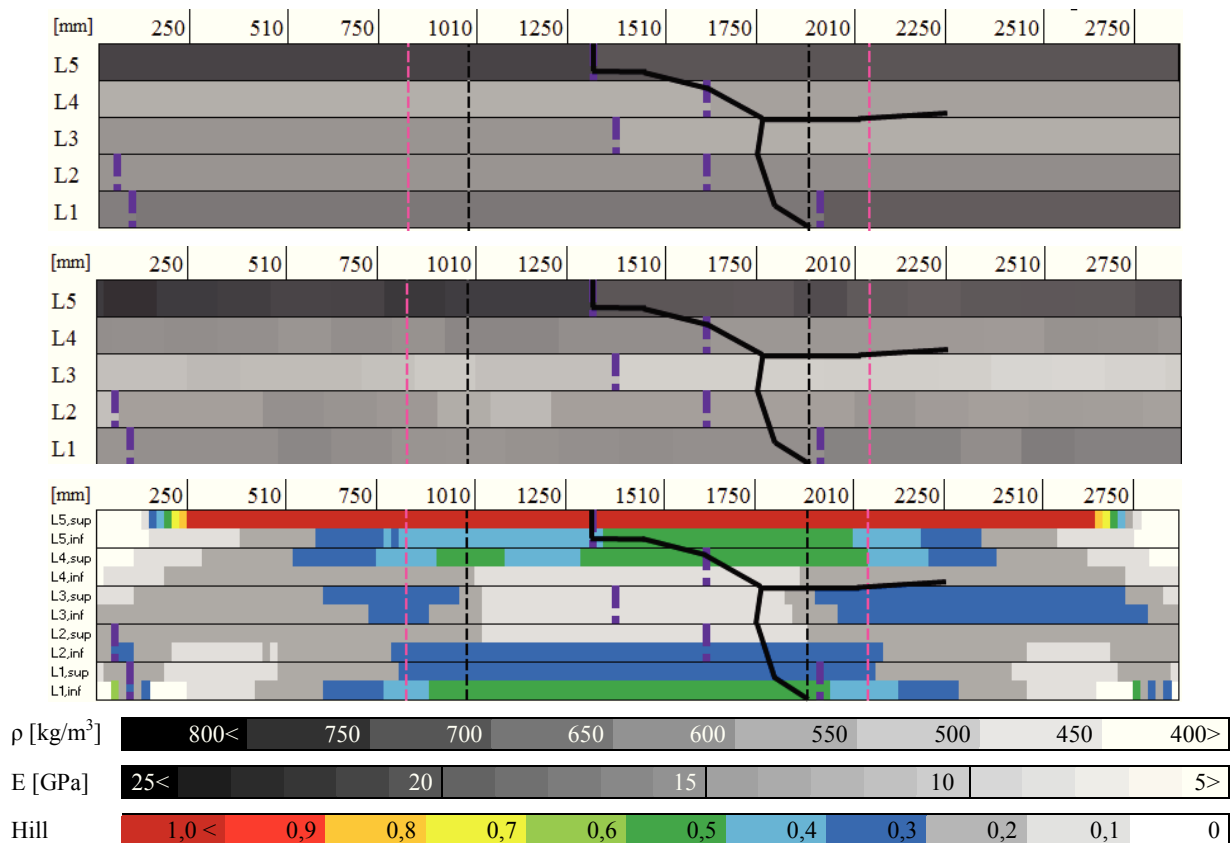


Figura 21: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VCP3a

4.1.1.8 VCP3b

A viga VCP3b (Figura 22) apresenta uma linha de rotura que passa por uma LEM, na lamela L5. Na lamela L4, o ramo da esquerda da linha de rotura passa por uma bolsa de resina, na posição 1200 mm e por um nó de grandes dimensões, na posição 1400 mm. Na lamela L3, as linhas de rotura juntam-se e passam num nó na posição 1700 mm, que tem rigidez muito

baixa, conforme se pode ver no mapa de módulos de elasticidade. Na lamela L1, a rotura passa num nó na posição 1650 mm, que foi o início provável da rotura.

O mapa do critério de Hill mostra que a linha de rotura se desenvolveu nas zonas mais esforçadas da viga.

A VCP3b excede, mas por pouco, a tensão de rotura S11 estimada nas fibras no topo da viga.

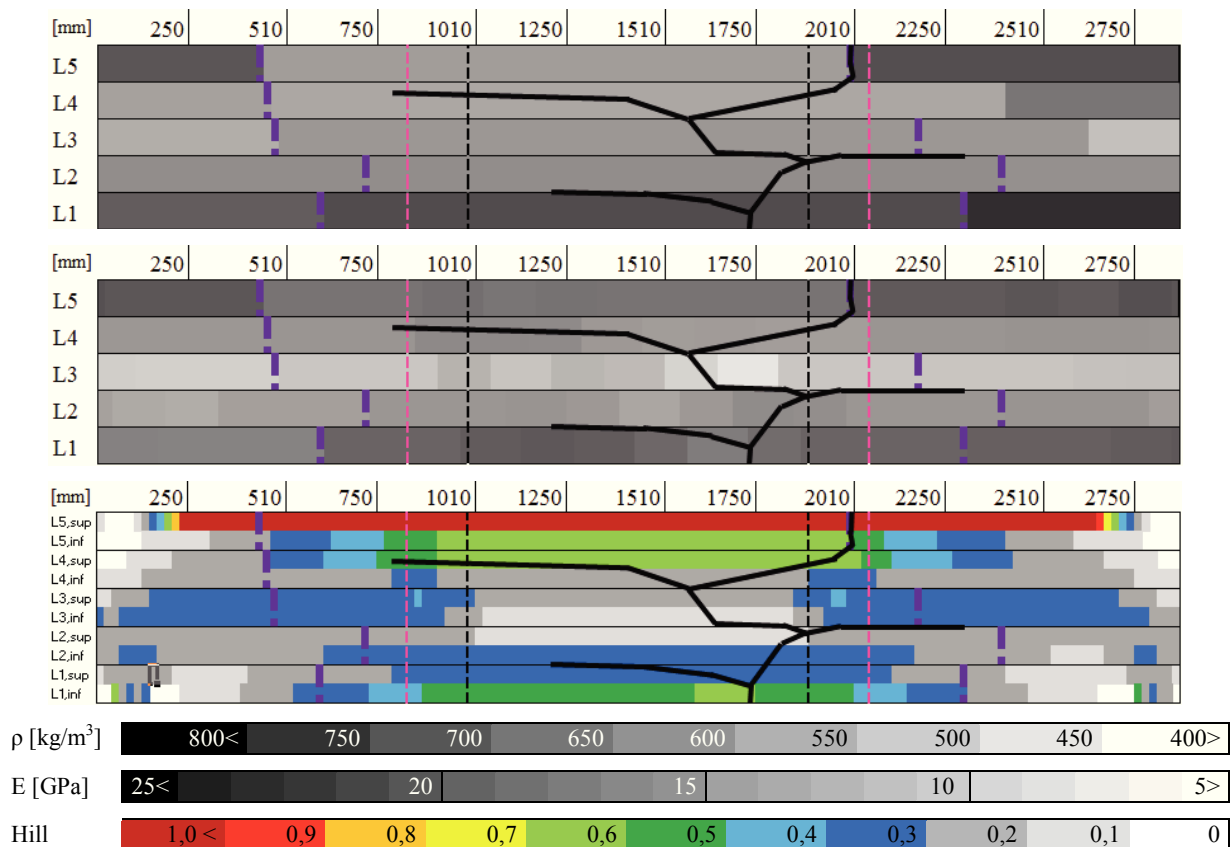


Figura 22: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VCP3b

4.1.1.9 VCP3c

A viga VCP3c (Figura 23) apresenta uma linha de rotura que passa apenas numa LEM. Assumindo como início provável de rotura a LEM da lamela L1, a linha de rotura dirigiu-se em direção às zonas com maior esforço de corte, nos terços exteriores e na lamela L3. Os defeitos detetados junto à linha de rotura são um nó numa secção onde o módulo de elasticidade não foi medido imediatamente à direita da LEM da lamela L3 (posição 1100 mm). A inspeção das fotos da rotura mostra que as duas fendas não são separadas, mas que estão unidas por fissuras de muito pequena espessura. Não foi possível perceber, se na linha de rotura na junta L3L4, a junta colada rompeu pela madeira ou pela cola.

A observação do mapa do critério de Hill mostra que as zonas mais esforçadas acompanham a rotura obtida em ensaio. As fibras superiores da viga atingem a tensão de rotura S11, mas não a ultrapassam. Mesmo na zona dos apoios, a tensão de rotura S11 não é ultrapassada por muito. Este é um caso particular de a tensão das fibras coincidir aproximadamente com a tensão de rotura estimada.

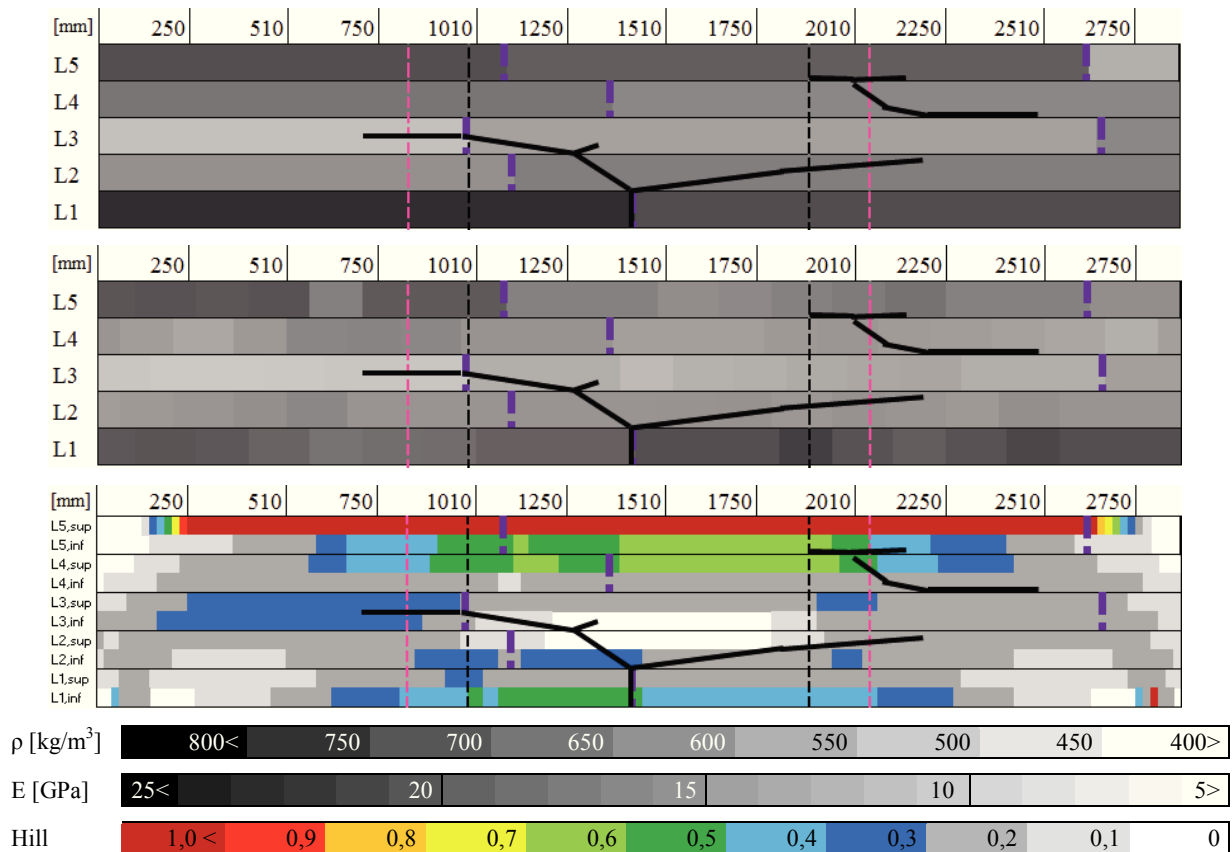


Figura 23: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VCP3c

4.1.1.10 Comparação entre vigas sem tratamento preservador (C)

A resistência das vigas aparenta ser governada pelo módulo de elasticidade das lamelas exteriores. As VCP3c e VCP1b têm a lamela L5 (lamela exterior comprimida) com rigidez semelhante (Quadro 6), mas a viga com maior módulo de elasticidade na lamela L1 (lamela exterior tracionada) é a VCP3c, que suportou uma carga superior. Ambas as vigas romperam pelo LEM da lamela L1, aproximadamente na mesma posição. Isto sugere que nas vigas de madeira não tratada, a rotura aparenta ser governada pela resistência da lamela exterior tracionada.

As vigas VCP3a e VCP3c tiveram aproximadamente a mesma tensão de rotura. No Quadro 6, pode-se constatar que a VCP3a tem maior rigidez na lamela L5 do que na L1, enquanto a VCP3c é o caso inverso. Pelo exposto no parágrafo anterior, seria expectável que a VCP3a tivesse rompido com uma tensão inferior à da VCP3c. No entanto, a posição da LEM nas vigas aparenta ter tido influência na resistência. A VCP3a tem uma LEM na lamela L1 fora do terço central, que aparenta dar-lhe um acréscimo de resistência por não estar na zona de momento fletor máximo, enquanto a VCP3c tem uma LEM na lamela L1 na zona mais desfavorável.

Quadro 6: Comparação entre módulos de elasticidade e força de rotura - vigas C

		VCP1a	VCP1b	VCP1c	VCP2a	VCP2b	VCP2c	VCP3a	VCP3b	VCP3c
Módulo de elasticidade (E_0) [GPa]	média	13,57	13,87	14,60	14,30	14,47	14,75	13,96	13,92	14,23
	L5	18,24	16,83	16,53	17,25	15,84	16,46	18,48	16,79	16,04
	L4	12,75	13,51	14,15	14,44	12,58	11,73	13,75	13,47	13,19
	L3	11,15	10,16	11,39	10,17	11,24	12,04	9,70	10,02	11,01
	L2	13,23	13,20	13,68	13,45	14,45	14,61	12,83	12,99	13,58
	L1	15,04	15,57	17,88	16,06	17,15	19,11	14,24	16,59	17,34
Força de rotura [kN]		35,0	22,8	48,4	30,1	39,3	52,2	29,8	33,4	29,8

4.1.2 Vigas de madeira com tratamento preservador A

4.1.2.1 VAP1a

A VAP1a é uma viga que suportou uma carga muito inferior a todas as outras quando foi ensaiada. Esta viga apresentou rotura prematura do LEM da lamela L1 durante os ensaios Gaspar (2006), devido a um defeito de fabrico, e rompeu para uma tensão de 21,8 MPa. Esta tensão é inferior à tensão crítica da expressão de Petersson (1994) que, calculada para a média do módulo de elasticidade da lamela L1 (14,6 GPa) e para a menor energia de fratura de modo II indicada por Wernersson (1994) (850 J/m²), é de 22,8 MPa. Isto confirma que a rotura da VAP1a foi progressiva.

Como tal, esta viga não é comparável às restantes, que romperam para tensões superiores a 26,3 MPa, que é o limite superior da tensão crítica para este conjunto de vigas, conforme calculada por Gaspar (2010).

A linha de rotura da VAP1a (Figura 24) deu-se exclusivamente no terço central. A linha de rotura está presente apenas nas 3 lamelas inferiores, cuja característica marcante é serem as de menor massa volúmica. São também as de menor rigidez, mas isto não é tão visível no mapa

de módulo de elasticidade. A linha de rotura passa pela LEM da lamela L1, que é o início de rotura e por um agrupamento de nós e bolsa de resina na lamela L3 na posição 1250 mm, sem redução do módulo de elasticidade, correspondendo ao término do ramo esquerdo da linha de rotura. Neste ramo, há um troço que passa na junta colada L3L4, na zona dos nós já mencionados, mas não é possível determinar se a rotura se deu pela madeira ou pela linha de colagem. Os topos das tábuas de ambos os lados da LEM da lamela L1 têm impregnação parcial de produto preservador.

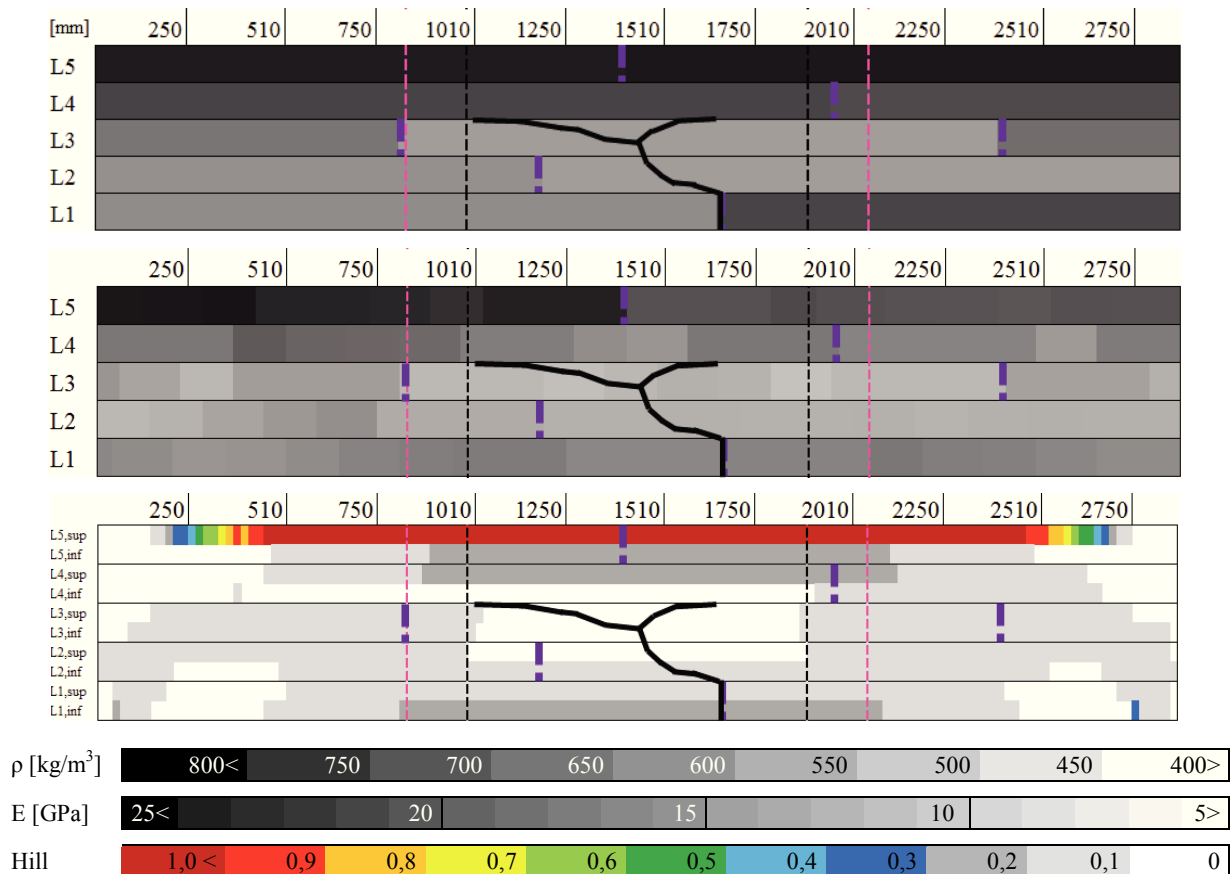


Figura 24: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VAP1a

O mapa do critério de Hill indica que houve rotura das fibras superiores, o que poderá ser um efeito muito localizado ao longo da altura da secção, pois as fibras da junta L4L5 estão pouco solicitadas. No entanto, este mapa é do modelo da VAP1a com a LEM da lamela L1 intacta, que não corresponde à configuração em que a viga atingiu a rotura. Elaborou-se um segundo modelo da VAP1a (Figura 25), onde foi atribuído o módulo de elasticidade de 1 kPa aos elementos finitos correspondentes à LEM da lamela L1, por forma a simular a ausência da LEM. A razão deste valor é não ser possível atribuir o valor de 0 ao módulo de elasticidade sem obter erros de cálculo.

O mapa do critério de Hill deste novo modelo permite ver que a rotura da LEM provoca um aumento substancial das tensões nas lamelas vizinhas, o que terá levado à progressão da linha de rotura.

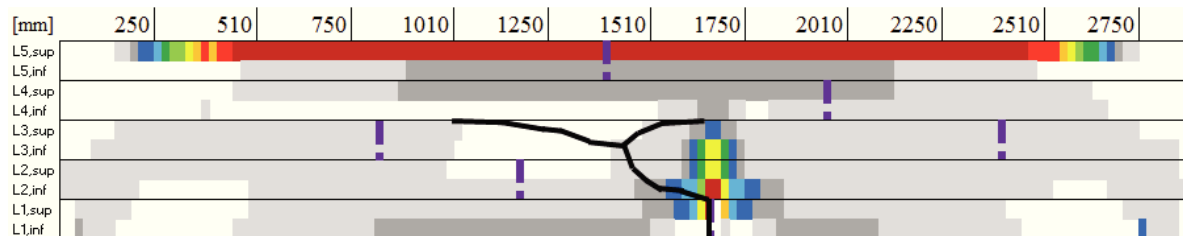


Figura 25: Mapa do critério de Hill da VAP1a sem LEM na L1

4.1.2.2 VAP1b

Das vigas com tratamento A, a VAP1b foi atingiu a maior tensão de rotura. Note-se a inexistência de LEM na zona do terço central das lamelas L1 e L2.

A linha de rotura da VAP1b (Figura 26) passa apenas pela LEM da lamela L1, por um nó muito pequeno na lamela L4 e por dois nós na lamela L3 situados na posição 2300 mm, o primeiro, e o segundo em 2600 mm. O primeiro nó da L3 é claramente visível no mapa de módulo de elasticidade e é uma zona muito fraca.

Segundo o mapa do critério de Hill, houve esmagamento por compressão das lamelas L4 e L5. No topo da viga, a tensão das fibras ultrapassa a tensão de rotura e, na junta colada L4L5, chega muito perto da rotura. A rotura aparenta ter-se iniciado por corte, do lado direito, no nó da lamela L3, propagando-se ao longo da junta colada L3L4 até à zona comprimida e para baixo, em direção à LEM da lamela L1. Pode-se ver na Figura 27 que as tensões S12 estão muito perto da rotura na zona do nó, tanto na parte de cima como na parte de baixo da lamela L3, pelo que a tensão de rotura por corte estimada poderá ter sido excedida a meia altura da viga, na zona amarela do mapa de critério de Hill. A tensão S11 na zona inferior da lamela L1 não atinge a rotura, mas é próxima da tensão rotura estimada.

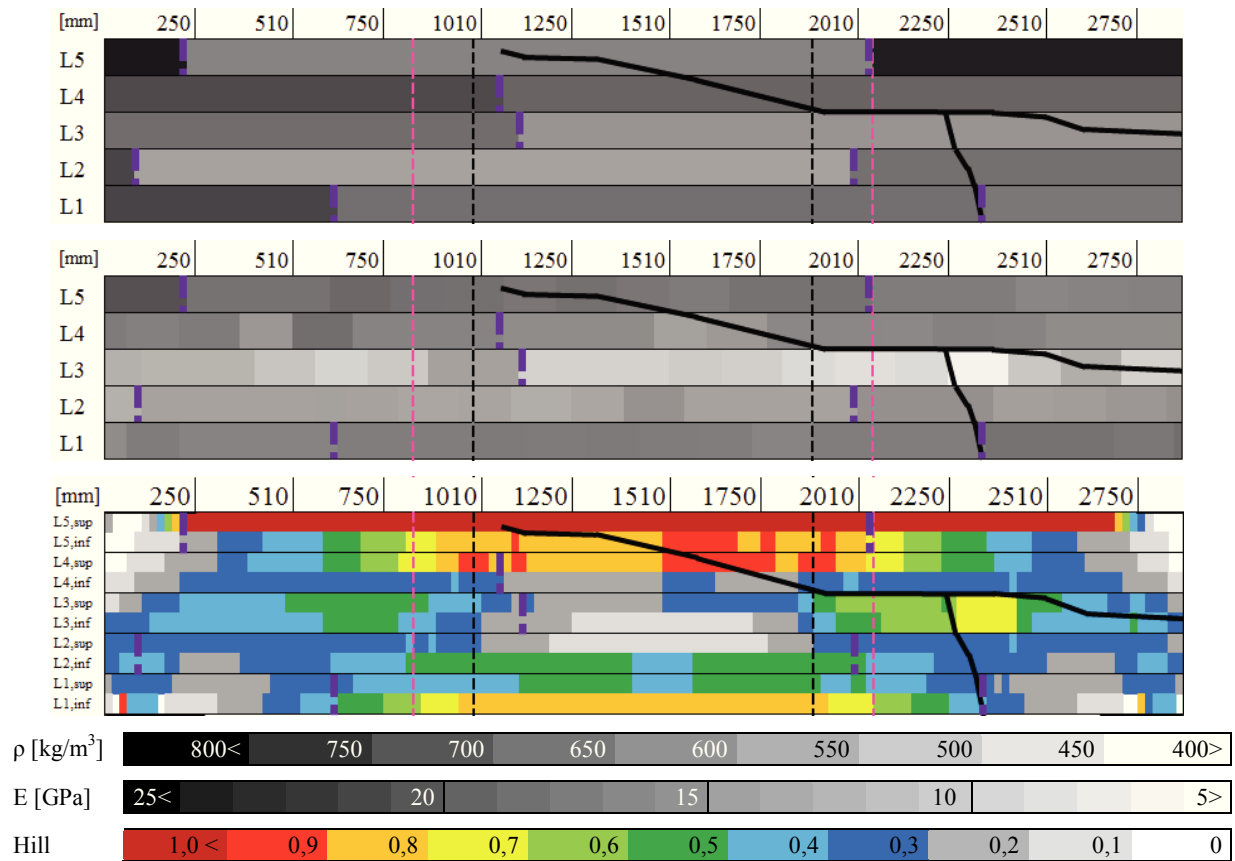
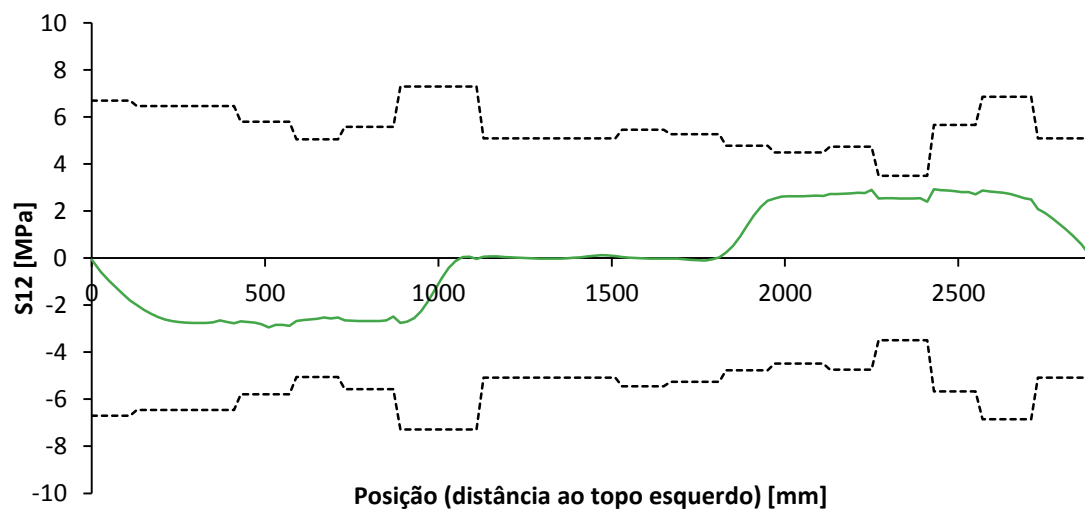


Figura 26: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VAP1b



Legenda:

- S12_L3SUP - tensão de corte S12 no topo de L3
- - - fv,L3 - tensão de rotura ao corte estimada de L3

Figura 27: Tensão tangencial S12 no topo da L3-VAP1b

4.1.2.3 VAP1c

A linha de rotura da VAP1c (Figura 28) passa por uma LEM na lamela L1, terminando próximo das duas LEM da lamela L3. A linha de rotura passa numa bolsa de resina na lamela L3, na posição 1000 mm, mas não existem mais defeitos dignos de nota junto à linha de rotura.

O início de rotura provável é a LEM da lamela L1, que corresponde a uma zona mais esforçada, como se pode ver no mapa do critério de Hill. Note-se que a linha de rotura passa pela junta L2L3 nas zonas da linha de ação das cargas aplicadas na viga, onde as tensões S11, S22 e S12 atingem os valores mais elevados. As fibras superiores da VAP1c atingem a tensão de rotura estimada segundo S11, mas por pouco mais. As restantes fibras ficam aquém da tensão de rotura estimada.

Os topos da LEM da lamela L1 estão impregnados com produto preservador, de um lado por completo e parcialmente do outro.

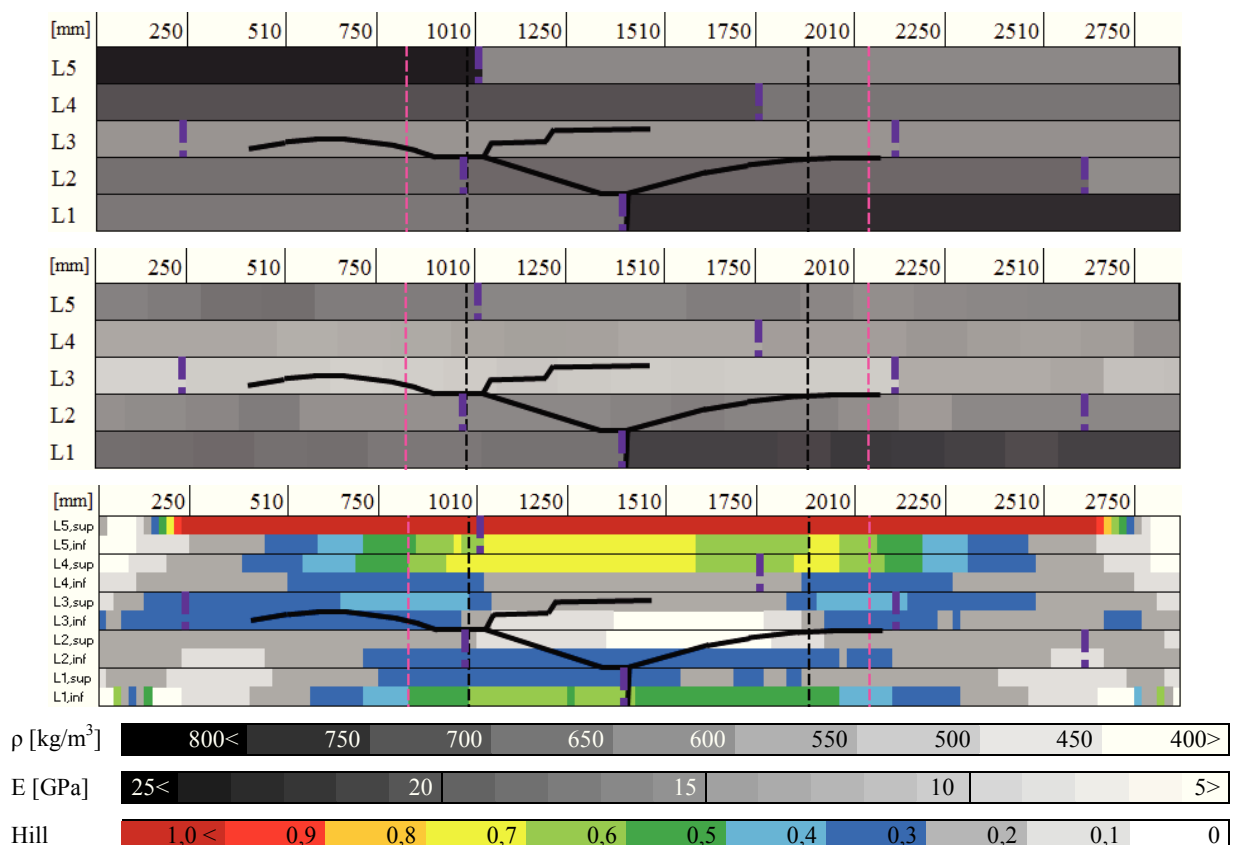


Figura 28: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VAP1c

4.1.2.4 VAP2a

A linha de rotura da viga VAP2a (Figura 29) passa por uma LEM na lamela L1 e uma LEM na lamela L2, muito próximas uma da outra.

A rotura da VAP2a deu-se por compressão da lamela L5, com início de fenda aparente no LEM localizado no terço central da lamela L1. A zona a amarelo corresponde à zona onde a menor rigidez da lamela L5, à direita da LEM, provoca uma redistribuição de tensões, aumentando a tensão S11 na lamela L4. A tensão de rotura estimada é excedida apenas segundo S11 nas fibras superiores da viga e apenas por pouco.

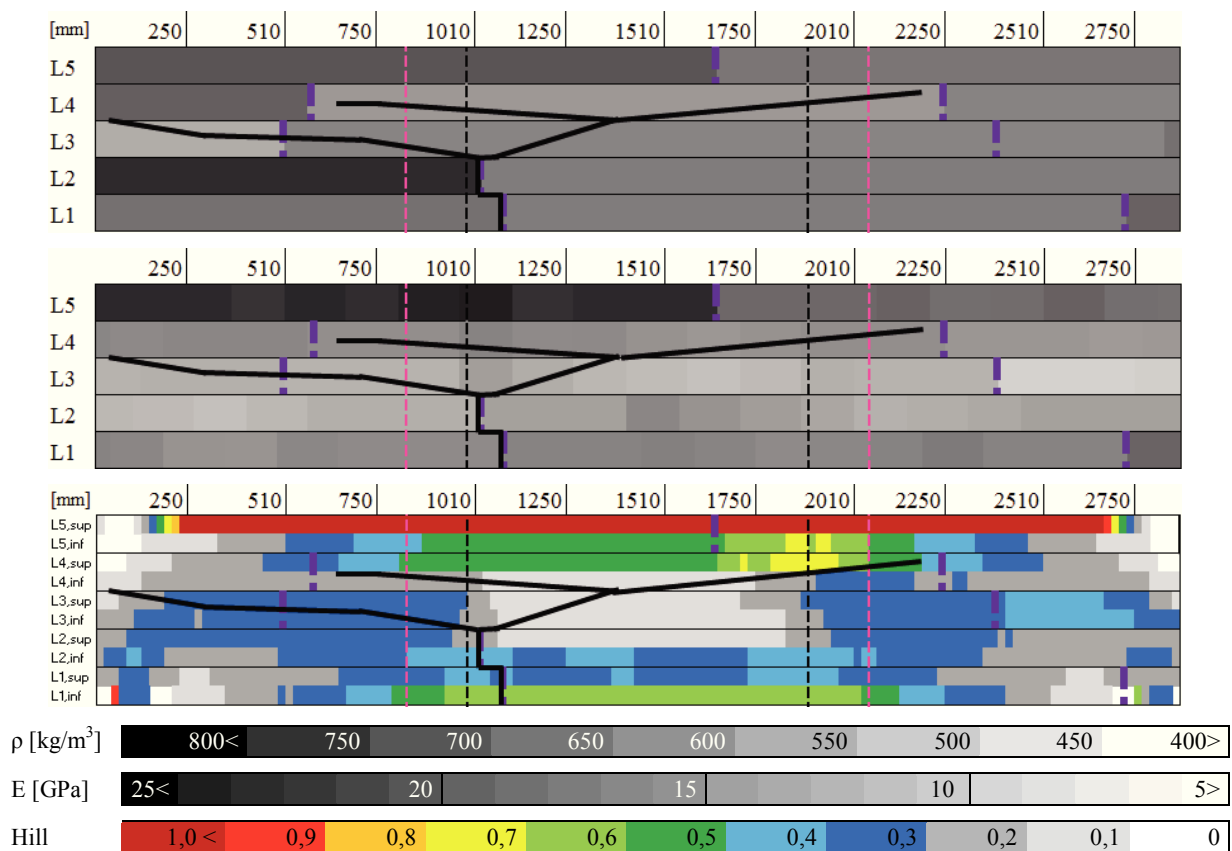


Figura 29: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VAP2a

4.1.2.5 VAP2b

A VAP2b teve o menor valor de força de rotura das vigas com tratamento preservador A, não contando com a VAP1a que poderá ser considerado um valor atípico (*outlier*).

A linha de rotura da VAP2b (Figura 30) passa por duas LEM, nas lamelas L1 e L2 e atravessa horizontalmente uma LEM na lamela L5. Na linha de rotura, há um nó pequeno na lamela L3

na posição 1750 mm, numa secção onde o módulo de elasticidade não foi medido. Não existem mais defeitos na vizinhança da linha de rotura.

A rotura da viga VAP2b deu-se por compressão das fibras superiores, pois a tensão S11 no topo da lamela L5 chega muito perto da tensão de rotura estimada. A combinação da tensão S11 com as tensões nas restantes direções levou à rotura nesta zona. O início provável da rotura é a LEM da lamela L1. Um dos topos da LEM da lamela L1 está completamente impregnada com tratamento preservador, o outro apenas parcialmente. Ambos os topos da LEM da lamela L2 estão completamente impregnadas com produto preservador.

Note-se a zona a verde-claro na lamela L4 por baixo da carga esquerda (posição 990 mm) no mapa do critério de Hill. Existe aqui, na junta L4L5, um pico de tensão de corte S12 e de tensão de compressão S22, devido à concentração de tensões da carga aplicada, o que poderá ter contribuído para que a linha de rotura passe por esta zona.

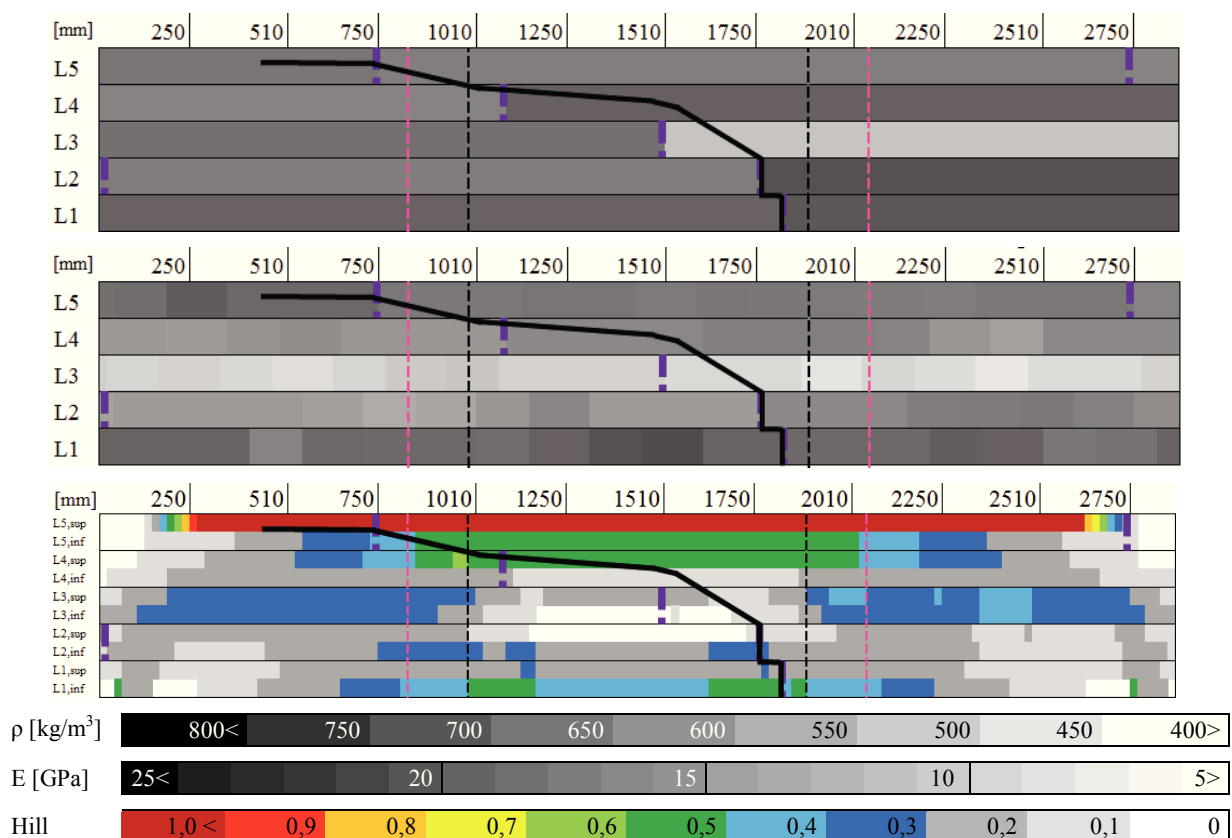


Figura 30: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VAP2b

4.1.2.6 VAP2c

A linha de rotura da viga VAP2c (Figura 31) passa por uma LEM na lamela L1 e interseta outra na lamela L5. Na linha de rotura, na lamela L3, há dois nós muito pequenos, isolados, aproximadamente na posição 1650 mm, que não afetam o módulo de elasticidade. Na lamela L2, há 2 nós grandes nas posições 1450 mm e 1550 mm, que são zonas fracas, como se pode ver no mapa de módulo de elasticidade. Não há mais defeitos na vizinhança da linha de rotura.

A VAP2c atingiu a rotura por compressão nas fibras superiores da lamela L5, tendo sido excedida a tensão de rotura S11 estimada nesta zona. Note-se que não existe nenhuma LEM na lamela L1 no terço central. O início da rotura aparenta ter sido a LEM da lamela L1 mais próxima do terço central. Um dos topos da LEM da lamela L1 tem penetração parcial de produto preservador, o outro tem penetração total. A linha de rotura secundária na lamela L4 aparenta ter sido causada pela combinação das tensões S11, próximas da tensão de rotura estimada, com os picos de tensão S22 e S12.

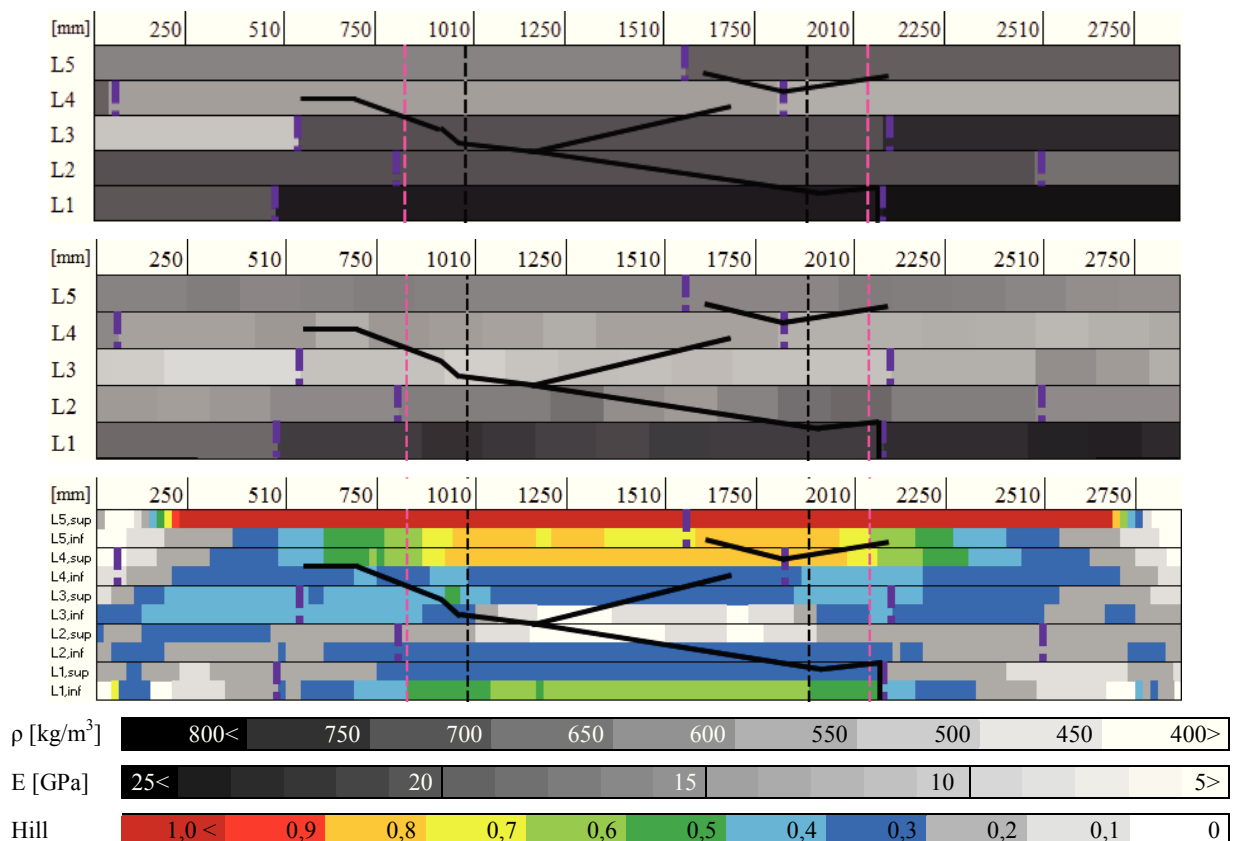


Figura 31: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VAP2c

4.1.2.7 VAP3a

A linha de rotura da VAP3a (Figura 32) passa pela LEM da lamela L1 e atravessa a LEM da lamela L4. Existem os seguintes defeitos na vizinhança da linha de rotura: na lamela L5, há um nó na posição 1600 mm, por cima da LEM da lamela L4 e observável no mapa de módulos de elasticidade; na lamela L4, a rotura passa por um nó grande na posição 1500 mm (aproximada), à esquerda da LEM e localizada numa secção onde o módulo de elasticidade não foi medido; na lamela L3, há um nó na posição 1600 mm; na lamela L2, há um nó muito próximo do topo esquerdo, sem influência na resistência; na lamela L1, não há defeitos.

A viga VAP3a foi a que, das vigas com tratamento A, atingiu o segundo maior valor de força de rotura e isto reflete-se no mapa do critério de Hill, sendo também uma das vigas que chegou mais perto da tensão de rotura S11 estimada na lamela L1. A zona a laranja na parte de cima da viga deve-se à redução de resistência do nó da lamela L5, pois a resistência neste local desce e há um acréscimo de tensões na lamela L4 devido à redução de rigidez da lamela L5.

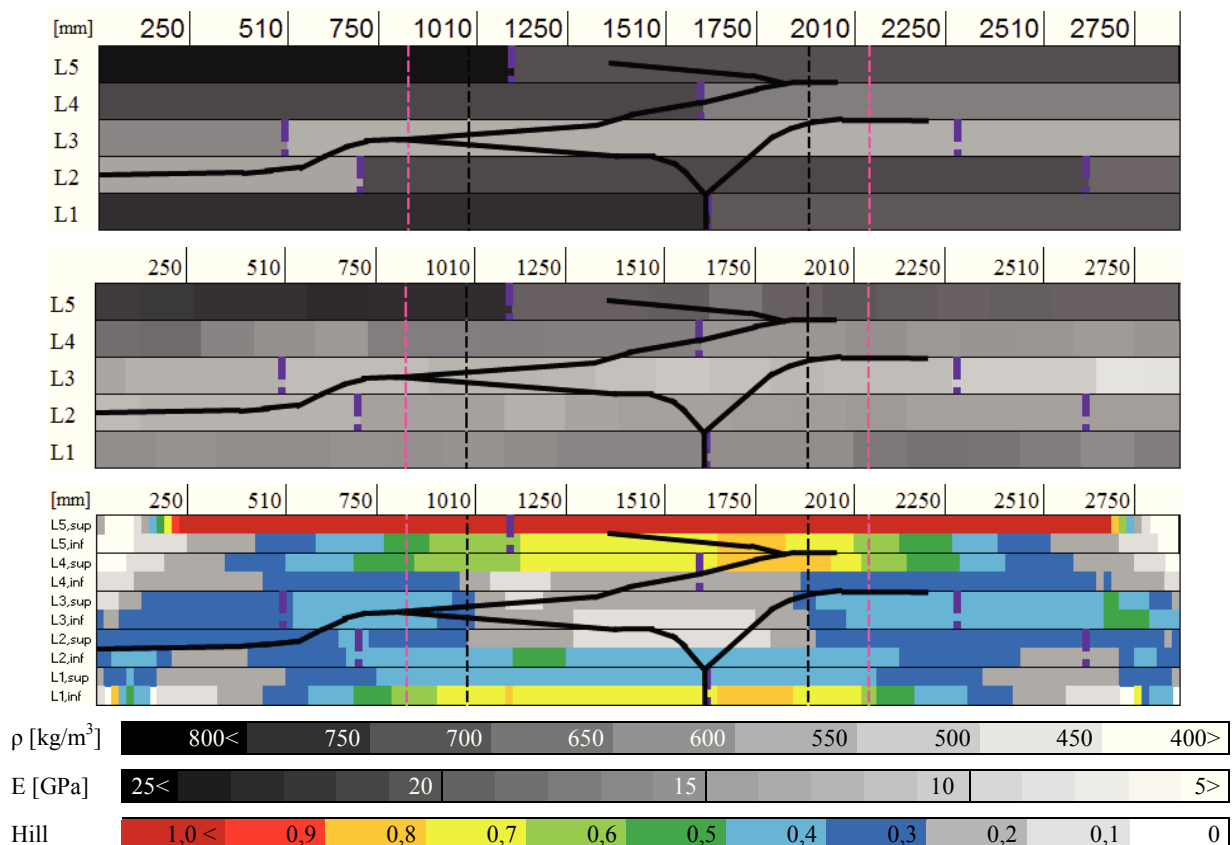


Figura 32: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VAP3a

A rotura deu-se por compressão do topo da lamela L5, onde se excedeu a tensão de rotura S11 estimada. O início de rotura provável é a LEM no terço central da lamela L1. Ambos os topos da LEM da lamela L1 têm penetração parcial de produto preservador.

4.1.2.8 VAP3b

A linha de rotura da VAP3b (Figura 33) passa pela LEM da L1 e bifurca por baixo da lamela da L5. Na vizinhança da linha de rotura há dois nós agrupados na lamela L4, na posição 1650 mm, visíveis como uma zona fraca no mapa de módulo de elasticidade. Na lamela L3, na posição 1800 mm, há um nó grande que não apresenta uma redução significativa de rigidez. As lamelas L1 e L2 não têm defeitos na linha de rotura. A rotura horizontal à direita da LEM da L1 deu-se pela madeira.

A viga VAP3b entrou em rotura por compressão nas fibras superiores. A tensão de rotura S11 é excedida nesta zona, mas apenas marginalmente. O início de rotura provável é a LEM da lamela L1.

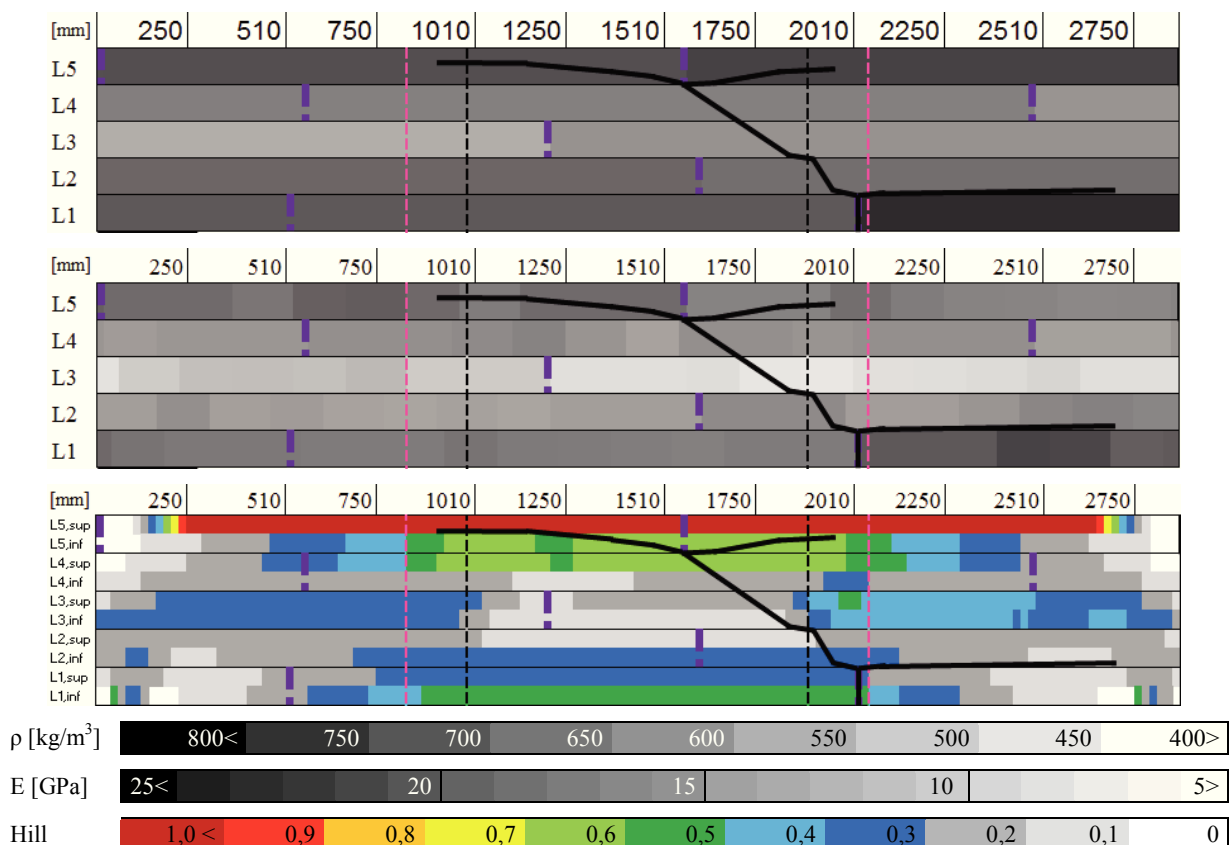


Figura 33: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VAP3b

4.1.2.9 VAP3c

A linha de rotura da VAP3c passa por uma LEM na lamela L1. A linha de rotura passa na vertical por um nó grande na lamela L5, com correspondente redução do módulo de elasticidade local, que fica diretamente acima da LEM da lamela L4. Tirando esse nó, não há quaisquer defeitos visíveis na vizinhança da linha de rotura, o que pode explicar o trajeto da rotura ser diferente das restantes vigas.

A VAP3c atingiu a rotura por compressão nas fibras superiores. A tensão de rotura S11 estimada é excedida nesta zona, mas os valores da tensão S11 são muito próximos da tensão de rotura estimada. O início provável de rotura é a LEM da lamela L1.

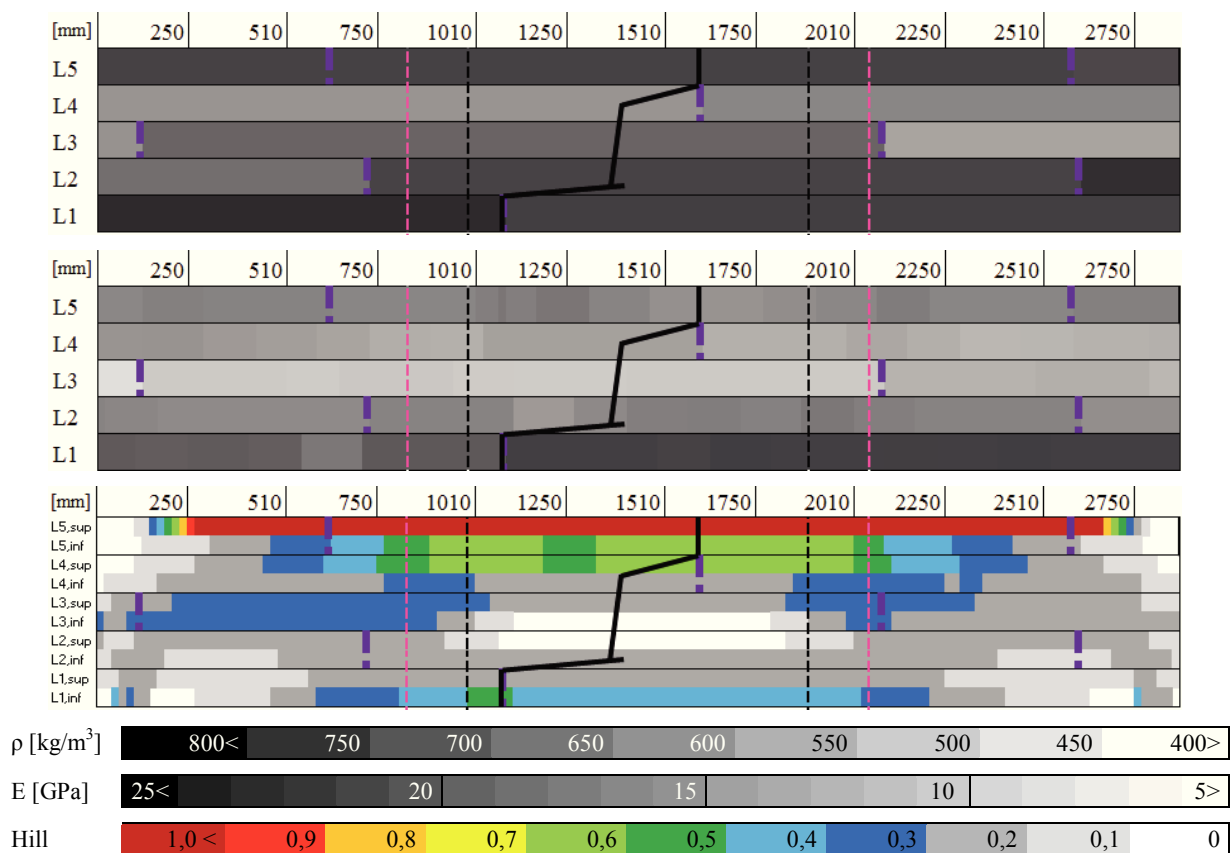


Figura 34: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VAP3c

4.1.2.10 Comparação entre vigas com tratamento preservador A

Tal como aconteceu com as vigas de madeira não tratada, também para a madeira do tipo A se observaram algumas diferenças na força de rotura que parecem ser devidas aos módulos de elasticidade. As vigas VAP3a e VAP3c são vigas muito semelhantes, ambas com início de

rotura por uma LEM da lamela L1 situada no terço central. O módulo de elasticidade médio destas vigas é semelhante (Quadro 7), mas há uma diferença significativa. A lamela exterior tracionada da VAP3a tem um módulo de elasticidade médio de cerca 14,5 GPa e a lamela exterior comprimida tem cerca de 18 GPa. Sucede o inverso na VAP3c e esta teve uma tensão de rotura muito inferior à VAP3a. Isto sugere que a rigidez da lamela exterior comprimida é mais determinante na resistência final do que a da lamela exterior tracionada. Pode-se observar o mesmo fenómeno comparando a VAP2a com a VAP2b.

A resistência superior da VAP2c em relação à VAP2a e VAP2b deve-se ao facto de ter a LEM a uma distância superior a 150 mm do terço central.

Quadro 7: Comparação entre módulos de elasticidade e força de rotura - vigas A

		VAP1a	VAP1b	VAP1c	VAP2a	VAP2b	VAP2c	VAP3a	VAP3b	VAP3c
Módulo de elasticidade (E_0) [GPa]	média	14,91	13,28	14,00	14,24	13,56	14,18	14,19	13,51	13,95
	L5	20,06	15,51	14,93	18,65	15,75	14,73	18,25	15,64	14,61
	L4	15,27	14,50	12,63	13,94	13,98	12,09	14,32	13,73	12,17
	L3	11,51	9,65	10,06	11,08	8,78	10,95	10,31	8,98	10,21
	L2	11,89	12,77	14,40	12,00	13,91	14,38	12,25	13,44	14,68
	L1	14,61	15,21	17,27	14,51	16,55	20,23	14,59	16,44	18,32
Força de rotura [kN]		14,5	45,8	33,8	36,3	29,1	39,4	42,0	32,2	30,2

4.1.3 Vigas de madeira com tratamento preservador B

4.1.3.1 VBP1a

A linha de rotura da VBP1a (Figura 35) passou pelas LEM das lamelas L1 e L3, terminando a propagação da fenda quando esta chega a lamelas de maior rigidez. Não se detetou qualquer defeito na vizinhança do caminho de rotura. O início provável da rotura é a LEM da lamela L1.

O mapa do critério de Hill da VBP1 indica que esta atingiu a rotura por compressão. As fibras superiores atingem a tensão de rotura estimada segundo S11, mas é algo muito localizado que não se observa ao longo da altura da secção.

O topo da tábua à esquerda da LEM está parcialmente impregnado com produto preservador, enquanto o topo da tábua direita está totalmente impregnado.

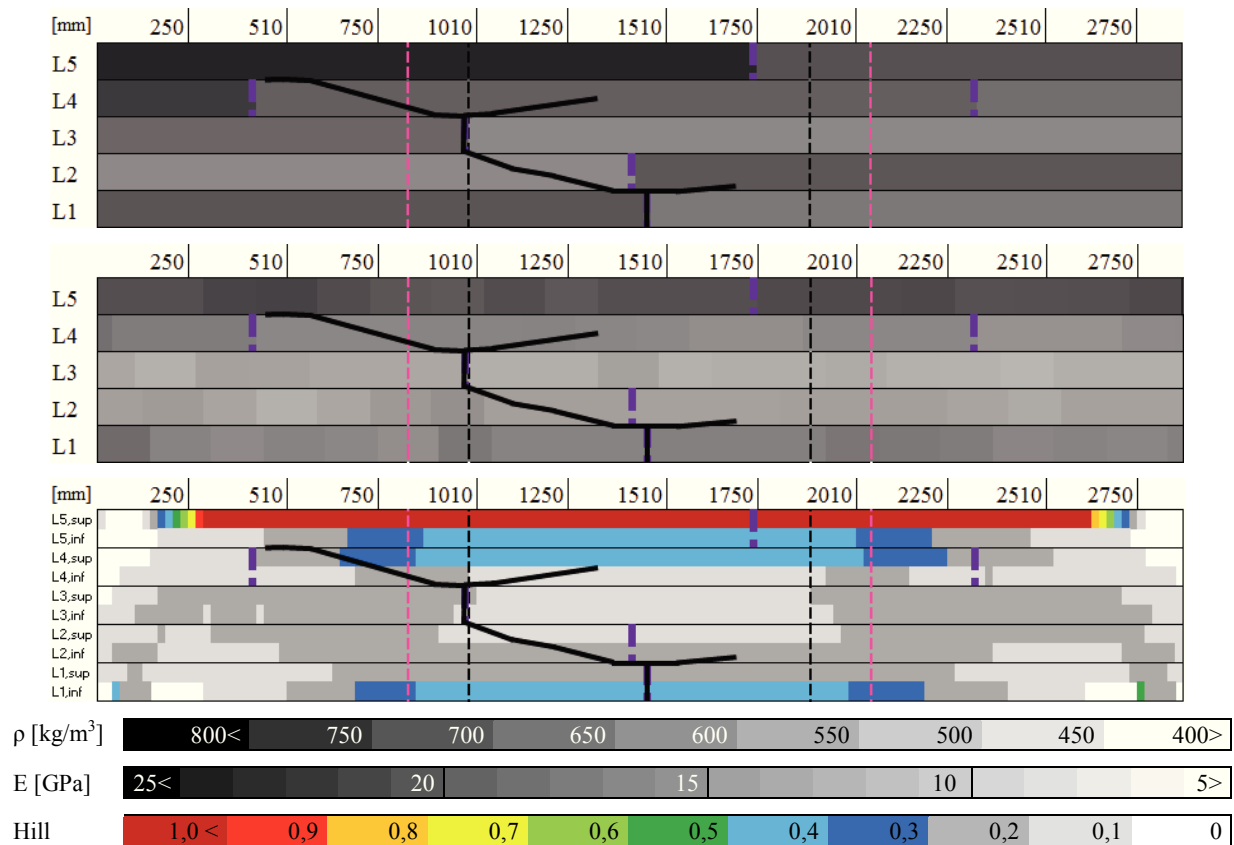


Figura 35: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VBP1a

4.1.3.2 VBP1b

A linha de rotura da VBP1b (Figura 36) passa por uma LEM na lamela L1 e intersesta outra na horizontal na lamela L4. Há três defeitos na linha de rotura, todos na lamela L4. Um dos defeitos é um agrupamento de nós na posição 1100 mm, que está localizado numa secção onde o módulo de elasticidade não foi medido e corresponde ao término da fenda à esquerda da LEM na lamela L4. Um segundo nó na posição 1700 mm, à direita da LEM da lamela L4, onde os dois ramos da linha de rotura se encontram, que corresponde a uma zona de menor rigidez. O terceiro está localizado na posição 1900 mm, no término do ramo direito da fenda, está um agrupamento de nós.

O mapa do critério de Hill da VBP1 indica que esta atingiu a rotura por compressão. As fibras superiores atingem a tensão de rotura estimada segundo S11, mas é algo muito localizado que não se observa ao longo da altura da secção. As fibras superiores excedem a tensão de rotura S11 estimada na zona de aplicação das cargas, mas por pouco.

A rotura parece ter-se iniciado na LEM da lamela L1 e propagado pelas zonas de menor rigidez da viga. Os topos das tábuas de ambos os lados da LEM estão totalmente impregnadas com tratamento preservador.

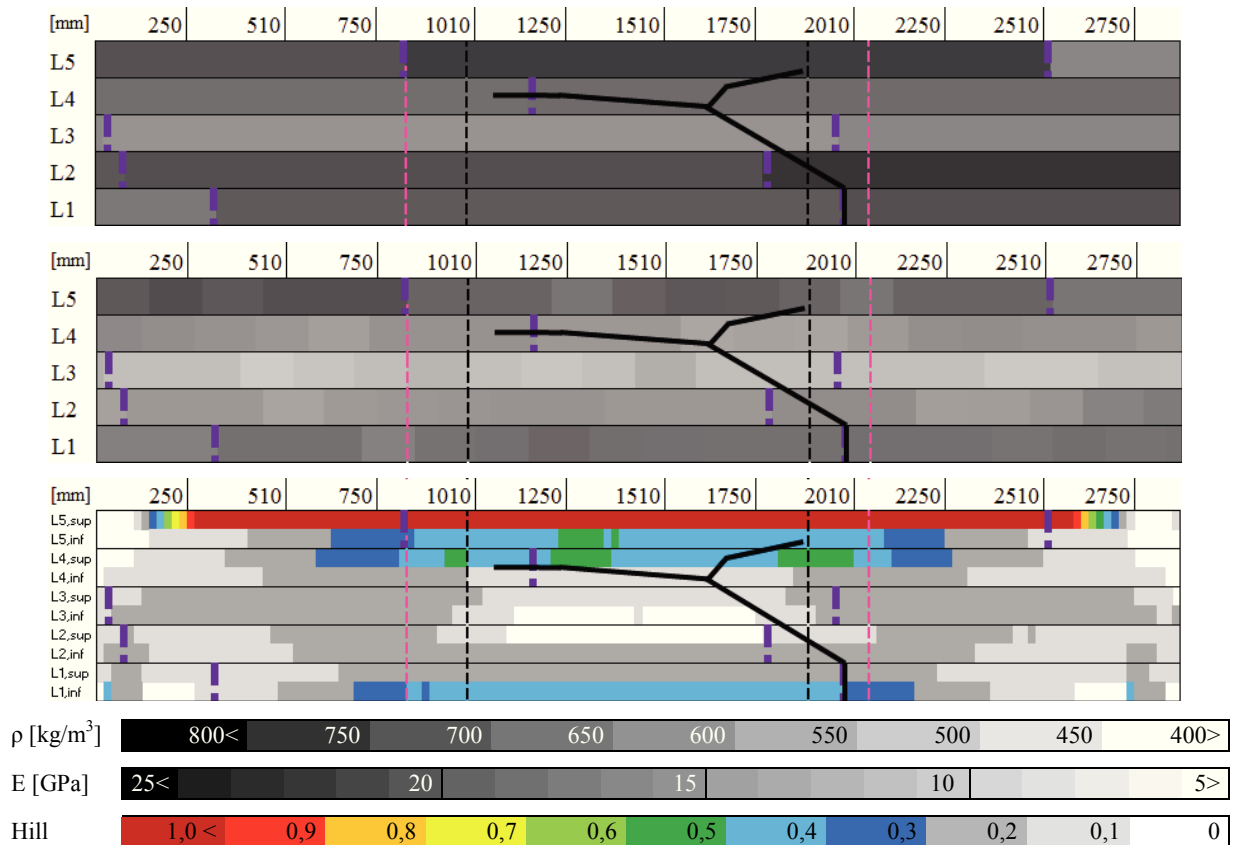


Figura 36: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VBP1b

4.1.3.3 VBP1c

A linha de rotura da VBP1c (Figura 37) passa uma LEM na lamela L1, por dois nós não agrupados na lamela L4 e um nó na lamela L2.

O mapa do critério de Hill indica que a viga atinge a rotura nas fibras superiores. As fibras superiores excedem a tensão de rotura S11 estimada apenas na zona de aplicação das cargas.

A rotura parece ter-se iniciado na LEM da lamela L1 e propagando-se pelas zonas de menor rigidez da viga. Os topos das tábuas de ambos os lados da LEM da lamela L1 estão completamente impregnadas com tratamento preservador.

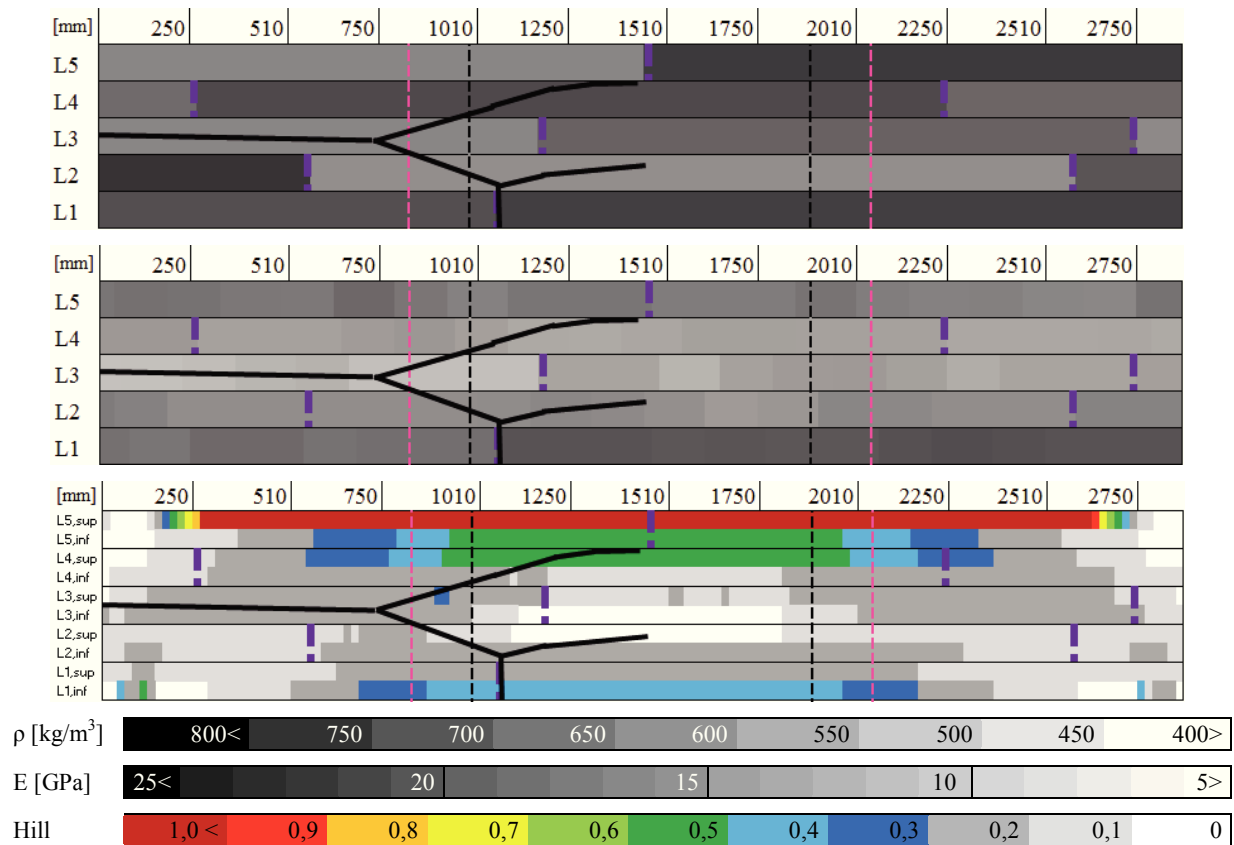


Figura 37: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VBP1c

4.1.3.4 VBP2a

A linha de rotura da VBP2a (Figura 38) passa por duas LEM, nas lamelas L1 e L3 e atravessa uma LEM na horizontal na L4. Existe um nó na lamela L4 na posição 1400 mm, que fica adjacente à LEM da lamela L3 que rompeu, mas não se vê a influência deste nó no modelo. Não existem mais defeitos junto à linha de rotura. O início provável da rotura é a LEM da L1.

No mapa do critério de Hill pode-se observar a zona mais esforçada da lamela L4, na posição 1000 mm, devido à presença do pico de tensão S22 resultante da proximidade da carga aplicada na viga. As várias tensões da viga ficam bastante longe das tensões de rotura estimadas.

As LEM da lamela L1 e L3 têm tratamento preservador em ambos os topos.

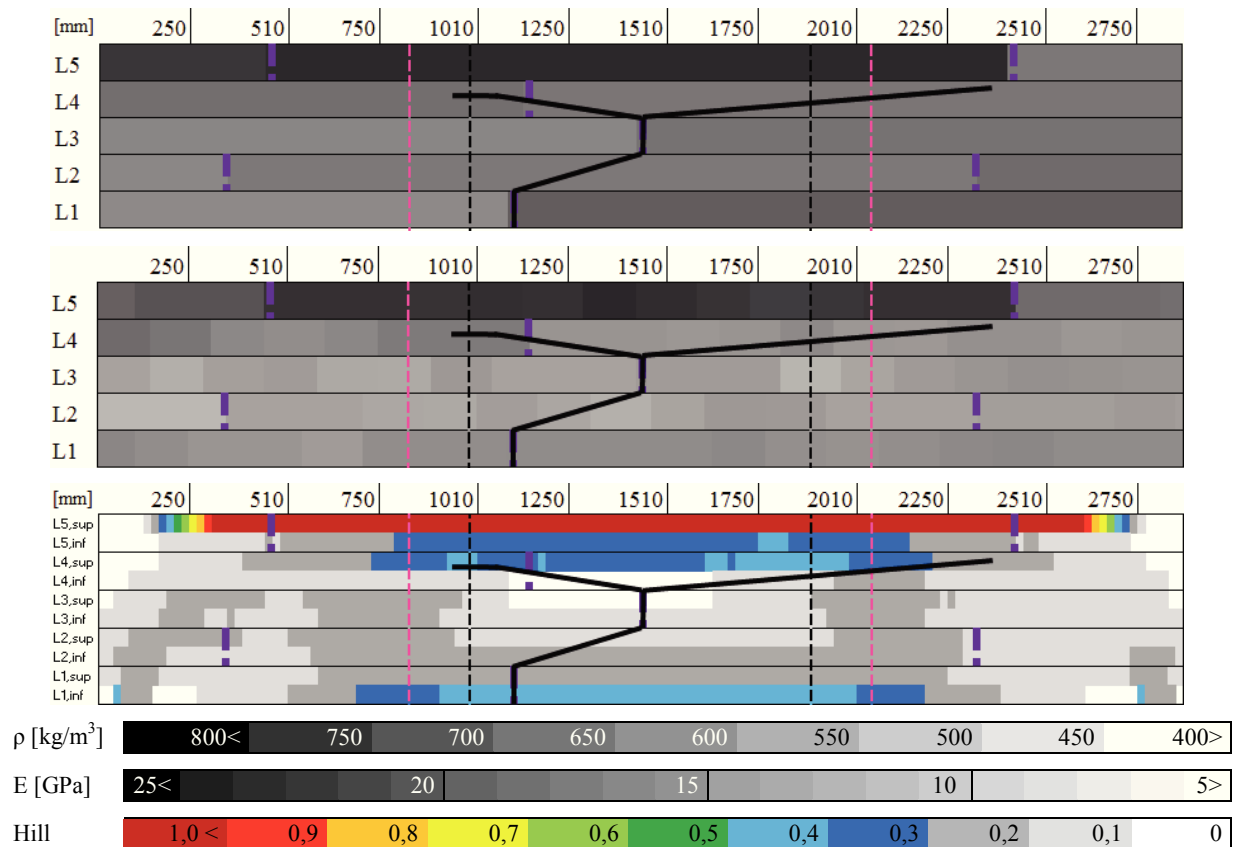


Figura 38: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VBP2a

4.1.3.5 VBP2b

A linha de rotura da VBP2b (Figura 39) passa por uma LEM na lamela L2 e atravessa outra na horizontal na lamela L4. O ponto de início provável de rotura é um nó na lamela L1, na posição 1200 mm e muito próxima da LEM da L2. Este nó é visível no mapa do critério de Hill, sendo a zona a verde. Não existem mais defeitos junto à linha de rotura. A fenda aparenta ter-se propagado pelas zonas de menor rigidez da viga, parando a sua propagação quando atinge uma zona mais rígida.

O modelo da viga atingiu a tensão de rotura S11 estimada na zona de aplicação das cargas, mas a viga fica aquém da tensão de rotura estimada nas restantes zonas.

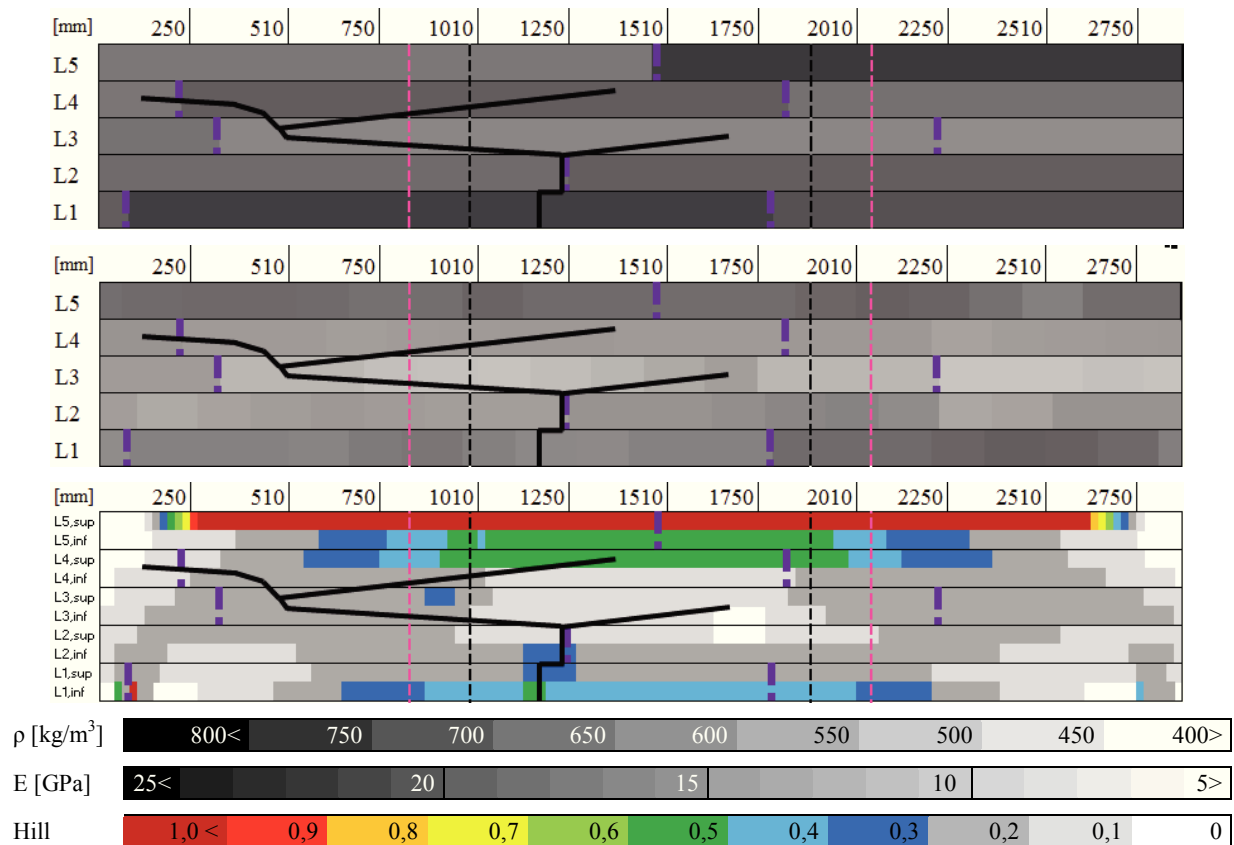


Figura 39: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VBP2b

4.1.3.6 VBP2c

A linha de rotura da VBP2c (Figura 40) passa por uma LEM na lamela L1. Existe um nó grande na lamela L4 que coincide com a zona onde termina a linha de rotura do lado direito da viga. A propagação da fenda deu-se principalmente na lamela L3, a menos rígida.

A zona onde começa a linha de rotura do lado esquerdo coincide com a uma zona onde o esforço de corte é maior (a azul no mapa do critério de Hill) e passou pela junta colada L3L4 à direita da LEM. Este é dos poucos casos em que se observou rotura pela junta colada longitudinal, onde tanto a lamela L4 com a lamela L3 estão completamente impregnadas com produto preservador, o que sugere que a presença de produto preservador interferiu com a colagem numa zona com esforço de corte máximo.

O início de rotura provável de rotura é a LEM da lamela L1. Os topos da LEM têm impregnação parcial de produto preservador.

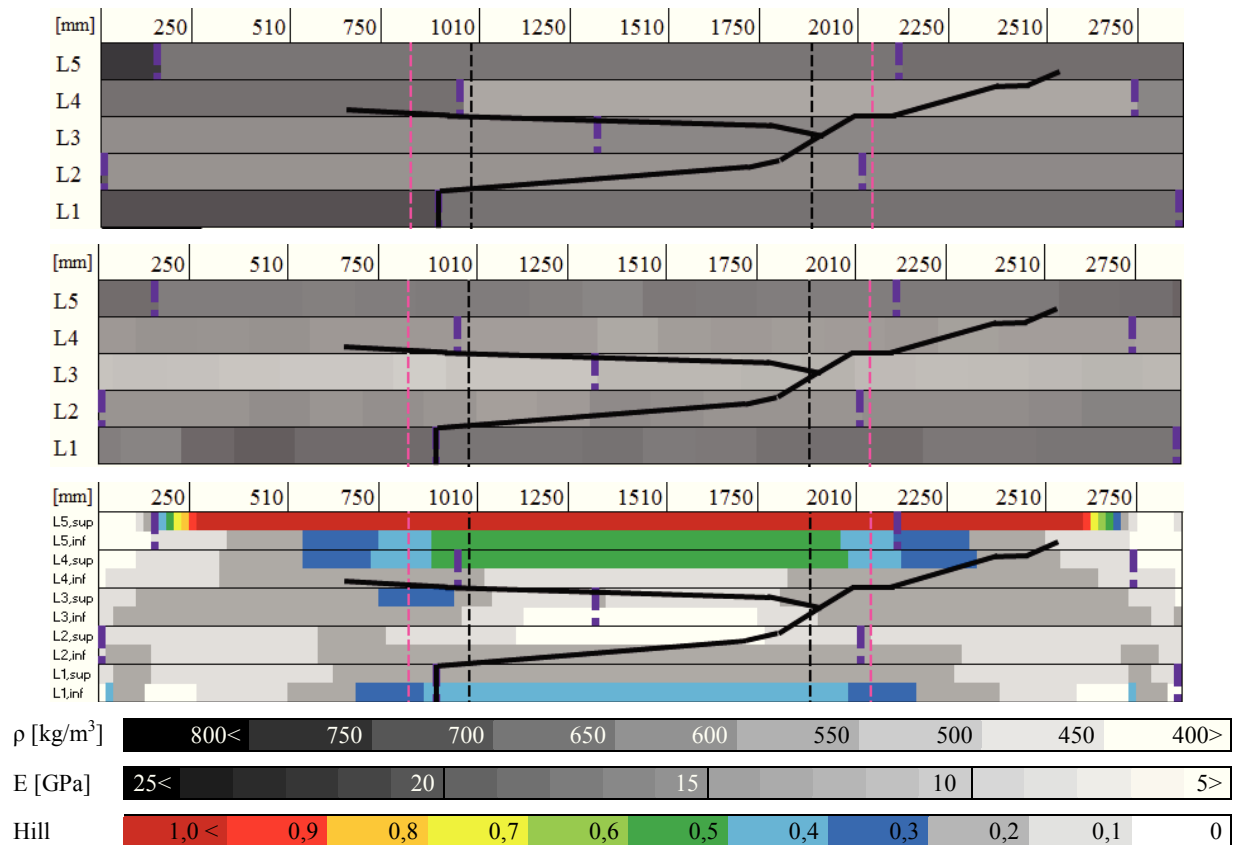


Figura 40: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VBP2c

4.1.3.7 VBP3a

A VBP3a (Figura 41) apresenta uma linha de rotura que passa por três LEM, nas lamelas L1, L4 e L5. A viga não tem defeitos junto à linha de rotura que a possam ter influenciado. Nas zonas onde a linha de rotura é horizontal, a rotura deu-se pela madeira e não pela linha de colagem.

A viga VBP3a suportou uma carga muito superior que restantes vigas B nos ensaios e isso é refletido do mapa de critério de Hill do modelo. As zonas a amarelo do lado esquerdo deste mapa devem-se à presença de picos de tensão S22. A viga atinge a rotura nas fibras superiores por compressão, sendo que a tensão de rotura S11 é excedida nesta zona.

O ponto de início provável de rotura é a LEM da lamela L1, por a linha de rotura se ter propagado no lado direito da viga. Neste caso, um dos topos da LEM quase não tem tratamento preservador, mas o outro está completamente impregnado.

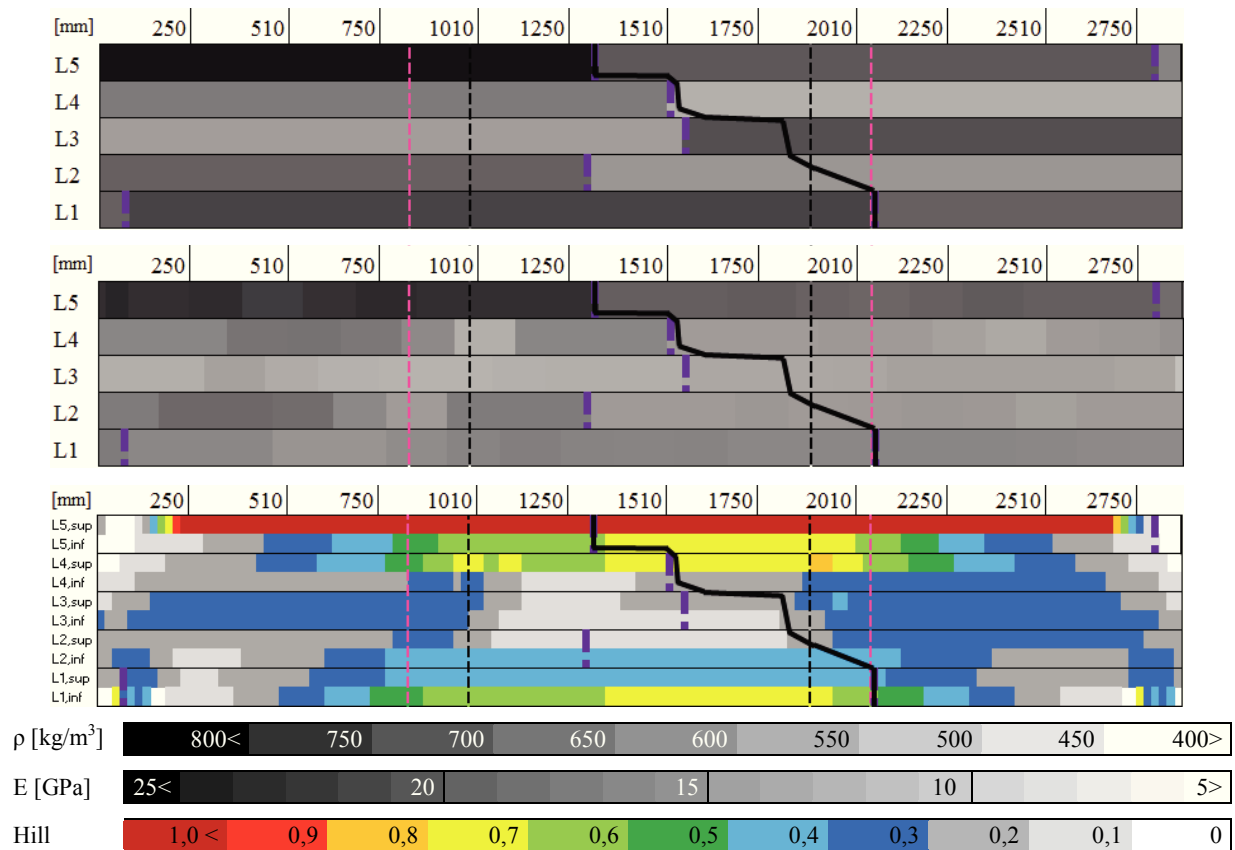


Figura 41: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VBP3a

4.1.3.8 VBP3b

A linha de rotura da VBP3b (Figura 42) passa por um LEM na lamela L1 e por vários defeitos: o início da linha de rotura do lado esquerdo coincide com uma bolsa de resina na lamela L4, confluindo com a fenda do lado direito num nó grande na posição 1230 mm na lamela L3, correspondente a uma redução de 2 GPa em relação à rigidez média da tábu a que pertence (zona mais clara no mapa de módulo de elasticidade). Há troços da rotura ao longo da junta colada L3L4, mas a rotura deu-se pela madeira e não pela junta.

A tensão de rotura estimada só foi ultrapassada segundo S11, na zona onde as cargas são aplicadas na lamela L5. O início provável da rotura é a LEM na lamela L1.

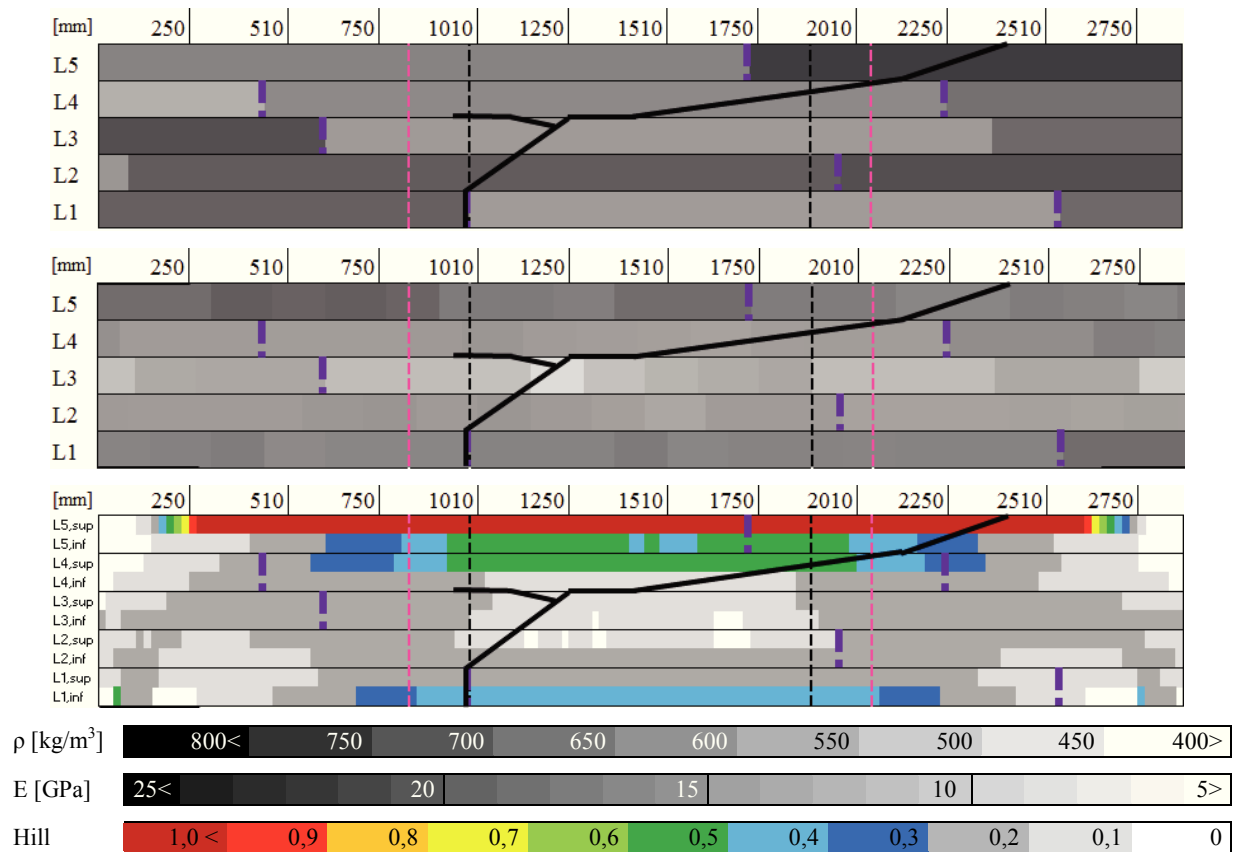


Figura 42: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VBP3b

4.1.3.9 VBP3c

A viga VBP3c (Figura 43) não apresentou defeitos perto da linha de rotura que possam ter influenciado a configuração desta. A única zona fraca por onde a linha de rotura passa é a LEM na lamela L1, que é o início provável da rotura. Nessa LEM, a tábua da esquerda está totalmente impregnada com tratamento preservador, a da direita está apenas impregnada parcialmente. No modelo, nenhuma das tensões chegou à rotura.

Verifica-se que a rotura da viga ensaiada se desenvolve principalmente nas zonas da viga de menor rigidez e nas zonas de maiores tensões de corte, facto que é também visível no mapa do critério de Hill. Existem alguns troços de rotura horizontais na zona de junta colada, mas verificou-se que a rotura se deu pela madeira e não pela junta de colagem.

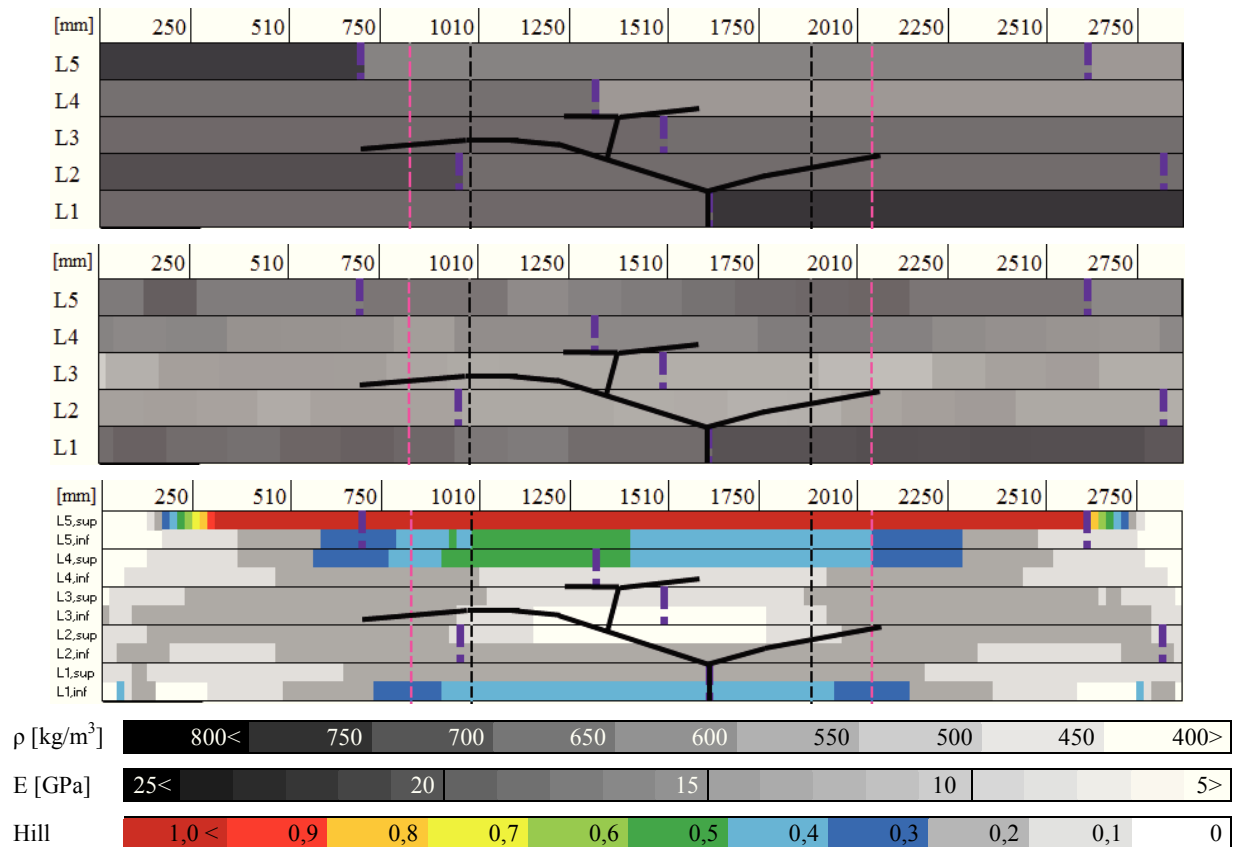


Figura 43: Mapas da massa volúmica (em cima), módulo de elasticidade (E0) (ao meio) e critério de Hill (em baixo) da viga VBP3c

4.1.3.10 Comparação entre vigas com tratamento preservador B

Das vigas com tratamento B, as únicas que podem ser comparadas diretamente, por terem tido um tipo de rotura comum, são as VBP3b e VBP3c (Quadro 8). Nestas vigas, é possível estender o referido acerca do módulo de elasticidade para as vigas com tratamento A. As duas vigas têm rigidez semelhante na lamela exterior comprimida, pelo que a rigidez superior da lamela exterior à tração da VBP3c poderá ser a razão da resistência superior desta viga em relação à VBP3b.

Quadro 8: Comparação entre módulos de elasticidade e força de rotura - vigas B

		VBP1a	VBP1b	VBP1c	VBP2a	VBP2b	VBP2c	VBP3a	VBP3b	VBP3c
Módulo de elasticidade (E_0) [GPa]	média	14,49	13,82	14,32	14,47	14,00	13,57	14,61	13,42	14,19
	L5	18,19	16,99	15,40	19,59	16,22	15,41	19,06	15,63	15,77
	L4	14,56	13,39	12,50	14,12	13,05	13,13	13,71	13,44	14,16
	L3	11,94	10,41	11,68	12,78	10,93	10,55	11,96	10,69	11,97
	L2	12,65	13,54	14,25	12,60	13,24	13,90	14,12	12,87	12,21
	L1	14,94	15,91	17,07	13,96	15,56	15,76	14,39	13,58	16,95
Força de rotura [kN]		25,6	25,7	26,2	24,3	26,5	25,9	40,1	25,8	27,1

4.1.4 Considerações finais relativas aos resultados dos modelos

O módulo de elasticidade médio das vigas é bastante semelhante, mas que a tensão de rotura varia muito.

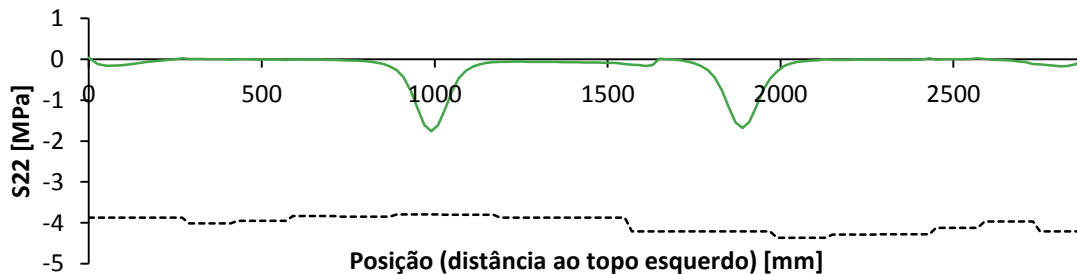
Todos os modelos atingiram a rotura nas fibras superiores da viga, ou seja, na lamela exterior comprimida. Isto sugere que resistência à compressão da lamela exterior comprimida condiciona a resistência da viga.

Verificou-se que, em grande parte dos casos, os módulos de elasticidade, a presença de nós ou bolsas de resina e a localização das ligações de entalhes múltiplos permitem explicar a configuração final da linha de rotura.

Verificou-se também que o número de casos em que a linha de rotura coincidiu com a existência de nós ou bolsas de resina é inferior nas vigas de madeira tratada, facto que indicia um comportamento diferente das vigas com tratamento preservador.

Os modelos são puramente elásticos, mas a madeira tem comportamento elasto-plástico à compressão. A rotura das fibras à compressão implica que estas plastificaram antes de chegar à rotura e que a linha neutra da secção se deslocou em direção às fibras tracionadas, aumentando a tensão de tração nas fibras inferiores para além dos valores que os modelos apresentam. Isto é aplicável para os modelos que estão sujeitos a cargas elevadas, mas não tanto nas vigas menos carregadas, como a maioria das vigas com tratamento B, onde a tensão S11 instalada nas lamelas se supõe não ultrapassar o limite proporcional, exceto nas fibras superiores. Neste último caso, pode-se afirmar que um modelo puramente elástico é adequado.

A rotura da grande maioria das vigas, em ensaio, deu-se na lamela exterior tracionada, suspeitando-se de rotura da ligação de entalhes múltiplos (LEM). As vigas com LEM no terço central conseguem mobilizar menos resistência que vigas que romperam por defeitos no terço central, tais como nós.



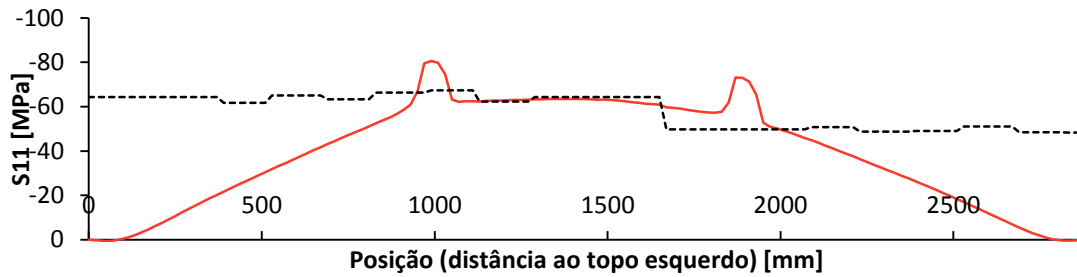
Legenda:

- S22_L4SUP - tensão S22 no topo de L4
- - - fc,90,L4 - tensão de rotura à compressão perpendicular ao fio de L4

Figura 44: Tensão S22 no topo da lamela L4 da VCP1a

Os picos de tensão S22 (Figura 44) ao longo da linha de aplicação as cargas são algo que é constante nos modelos de todas as vigas e se pode verificar nas lamelas L3, L4 e L5. Estes picos de tensão são causados por carregamento. Estes são dignos de nota porque estão numa zona sensível, ou seja, ficam muito perto da zona de momento fletor máximo e da zona de corte máximo. A combinação do S22 com S11 e/ou S12 nestas lamelas pode ser suficiente para levar à rotura. Na maioria dos modelos, a linha de rotura tem tendência a propagar-se em direção à linha de ação das cargas aplicadas na viga (tracejado a preto nos mapas dos modelos das vigas) devido aos picos de tensão.

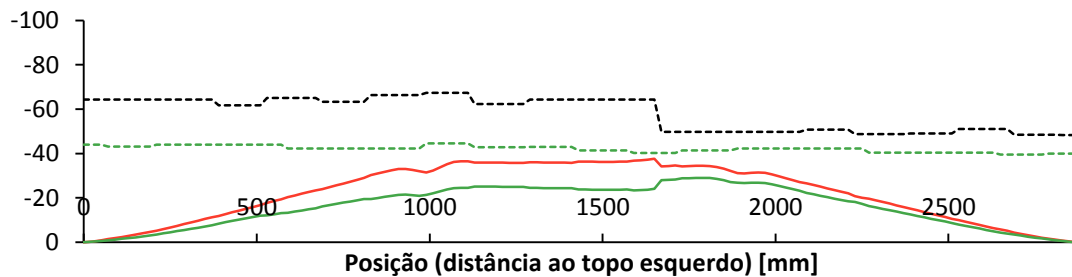
A análise das gráficos de tensão S11 permite verificar que não há redistribuição de tensões nas zonas fracas, confirmando que o efeito de reforço é reduzido, conforme defendido por Serrano e Larsen (1999). Também não há redistribuição significativa de tensões nas lamelas exteriores quando as duas tábuas adjacentes de uma lamela têm módulo de elasticidade muito diferentes (Figura 45). Nestas vigas em particular, a lamela interior é menos rígida que a exterior, logo menos resistente, e o acréscimo de tensão pode levar esta lamela à rotura (Figura 46).



Legenda:

- S11_L5SUP - tensão S11 no topo de L5
- fc,0,L5 - tensão de rotura à compressão paralela ao fio de L5

Figura 45: Tensão S11 na zona superior da L5 da VAP2a



Legenda:

- S11_L5SUP - tensão S11 no topo de L5
- fc,0,L5 - tensão de rotura à compressão paralela ao fio de L5
- S11_L4SUP - tensão S11 no topo de L4
- fc,0,L4 - tensão de rotura à compressão paralela ao fio de L4

Figura 46: Tensão S11 na junta L4L5 da VAP2a

4.2 Análise de componentes principais

Com o objetivo de avaliar a influência de cada uma das variáveis na resistência das vigas, realizou-se uma análise de componentes principais.

A análise de componentes principais (ACP ou PCA em inglês) baseia-se em adotar um conjunto de variáveis para produzir índices, chamados componentes principais, sem correlação entre si, que expressem a informação principal das variáveis. Os componentes principais são ordenados de forma que o primeiro componente principal explique a maior

variabilidade, o segundo explique a segunda maior variabilidade e assim por diante. O cálculo foi realizado no *software* Matlab, usando uma matriz de 26 vigas x 8 variáveis, sendo os *scores* a relação entre as vigas e os *loadings* a relação entre as variáveis. Foram usadas apenas 26 vigas, pois a VAP1a não foi considerada, por se suspeitar de a sua força de rotura ser um valor atípico.

As seguintes variáveis utilizadas foram as seguintes:

- Módulo de elasticidade paralelo ao fio (E_0) médio de cada lamela da viga (L1 a L5);
- Nível de tratamento:
 - C – sem tratamento
 - A – taxa de retenção de produto preservador aproximada de 7 kg/m^3
 - B – taxa de retenção de produto preservador aproximada de 16 kg/m^3
- Pressão de aperto da colagem da madeira (P1, P2 ou P3);
- Distância da LEM ou defeito por onde a viga rompeu ao terço central.

Na Figura 47 verifica-se, conforme seria expectável, que a variável que mais influencia a tensão de rotura é a distância das LEM ao terço central e que a pressão de aperto no fabrico das vigas tem uma influência reduzida sobre a resistência destas.

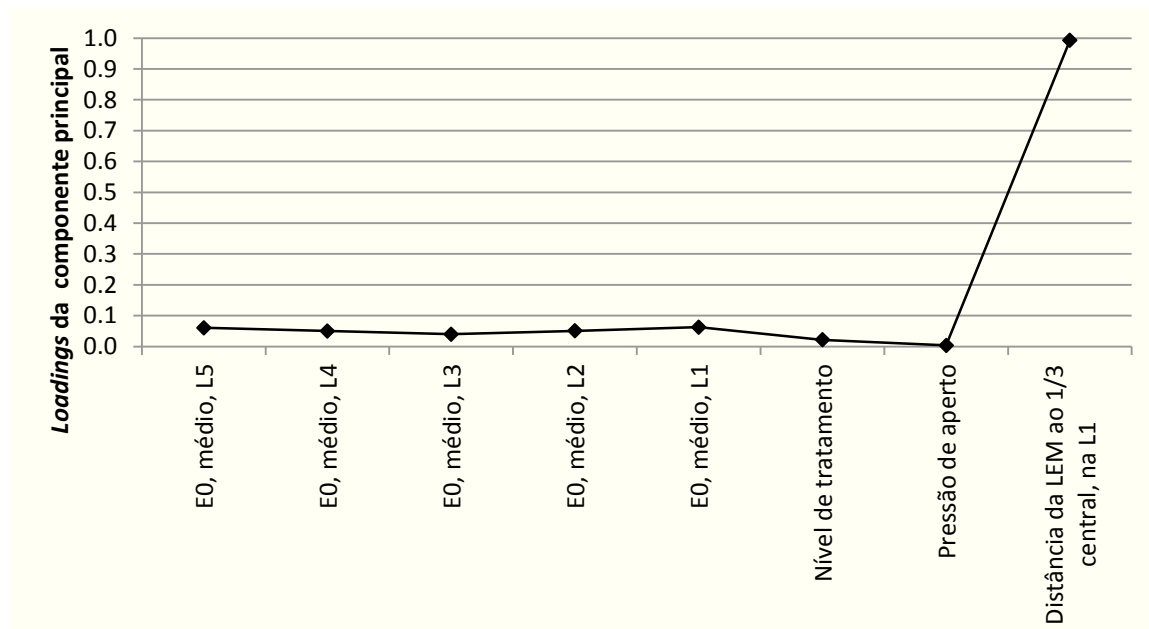


Figura 47: ACP de todas as variáveis identificadas

Por outro lado, verifica-se que o nível de tratamento tem uma influência na resistência das vigas bastante marcada, facto que não ficou muito claro após a análise dos modelos de elementos finitos, embora de influência inferior ao módulo de elasticidade.

Foi realizada uma ACP sem a variável referente à distância das ligações de entalhes múltiplos. Constata-se na Figura 48, que existe uma distinção clara segundo o nível de tratamento preservador. Não são claras as causas que poderão estar na origem da influência do tratamento preservador.

Yildiz *et al.* (2004) conduziu ensaios em provetes de borne de *Pinus sylvestris L.* para estudar o efeito de produtos preservadores nas propriedades mecânicas da madeira. Um dos produtos preservadores era o Tanalith E-3491 que, com taxas de retenção semelhantes às das vigas em estudo, não causou alterações significativas no módulo de elasticidade (E_0) da madeira nem na tensão de rotura à flexão (f_m). Isto sugere que a resistência inferior das vigas com tratamento não se deve à resistência da madeira das lamelas, mas a outro fator.

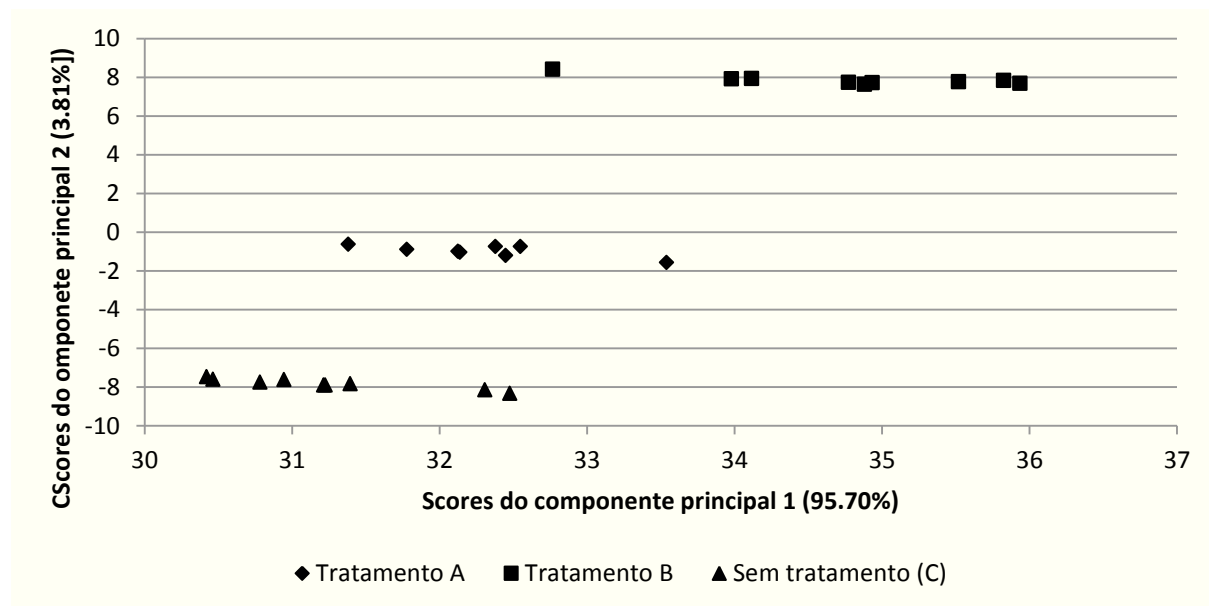


Figura 48: ACP – nível de tratamento preservador

Jauslin *et al.* (1995) realizaram uma análise de elementos finitos sobre a geometria de ligações de entalhes múltiplos e chegaram à conclusão que uma largura de raiz de dente maior do que zero causa picos de tensão junto à ponta do dente. A intensidade destes picos de tensão depende da rigidez da linha de colagem. A rigidez da linha de colagem é função da razão entre o módulo de elasticidade da cola e a espessura da linha de colagem. Lorenz e Frihart (2006) realizaram um estudo sobre o efeito dos produtos preservadores azóis de cobre (CA) e ACQ (*alkaline copper quat*) sobre a colagem de pitespaine (denominação que abrange um

conjunto de espécies - *Pinus palustris* Miller, *Pinus elliottii* Engelm, *Pinus echinata* Mill. e *Pinus taeda* - designadas por “*Southern Pine*”) com cola fenol-ressorcinol-formol (PRF) formulada para CCA (cobre-crômio-arsénio), um produto preservador em desuso, mas muito usado até há pouco tempo. A conclusão a que estes autores chegaram foi que a presença de CA ou ACQ na madeira acelera a cura de PRF e diminui a penetração da cola. O estudo de Miyazaki *et al.* (1999) com Larício do Japão (*Larix kaempferi* Lamb. Carr.) tratada com ACQ e CA e colada com PRF confirma a aceleração da cura da cola.

É possível que a penetração da cola seja menor na madeira com tratamento B, o que poderá levar a maiores picos de tensão na ligação, logo menor resistência à tração do que em madeira com menos tratamento ou madeira não tratada. Esta poderá ser a razão pela qual as vigas com tratamento B tiveram as tensões de rotura mais baixas. Para além disso nos ensaios realizados por Gaspar (2006, 2010) não se identificou alteração da resistência ao corte da junta colada ou da madeira devido ao tratamento preservador.

O módulo de elasticidade das lamelas, especialmente das lamelas exteriores, L5 e L1, tem maior influência que o tratamento. Quanto à influência do módulo de elasticidade de cada lamela na força de rotura obtida, há uma maior influência da rigidez da lamela exterior à compressão do que da lamela exterior à tração na resistência da viga (Figura 49).

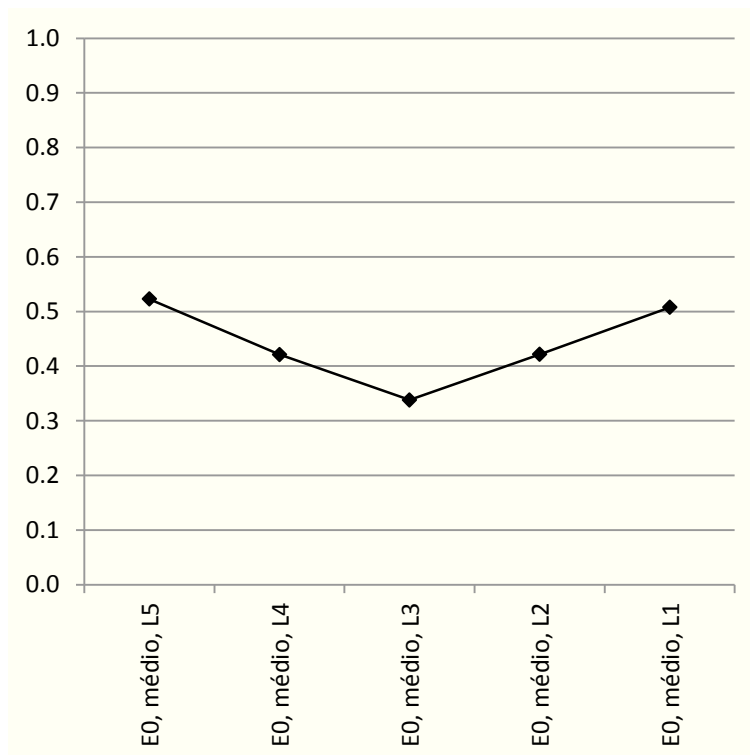


Figura 49: ACP – influência do módulo de elasticidade médio das lamelas na rotura

4.3 Modelos de previsão da força de rotura

Foi realizada uma análise usando regressão por mínimos quadrados parciais (PLSR), usando as oito variáveis identificadas no ponto 4.2. O *software* utilizado foi o Matlab.

A matriz de regressão, usando tanto a média dos módulos de elasticidade do terço central de cada lamela do modelo das vigas, assim como a média dos módulos de elasticidade medidos ao longo do comprimento das lamelas, dá resultados melhores para o coeficiente de determinação (R^2) quando se exclui a viga VAP1a (Quadro 9), o que confirma essa viga como valor atípico (*outlier*).

Quadro 9: Coeficiente de determinação das matrizes de regressão por PLSR

Número de vigas	Módulo de elasticidade	Coeficiente de determinação (R^2)
27	Terço central	0,479
27	Comprimento total	0,479
26	Terço central	0,550
26	Média da lamela	0,560

Observa-se também (Figura 50) que o coeficiente de determinação obtido é relativamente elevado (0,56) o que vem confirmar a influência destas variáveis na resistência.

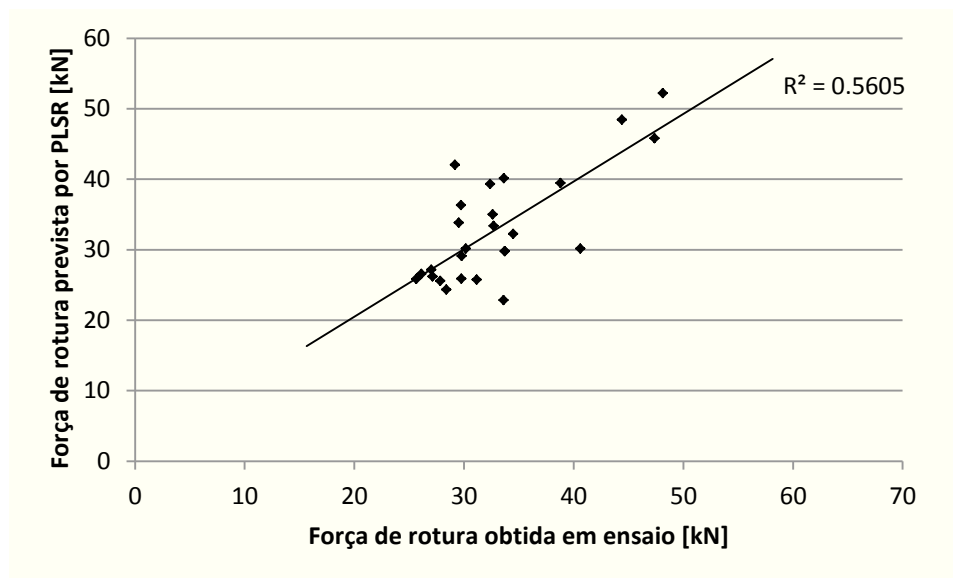


Figura 50: Regressão por PLSR

Com esta mesma matriz de regressão, foram realizadas 4 simulações de Monte Carlo:

- 1) Considerando que a viga é homogénea e usa madeira da classe visual E;
- 2) Considerando que a viga é homogénea e usa madeira da classe visual EE;
- 3) Uso de madeira de classe E e EE, distribuída aleatoriamente pela viga.

Usou-se a distribuição normal para obter um módulo de elasticidade aleatório para a classe E ou EE, usando os valores médios da NP 4305 (1995), de 12 GPa e 14 GPa, respectivamente. O coeficiente de variação usado é de 0,20, deduzido a partir dos valores característicos dos módulos de elasticidade da mesma norma.

Para cada simulação foi considerado:

- A existência de uma LEM na posição mais desfavorável, distada 0 mm do terço central;
- Pressão de aperto 0,60 MPa, por não haver diferenças significativas em relação aos outros valores.

Foram realizadas 100 simulações de Monte-Carlo por cada nível de tratamento. Como as vigas têm largura inferior a 150 mm e altura inferior a 600 mm, os resultados foram corrigidos, multiplicando por um $k_{size} = 0,838$, conforme estipulado na conformidade baseada em ensaios da NP EN 1194 (2002). Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 10.

Quadro 10: Resultados da simulação de Monte Carlo

Tratamento		E		EE		Aleatório	
Tipo	Retenção [kg/m ³]	$f_{m,médio}$	$f_{m,k}$	$f_{m,médio}$	$f_{m,k}$	$f_{m,médio}$	$f_{m,k}$
C	0	33,8	28,5	40,0	34,5	37,0	31,2
A	7	30,3	25,5	36,5	30,3	33,7	27,9
B	16	26,4	21,5	32,9	27,7	29,3	24,1

Analisando os valores característicos das tensões obtidos para cada nível de tratamento, averiguou-se quais as classes de resistência que podem ser obtidas para cada simulação.

Deve referir-se que a amostra em que se baseou o modelo obtido por PLSR é limitada, sendo de apenas 3 vigas por cada combinação de variáveis (nível de retenção de produto preservador e pressão de aperto). Verifica-se que os valores obtidos são relativamente diferentes para os diversos tipos de tratamento preservador, observando-se um aumento apreciável da resistência com a diminuição da retenção de produto preservador, o que deverá ser observado com alguma reserva. No entanto, os resultados mostram alguma consistência com resultados anteriores conforme se explica seguidamente.

Para estimar a resistência de vigas de constituídas inteiramente por madeira de pinheiro bravo da classe visual E ou EE, Gaspar (2006) usou a conformidade através de cálculo da NP EN 1194 (2002) introduzindo as propriedades tabeladas na NP 4305 (1995) da respetiva

classe visual e obteve uma tensão característica de rotura à flexão de 19,4 MPa para vigas de classe E e 31,2 MPa para vigas constituídas por madeira de classe EE. Enquanto no primeiro caso não é possível atribuir uma classe de resistência, no segundo poderá ser atribuída a classe GL28h. Comparando com os valores obtidos na simulação de Monte-Carlo verifica-se que para a madeira do tipo B os valores parecem confirmar as conclusões obtidas pela norma NP 4305 (1995), enquanto para madeira dos tipos A e C, a classe de resistência obtida seria igual ou superior. Este facto parece indicar que a utilização da norma NP EN 1194 (2002) poderá levar a um subaproveitamento da resistência do lamelado colado de pinheiro bravo, nomeadamente para a madeira não tratada.

Para a simulação onde se considerou o uso de madeira de classe E e EE, distribuída aleatoriamente pela viga as conclusões são semelhantes, i.e., verifica-se que para a madeira do tipo B os valores parecem confirmar as conclusões obtidas por Gaspar (2010), em que madeira de tipo A ou B atinge a classe GL24h, enquanto para madeira do tipo C a classe de resistência obtida seria superior, GL28h.

Esta página foi deixada intencionalmente em branco

5 *Conclusões e desenvolvimentos futuros*

A resistência de madeira lamelada colada de pinheiro bravo à flexão é fortemente condicionada pela presença de ligações de entalhes múltiplos (LEM) nas zonas de tração máxima. Embora exista uma influência clara do tratamento preservador na resistência, segundo Yildiz *et al.* (2004) e Gaspar (2010), a resistência da madeira não é afetada pela presença de produtos preservadores aquosos, como os azóis de cobre. Por outro lado, a penetração reduzida da cola na madeira tratada com produto preservador poderá ser um fator de redução da resistência das juntas coladas, nomeadamente das ligações de entalhes múltiplos.

A seguir à presença de LEM, a característica condicionante para a resistência última da viga é a resistência à compressão da lamela exterior à compressão. Em duas vigas semelhantes, com o mesmo módulo de elasticidade médio e o LEM da L1 sensivelmente na mesma posição, a que tiver a lamela exterior à compressão mais rígida será a que poderá ser sujeita a maior força de rotura.

Relativamente à pressão de aperto das lamelas no fabrico, verificou-se que esta não tem grande influência na resistência.

Na modelação numérica de vigas de madeira lamela colada, é necessário, por um lado, um critério de rotura para a madeira e, por outro, um para as ligações de entalhes múltiplos. O critério de rotura para a madeira deverá considerar a sua natureza ortotrópica e tendo em conta o comportamento elasto-plástico da madeira à compressão. O critério de rotura para a ligação de entalhes múltiplos poderá assumir que, quando a tensão instalada na lamela seja superior à tensão crítica de Petersson (1994), a rotura desta em tração leva à rotura imediata da viga. Poderá considerar-se que a energia de deformação é um bom preditor para a rotura das ligações de entalhes múltiplos (Morita *et al.* 2003).

A simulação de Monte-Carlo mostrou que o uso da classificação visual da NP 4305 (1995) nas lamelas de pinheiro bravo tratado resulta em vigas de lamelado colado com resistência compatível com as classes de resistência da NP EN 1194 (2002).

Futuramente, poderá alargar-se este estudo realizando ensaios com maior quantidade de material que permita, nomeadamente, o desenvolvimento de um modelo que tenha em conta a influência da retenção de produto preservador na resistência de vigas de madeira lamelada colada de pinheiro bravo.

Bibliografia

Aasheim, E., *et al.* (1993). Norwegian bending tests with glued laminated beams, comparative calculations with the “Karlsruhe calculation model” - Paper CIB-W18/26-12-1. Proceedings from CIB Meeting 26.

ASTM D 3737-04 (2004). Standard practice for establishing allowable properties for structural glued laminated timber (glulam). Philadelphia, American Society for Testing Materials.

Astrup, T., *et al.* (2007). "Size effect of glulam beams in tension perpendicular to grain." Wood Science and Technology **41**: 361–372.

Bodig, J. e Jayne, B. A. (1993). Mechanics of Wood and Wood Composites. Malabar, Florida, Krieger Publishing Company.

Cachim, P. B. (2007). Construções em madeira: a madeira como material de construção. Porto, Publindústria.

Colling, F. (1990). Tragfähigkeit von biegeträgern aus brettschichtholz in abhängigkeit von den festigkeitsrelevanten einflussgrößen Doctoral thesis, University of Karlsruhe.

Dassault Systèmes (2010). Getting Started with Abaqus. Providence, RI, USA., Dassault Systèmes.

Ehlbeck, J., *et al.* (1985). "Einfluss keilgezinkter Lamellen auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern." Holz als Roh- und Werkstoff **1-31**(43): 333-337, 369-373, 439-442.

EN 338 (2009). Structural Timber - Strength classes. Brussels, European Committee for Standardization.

EN 384 (2004). Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density. Brussels, European Committee for Standardization.

EN 385 (2001). Finger jointed structural - Performance requirements and minimum production requirements. Brussels, European Committee for Standardization.

EN 386 (2001). Glued laminated timber - Performance requirements and minimum production requirements. Brussels, European Committee for Standardization.

EN 408 (2003). Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties. Brussels, European Committee of Standardization.

EN 1995-1-1 (2004). Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. Brussels, European Committee for Standardization.

Falk, R. H. e Colling, F. (1995). "Laminating effects in glued-laminated timber beams." Journal of Structural Engineering **121**(12): 1857-1863.

Forest Products Laboratory (2010). Wood handbook. Madison, WI, United States Department of Agriculture.

Foschi, R. O. e Barrett, J. D. (1980). "Glued-laminated beam strength: a model." Journal of the Structural Division **106**: 1735-1754.

Gaspar, F. (2006). Estruturas de madeira lamelada colada – Viabilidade da utilização de madeira de pinho bravo tratada com produto preservador Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico.

Gaspar, F. (2010). Avaliação da integridade de estruturas de madeira lamelada colada em serviço Tese de doutoramento, Instituto Superior Técnico.

Gaspar, F., *et al.* (2010). "Production of glued laminated timber with copper azole treated maritime pine." European Journal of Wood and Wood Products **68**(2): 207-218.

Govindarajoo, R. (1989). Simulation modeling and analysis of straight horizontally laminated glulam timber beams. Ph. D. thesis, Purdue University.

Hernandez, R., *et al.* (1992). "Probabilistic modeling of glued-laminated timber beams." Wood and Fiber Science **24**(3): 294-306.

Hernandez, R. e Moody, R. C. (1996). Analysis of Glulam Timber Beams with Mechanically Graded (E-rated) Outer Laminations. International wood engineering conference, New Orleans, LA. Baton Rouge, LA, Louisiana State University.

Hill, R. (1950). The Mathematical Theory of Plasticity. Oxford, Clarendon Press.

Jauslin, C., *et al.* (1995). "Finite element analysis of Wood Joints." Journal of Materials in Civil Engineering 7(1): 50-58.

Larsen, H. J. (2004). COST E24 Probabilistic Model Code for Timber – Glued laminated timber (Draft 2004-09-28).

Lorenz, L. F. e Frihart, C. (2006). "Adhesive bonding of wood treated with ACQ and copper azole preservatives." Forest Products Journal 56(9).

Machado, J. S. e Cruz, H. (1992). Madeira de Pinheiro bravo. Determinação dos valores característicos da tensão resistente à flexão. Relatório 39/92-NM. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Machado, J. S., *et al.* (1998). Evaluation of lengthwise variation of mechanical properties by ultrasounds. 5th World Conference on Timber Engineering, Lausanne, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne.

Miyazaki, J., *et al.* (1999). "Effects of wood preservatives on adhesive properties of phenol-resorcinol-formaldehyde resin." Mokuzai Gakkaishi 45(1): 34-41.

Morita, T., *et al.* (2003). "Tensile-strength incidence mechanism of structural finger-jointed laminae." Forest Products Journal 53(6): 58-62.

NP 4305 (1995). Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas. Classificação visual Caparica, Instituto Português da Qualidade.

NP EN 335-1 (2011). Durabilidade da madeira e de produtos derivados da madeira, Definição das classes de risco, Parte 1: Generalidades Caparica, Instituto Português da Qualidade.

NP EN 1193 (2000). Estruturas de madeira. madeira para estruturas e madeira lamelada-colada. Determinação da resistência ao corte e das propriedades mecânicas perpendiculares ao fio. Caparica, Instituto Português da Qualidade.

NP EN 1194 (2002). Estruturas de madeira. Madeira lamelada-colada. Classes de resistência e determinação dos valores característicos. Caparica, Instituto Português da Qualidade.

Petersson, H. (1994). Fracture design criteria for wood in tension and shear. Pacific Timber Engineering Conference. Queensland, Australia.

prEN 14081-1 (2003). Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 1: General requirements. Brussels, European Committee for Standardization.

Serrano, E. e Larsen, H. J. (1999). "Numerical investigations of the laminating effect in laminated beams." Journal of Structural Engineering **125**(7): 740-745.

Wang, S.-Y. (2004). Evaluation of mechanical properties of douglas-fir lumber and its structural glulam by non-destructive techniques. 8th World Conference on Timber Engineering. Lahti. **2**: 179-184.

Wernersson, H. (1991). Fracture characterization of wood adhesive bonds. International Timber Engineering Conference, London.

Wernersson, H. (1994). Fracture characterization of wood adhesive joints. Lund, Sweden, Lund University.

Yang, T.-H., *et al.* (2007). "Effect of laminate configuration on the modulus of elasticity of glulam evaluated using a strain gauge method." Journal of Wood Science **53**(1): 31-39.

Yildiz, U., *et al.* (2004). "Effects of the wood preservatives on mechanical properties of yellow pine (*Pinus sylvestris* L.) wood." Building and Environment(39): 1071-1075.

Zienkiewicz, O. C. e Taylor, R. L. (2000). The Finite Element Method - Volume 1: The Basis, Butterworth-Heinemann.