



Dissertação

Mestrado em Engenharia Civil – Construções Cívicas

***Avaliação da Integridade de Madeira Lamelada
Colada Através de Ultra-sons***

Filipe Rosa Francisco

Leiria, *Setembro* de 2013



Dissertação

Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas

***Avaliação da Integridade de Madeira Lamelada
Colada Através de Ultra-sons***

Filipe Rosa Francisco

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor Florindo Gaspar,
Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria

Leiria, *Setembro de 2013*

A todos aqueles que, verdadeiramente, sentem a minha enorme gratidão...

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Agradecimentos

Ao Doutor Florindo Gaspar, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Civil da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria, Instituto Politécnico de Leiria, orientador desta dissertação, pelo incentivo inicial à realização deste trabalho, pela constante confiança depositada na sua prossecução, pela total disponibilidade ao longo do tempo, por me ter aceitado como orientando numa área que tão bem conhece e pela pronta e célere dedicação na resolução dos problemas que foram surgindo, o meu especial agradecimento.

À Engenheira Vânia Marques, Técnica Superior do Departamento de Engenharia Civil da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria, Instituto Politécnico de Leiria, por toda a sua disponibilidade e incansável sentido de ajuda na realização dos ensaios com recurso aos ultra-sons.

À Engenheira Maria Rodrigues, Técnica Superior do Departamento de Engenharia do Ambiente da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria, Instituto Politécnico de Leiria, pela ajuda prestada na elaboração da solução química para determinação da percentagem de rotura pela madeira nos ensaios ao corte.

A todos os meus colegas de curso que de alguma forma demonstraram o seu entusiasmo e disponibilizaram a sua pronta ajuda na realização dos ensaios.

À ESTG Leiria enquanto instituição de ensino superior, pela disponibilização de todas as condições e equipamentos necessários à realização dos ensaios inerentes a este trabalho.

À minha família que sempre me encorajou durante todo este período e em particular à Sylvie, minha esposa, pela sua constante compreensão e motivação durante a realização da dissertação e por todo o encorajamento ao longo desta aventura.

Ao meu sogro, Armando Gaspar Ferreira, como forma de reconhecimento e recordação eterna, que não pode acompanhar até ao fim a realização deste trabalho, agradeço-lhe a alegria e os valores transmitidos que jamais esquecerei.

Ao meu amigo, Bruno Pereira, pela sua preciosa ajuda na preparação das amostras para ensaio ao corte, pela sua paciência e perfeição, pelo seu permanente encorajamento e confiança e pela constante disponibilidade demonstrada, um agradecimento muito especial.

Resumo

A integridade das estruturas de madeira lamelada colada é um aspeto importante que deve ser considerado. Contudo, este aspeto não tem sido devidamente acautelado e o défice de informação acerca da avaliação do desempenho de juntas coladas de madeira lamelada colada justifica a realização de uma investigação aprofundada, no seguimento de outras realizadas por outros autores, com vista à inspeção de estruturas em serviço, com recurso a ultra-sons.

De forma explícita, até hoje, os ensaios realizados sobre elementos estruturais de madeira lamelada colada incidem sobretudo sobre aspetos de controlo de qualidade em fase de fabrico. Nesta fase, são realizados ensaios nas ligações de topo, ensaios de delaminação e ensaios de corte sobre a junta colada, com base em amostras retiradas essencialmente dos topos dos elementos de madeira lamelada colada, a fim de evitar desperdícios de material.

Embora a EN 391 (2001) sugira três métodos distintos para os ensaios de delaminação, tendo como princípio a criação de um gradiente de teor de água no interior da madeira, de forma a gerar tensões com direção perpendicular à junta de colagem, provocando a rotura das juntas de colagem impróprias, será difícil transpor uma situação laboratorial deste género para a realidade, onde as estruturas além de gradientes hidráulicos estão sujeitas muitas vezes a gradientes térmicos que aceleram o seu processo de envelhecimento natural.

Nesse sentido, foi desenvolvido um trabalho experimental tendo em vista a avaliação a integridade das juntas coladas de madeira lamelada colada com recurso a ultra-sons, uma técnica de ensaio não destrutivo. Posteriormente foram realizados uma série de ensaios de corte sobre provetes retirados das zonas ensaiadas com os ultra-sons no sentido de avaliar a

correlação entre ambos os ensaios. O objetivo foi investigar a possibilidade de aplicar a técnica de emissão ultrassônica sobre estruturas de madeira lamelada colada em serviço.

Os resultados obtidos com a utilização de ultra-sons em termos de avaliação da resistência da junta colada após envelhecimento são promissores. Estudando vários domínios e relacionado os dados ultrassônicos com os resultados obtidos durante os ensaios ao corte, foi possível obter coeficientes de correlação médios bastante relevantes.

Palavras-chave: madeira lamelada colada, juntas coladas, envelhecimento, ultra-sons, resistência ao corte.

Abstract

The integrity of glued laminated wood structures is an important aspect that must be considered. However, this aspect has not been properly addressed and the lack of information about the evaluation of the performance of glued joints in glued laminated timber justifies the realization of a detailed investigation, following those provided by other authors, for the inspection of structures in service, using ultrasound.

Explicitly, until today, the tests realized on structural elements of glued laminated timber focus especially on aspects of quality control in manufacturing phase. In this stage, are realized tests in the top connections, delamination tests and shear test in glued joints, based on samples taken essentially from the tops of the glued laminated timber elements, in order to avoid waste of material.

Although the EN 391 (2001) suggest three distinct methods for the delamination tests, based on the principle of creating a water content gradient within the wood, in order to generate tension with perpendicular direction to the glued joint, causing the rupture of improper glued joints, it will be difficult to transpose a laboratory situation like this for reality, where the structures are still often subject to thermal gradients that accelerate the natural aging process.

In this sense, an experimental work has been developed with a view to evaluating the integrity of glued joints in glued laminated timber using ultrasound, a technique of non-destructive testing. Later, a series of shear tests were realized over samples taken from areas tested with ultrasounds to evaluate the correlation between both tests. The objective was to investigate the possibility of applying the technique of ultrasound emission on glued laminated timber structures in service.

The results obtained with the utilization of ultrasound in terms of the strength glued joint evaluation after aging are promising. Studying multiple domains and related ultrasonic data with the results obtained during the shear tests, it was possible to obtain very relevant average correlation coefficients.

Key-words: glued laminated timber, glued joints, aging, ultrassounds, shear strength.

Índice de Figuras

FIGURA 1: ESQUEMA QUE EXEMPLIFICA O SISTEMA DE CLAVETAGE ANCIÃO UTILIZADO POR PHILIBERT DELORM.	6
FIGURA 2: ERGUIDO EM 1934 NO LABORATÓRIO DE PRODUTOS FLORESTAIS, EM MADISON, WISCONSIN, ESTE EDIFÍCIO É UM DOS PRIMEIROS CONSTRUÍDOS COM MADEIRA LAMELADA COLADA ARQUEADA, PROJETADO E CONSTRUÍDO UTILIZANDO PRINCÍPIOS DE ENGENHARIA (MOODY, HERNANDEZ E LIU 1999).....	7
FIGURA 3: PAVILHÃO ATLÂNTICO NO PARQUE DAS NAÇÕES, LISBOA, PORTUGAL (ESTRUTURAS LMC EM PORTUGAL. INSTRUMENTOS PARA GARANTIA DA QUALIDADE. LNEC. 2007)	10
FIGURA 4: PONTE DE AUTOESTRADA CONSTRUÍDA EM IKAST, DINAMARCA (WWW.LILLEHEDEN.DK).	11
FIGURA 5: PASSERELLE DE VAIRES, PASSAGEM PEDONAL AÉREA SOBRE LINHA DE CAMINHO-DE-FERRO, LOCALIZADA EM VAIRES-SUR-MARNE, FRANÇA (FR.STRUCTURAE.DE).	11
FIGURA 6: CENTRO AQUÁTICO DE AGDE, LOCALIZADO EM AGDE, FRANÇA (SNCCBLC – HTTP://WWW.GLULAM.ORG).....	11
FIGURA 7: CENTRE POMPIDOU-METZ, MUSEU DE ARTE MODERNA E CONTEMPORÂNEA, LOCALIZADO EM METZ, FRANÇA (EN.WIKIPEDIA.ORG).	12
FIGURA 8: DISPOSIÇÃO DAS LAMELAS EM FUNÇÃO DO ESFORÇO (NEGRÃO E FARIA 2009).	13
FIGURA 9: EXEMPLO DE ALGUMAS FORMAS POSSÍVEIS DE EXECUTAR COM MADEIRA LAMELADA COLADA (SNCCBLC – HTTP://WWW.GLULAM.ORG).	13
FIGURA 10: LIGAÇÕES DE TOPO: A – LIGAÇÃO TOPO-A-TOPO; B – LIGAÇÃO DE ENTALHES MÚLTIPLOS (FINGERJOINTS); C – LIGAÇÃO EM BISEL (GASPAR 2006A).	20
FIGURA 11: PROCESSO DE APLICAÇÃO DA COLA NA FACE DAS LAMELAS COM MÁQUINA DE CORTINA. SÃO APLICADOS A COLA E O ENDURECEDOR (PHILIPPE.BERGER2.FREE.FR).	21
FIGURA 12: DISPOSITIVO HIDRÁULICO PARA APLICAÇÃO DA PRESSÃO DE APERTO SOBRE AS LAMELAS À ESQUERDA (SNCCBLC – HTTP://WWW.GLULAM.ORG) E ESQUEMA ILUSTRATIVO À DIREITA (GASPAR 2006A).	22
FIGURA 13: ESQUEMA DO ENSAIO DE FLEXÃO SOBRE UNIÕES DE TOPO ENTRE LAMELAS.....	24
FIGURA 14: ESQUEMA DO ENSAIO DE FLEXÃO SOBRE UNIÕES DE TOPO ENTRE LAMELAS, CASO AS CONDIÇÕES DO PROVETE DE ENSAIO DEFINIDAS NA NORMA EN 408 (2003) NÃO SEJAM CUMPRIDAS....	24
FIGURA 15: CONTROLO DE QUALIDADE DA PRODUÇÃO ATRAVÉS DO ENSAIO DE CORTE (À ESQUERDA) E FLEXÃO (À DIREITA) SOBRE UNIÕES DE TOPO ENTRE LAMELAS (MARCHAND ET AL. 1989).	25
FIGURA 16: AMOSTRA PARA ENSAIO EXTRAÍDA A PARTIR DE UM ELEMENTO DE MADEIRA LAMELA COLADA (EN 391-2002).	27
FIGURA 17: EXEMPLOS DE EXECUÇÃO E UTILIZAÇÃO ERRADA DE MADEIRA LAMELADA COLADA: A) BEIRADO DE COBERTURA INSUFICIENTE PARA PROTEGER A MADEIRA LAMELADA COLADA, B)	

PATOLOGIA CLÁSSICA EM PÉS DE PILARES DE MADEIRA LAMELADA COLADA CONCEBIDOS PARA UMA UTILIZAÇÃO INTERIOR E NÃO EXTERIOR (LE GOVIC 2008).	32
FIGURA 18: ESTRUTURA EM MADEIRA LAMELADA COLADA: TRAÇÃO TRANSVERSAL INDUZIDA POR SUSPENSÕES FIXAS NA FACE INFERIOR DA VIGA (LE GOVIC 2008).	33
FIGURA 19: FISSURAÇÃO DA LAMELA DE MADEIRA MACIÇA E DELAMINAÇÃO DA JUNTA COLADA NUMA VIGA DE MADEIRA LAMELADA COLADA (LE GOVIC 2008).	34
FIGURA 20: ASPETO DE UMA VIGA DE MADEIRA LAMELADA COLADA DE ESPRUCE COM COLA MUF COM 30 MESES DE ENVELHECIMENTO NATURAL: A) FACE SUL, B) FACE NORTE. (GASPAR (2010)).	36
FIGURA 21: ESTRUTURA DA PAREDE CELULAR DOS TRAQUEÍDEOS (HASEGAWA 2010).	40
FIGURA 22: CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA UTILIZADO PARA AQUISIÇÃO DE DADOS DA EMISSÃO ULTRASSÓNICA (REIS 1989).	44
FIGURA 23: CONFIGURAÇÃO DA AMOSTRA PARA MEDIÇÕES DO ENSAIO AO CORTE (REIS 1989).	45
FIGURA 24: AMOSTRA DE MADEIRA LAMELADA COM ZONAS DE CONTROLO E DEFEITOS (BEALL E BIERNACKI 1992).	46
FIGURA 25: SECÇÃO DE CORTE DE UMA AMOSTRA DE MADEIRA LAMELADA COLADA APRESENTANDO O ÂNGULO DE ANEL DE CRESCIMENTO (BEALL E BIERNACKI 1992).	47
FIGURA 26: DIREÇÕES DE TRANSMISSÃO DO SINAL ULTRASSÓNICO (BEALL E BIERNACKI 1992).	47
FIGURA 27: AMOSTRA E ESQUEMA DE CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO (DILL LANGER ET AL. 2005B).	49
FIGURA 28: CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO PARA MEDIÇÕES DA REFLEXÃO DA ONDA, NUMA VIGA LAMELADA COLADA COM PROPAGAÇÃO NA DIREÇÃO PERPENDICULAR À DIREÇÃO DAS FIBRAS (DILL LANGER ET AL. 2005A).	51
FIGURA 29: SECÇÃO TRANSVERSAL RESULTANTE DA AMOSTRA COM DOIS BLOCOS OBTIDOS PELA COLAGEM SECUNDÁRIA (DILL LANGER ET AL. 2005A).	52
FIGURA 30: CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO PARA DETEÇÃO DE DEFEITOS NA JUNTA COLADA, UTILIZANDO AS MEDIÇÕES DE REFLEXÃO DA ONDA ATRAVÉS DE ULTRA-SONS (DILL LANGER ET AL. 2005A).	52
FIGURA 31: COLOCAÇÃO DAS VIGAS PARA ENVELHECIMENTO NATURAL (GASPAR 2010).	54
FIGURA 32: ASPETO GERAL DAS VIGAS ENSAIADAS.	59
FIGURA 33: POSICIONAMENTO DAS SONDAS E EQUIPAMENTO UTILIZADO NO ENSAIO ULTRASSÓNICO (GASPAR 2010).	59
FIGURA 34: PUNDIT – EQUIPAMENTO QUE EMITE E RECEBE AS ONDAS ULTRASSÓNICAS.	60
FIGURA 35: OSCILOSCÓPIO TDS 220 – EQUIPAMENTO QUE CAPTA AS ONDAS ULTRASSÓNICAS RECEBIDAS E AS TRANSMITE AO SOFTWARE WAVESTAR INSTALADO NUM COMPUTADOR.	60
FIGURA 36: SONDA DE 200 KHZ COM 20 MM DE DIÂMETRO.	61
FIGURA 37: ACONDICIONAMENTO DAS AMOSTRAS NA SALA DE ENSAIOS.	62
FIGURA 38: PREPARAÇÃO DAS VIGAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA – ASPETO DAS SUPERFÍCIES LIXADAS PARA CONTACTO DA SONDA COM AS LAMELAS.	63
FIGURA 39: PROCEDIMENTO DE MARCAÇÃO DAS VIGAS PARA ENSAIO COM ULTRA-SONS E AO CORTE. .	64
FIGURA 40: CALIBRAÇÃO DAS SONDAS PARA ENSAIO COM ULTRA-SONS.	65
FIGURA 41: COLOCAÇÃO DAS SONDAS SOBRE AS MARCAÇÕES EFETUADAS PREVIAMENTE NAS DUAS IMAGENS À ESQUERDA E REGULAÇÃO DA PRESSÃO DE APLICAÇÃO DA FORÇA ATRAVÉS DO EXTENSÓMETRO À DIREITA.	66
FIGURA 42: PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO EM CADA ZONA DA VIGA A ENSAIAR.	66

FIGURA 43: TIPOS DE PROVETES EM MADEIRA LAMELADA COLADA: A) PROVETE TIPO BARRA, B) CAROTES (GASPAR 2010).	68
FIGURA 44: ASPETO DO EQUIPAMENTO A UTILIZAR NOS ENSAIOS DE CORTE: A) EQUIPAMENTO PARA ENSAIOS DE COMPRESSÃO E FLEXÃO, B) DISPOSITIVO PARA ENSAIOS DE CORTE, C) ESQUEMA DO ENSAIO DE CORTE.	70
FIGURA 45: COLOCAÇÃO DA AMOSTRA NO DISPOSITIVO DE CORTE, COM PLANO DE CORTE NO SENTIDO DO FIO DA MADEIRA.....	70
FIGURA 46: DISPOSITIVO PARA ENSAIO AO CORTE DAS AMOSTRAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA... ..	71
FIGURA 47: EXEMPLOS DO ASPETO DAS JUNTAS COLADAS COM PRF APÓS ENSAIO DE CORTE.	73
FIGURA 48: PREPARAÇÃO DA SOLUÇÃO PARA O INDICADOR DE PH.....	74
FIGURA 49: EXEMPLOS DE JUNTAS COLADAS COM MUF PINTADAS COM O INDICADOR DE PH APÓS O ENSAIO DE CORTE, PARA DETERMINAÇÃO DA PERCENTAGEM DE ROTURA PELA MADEIRA.....	74
FIGURA 50: IMAGENS UTILIZADAS PARA MEDIÇÃO DA PERCENTAGEM DE ROTURA PELA MADEIRA.....	75
FIGURA 51: VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA AO CORTE E PERCENTAGEM DE ROTURA PELA MADEIRA DOS PROVETES DE MADEIRA LAMELADA COLADA DE ESPRUCE COM COLA MUF, COM E SEM ENVELHECIMENTO NATURAL.	79
FIGURA 52: RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PROVETES DE MADEIRA LAMELA COLADA DE ESPRUCE COM COLA DE MUF ENVELHECIDA NATURALMENTE.	80
FIGURA 53: VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CORTE E DA PERCENTAGEM DE ROTURA PELA MADEIRA COM A MASSA VOLÚMICA NA MADEIRA LAMELADA COLADA DE ESPRUCE, COM COLA DE PRF, ANTES DO ENVELHECIMENTO (GASPAR 2010).	82
FIGURA 54: RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE EM PROVETES DE MADEIRA LAMELA COLADA DE ESPRUCE COM COLA DE PRF ENVELHECIDA NATURALMENTE. À ESQUERDA PARA VIGAS COM 80 X 13 MM DE SECÇÃO E À DIREITA COM 90 X 225 MM.	82
FIGURA 55: DETERMINAÇÃO DO FIM E DO INÍCIO DA ONDA PELO ESTABELECIMENTO DE UMA FRONTEIRA DE RUÍDO (GASPAR 2010).	86
FIGURA 56: VARIAÇÃO DO TEMPO PARA A MÁXIMA AMPLITUDE (TMPA) EM FUNÇÃO DO ACRÉSCIMO DE RUÍDO (AR).	87
VIGAS M – ESPRUCE COM COLA MUF, P – ESPRUCE COM COLA PRF.....	87
FIGURA 57: CONFIGURAÇÃO DA ONDA ULTRASSÓNICA NOS PRIMEIROS 50 μ S DE DURAÇÃO, EM TERMOS MÉDIOS.	88
FIGURA 58: ESPECTRO DE UMA ONDA TÍPICA CAPTADA COM A SONDA EMISSORA COLOCADA DIRETAMENTE EM CONTACTO COM A RECETORA (GASPAR (2010)).	88
FIGURA 59: AMPLITUDES MÉDIAS DOS ESPECTROS OBTIDOS PARA PROVETES DE MADEIRA LAMELADA COLADA DE ESPRUCE.	89
FIGURA 60: COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DURANTE OS PRIMEIROS 100 MS DA ONDA PARA VIGAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA DE ESPRUCE, UTILIZANDO A ONDA NO DOMÍNIO DO TEMPO. RESULTADOS EM TERMOS DE RESISTÊNCIA AO CORTE PELA JUNTA COLADA (SG): A) VIGAS COM COLA MUF E NA DIREÇÃO 1-2, B) VIGAS COM COLA PRF E NA DIREÇÃO 2-1.....	94
FIGURA 61: COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DURANTE OS PRIMEIROS 100 MS DA ONDA PARA VIGAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA DE ESPRUCE, UTILIZANDO A ONDA NO DOMÍNIO DO TEMPO. RESULTADOS EM TERMOS DE RESISTÊNCIA AO CORTE PELA MADEIRA (SW): A) VIGAS COM COLA MUF E NA DIREÇÃO 1-2, B) VIGAS COM COLA PRF E NA DIREÇÃO 1-2.	95
FIGURA 62: COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DURANTE OS PRIMEIROS 100 MS DA ONDA PARA VIGAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA DE ESPRUCE, UTILIZANDO A ONDA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA.	

RESULTADOS EM TERMOS DE RESISTÊNCIA AO CORTE PELA JUNTA COLADA (SG): VIGAS COM COLA MUF E NA DIREÇÃO 1-2. 98

FIGURA 63: COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DURANTE OS PRIMEIROS 100 MS DA ONDA PARA VIGAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA DE ESPRUCE, UTILIZANDO A VELOCIDADE E A ONDA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA. RESULTADOS EM TERMOS DE RESISTÊNCIA AO CORTE PELA JUNTA COLADA (SG): VIGAS COM COLA PRF E NA DIREÇÃO 1-2. 99

FIGURA 64: COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DURANTE OS PRIMEIROS 100 MS DA ONDA PARA VIGAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA DE ESPRUCE, UTILIZANDO A ONDA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA. RESULTADOS EM TERMOS DE RESISTÊNCIA AO CORTE PELA MADEIRA (SW): A) VIGAS COM COLA MUF E NA DIREÇÃO MÉDIA, B) VIGAS COM COLA PRF E NA DIREÇÃO 1-2..... 99

Índice de Quadros

QUADRO 2.1 – CARACTERÍSTICAS DAS PRINCIPAIS ESPÉCIES USADAS EM MADEIRA LAMELADA-COLADA* (GASPAR 2005).....	16
QUADRO 2.2 – CONDIÇÕES DE TEMPERATURA E HUMIDADE RELATIVA NA CONDUTA DE SECAGEM PARA OS DIFERENTES MÉTODOS DE ENSAIO (EN 391-2002).	26
QUADRO 2.3 – EXEMPLOS DA CONSTITUIÇÃO DE VIGAS DE ACORDO COM OS REQUISITOS DA NORMA NP EN 1194 (2002) (GASPAR 2006A).	28
QUADRO 2.4 – CLASSES DE RESISTÊNCIA DA MADEIRA LAMELADA-COLADA E RESPETIVAS PROPRIEDADES (NP EN 1194-2002).....	29
QUADRO 4.1 – CARACTERÍSTICAS DAS PEÇAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA ENSAIADAS.	58
QUADRO 4.2 – MASSA VOLÚMICA E TEOR DE ÁGUA MÉDIOS DE CADA VIGA ENSAIADA.	76
QUADRO 4.3 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE PARA PROVETES COM E SEM ENVELHECIMENTO NATURAL.	77
QUADRO 4.4 – PLSR PARA A RESISTÊNCIA AO CORTE E PERCENTAGEM DE ROTURA PELA MADEIRA UTILIZANDO A ONDA NO DOMÍNIO DO TEMPO*, EM VIGAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA DE ESPRUCE.	91
QUADRO 4.5 – PLSR PARA A RESISTÊNCIA AO CORTE E PERCENTAGEM DE ROTURA PELA MADEIRA UTILIZANDO A VELOCIDADE E A ONDA NO DOMÍNIO DO TEMPO*, EM VIGAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA DE ESPRUCE.	92
QUADRO 4.6 – PLSR PARA A RESISTÊNCIA AO CORTE E PERCENTAGEM DE ROTURA PELA MADEIRA UTILIZANDO A VELOCIDADE E OS PARÂMETROS ULTRASSÓNICOS*, EM VIGAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA DE ESPRUCE.....	93
QUADRO 4.7 – PLSR PARA A RESISTÊNCIA AO CORTE E PERCENTAGEM DE ROTURA PELA MADEIRA UTILIZANDO A ONDA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA*, EM VIGAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA DE ESPRUCE.	96
QUADRO 4.8 – PLSR PARA A RESISTÊNCIA AO CORTE E PERCENTAGEM DE ROTURA PELA MADEIRA UTILIZANDO A VELOCIDADE E A ONDA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA*, EM VIGAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA DE ESPRUCE.....	97

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de Siglas

AE – Método da emissão acústica (*acoustic emission*)

Amp – Amplitude

AR – Acréscimo de ruído

AT – Área no domínio do tempo

AU – Técnica da emissão ultra-sónica (*acousto-ultrasonics*)

bg – Provete de forma prismática com plano de corte de 50 mm x 50 mm com envelhecimento

bg_ini - Provete de forma prismática com plano de corte de 50 mm x 50 mm sem envelhecimento

CT – Centróide tempo

$E_{0,g,médio}$ – Valor médio do módulo de elasticidade paralelo às fibras da madeira lamelada colada

$E_{0,g,05}$ – Valor característico do módulo de elasticidade paralelo às fibras da madeira lamelada colada

$E_{90,g,médio}$ – Valor médio do módulo de elasticidade perpendicular às fibras da madeira lamelada colada

f – frequência

$F_{máx}$ – Carga máxima transmitida pelo equipamento

$f_{c,0,g,k}$ – Valor característico da tensão resistente à compressão paralela às fibras da madeira lamelada colada

$f_{c,90,g,k}$ – Valor característico da tensão resistente à compressão perpendicular às fibras da madeira lamelada colada

$f_{m,g,k}$ – Valor característico da resistência à flexão da madeira lamelada colada

$f_{t,0,g,k}$ – Valor característico da tensão resistente à tração paralela às fibras da madeira lamelada colada

$f_{t,90,g,k}$ – Valor característico da tensão resistente à tração perpendicular às fibras da madeira lamelada colada

$G_{g,médio}$ – Módulo de distorção da madeira lamelada colada

GRA – *Growth ring angle*

M – Madeira lamelada colada de Espruce com cola melamina-ureia-formol

MF – Melamin-formol

MUF – Melamina-ureia-formol

MUPF – Melamina-ureia-fenol-formol

MV- Massa volúmica

MV bg – Massa volúmica dos provetes com envelhecimento

MV bg_ini – Massa volúmica dos provetes sem envelhecimento

M1 – Momento de ordem 1

M2 – Momento de ordem 2

NR – Nível de ruído

P - Madeira lamelada colada de Espruce com cola fenol-ressorcinol-formol

PaP – Amplitude entre os picos máximo e mínimo registados pela onda

PC – Componente principal da PCA ou da PLSR

PCA – Análise de componentes principais (*principal component analysis*)

PF – Fenol-formol

PLSR – Regressão dos mínimos quadrados parciais (*partial least squares regression*)

PRF – Fenol-ressorcinol-formol

PUF – Fenol-ureia-formol

RF – Ressorcinol-formol

RMS – Valor eficaz (*root mean square*)

RMSECV – Raiz quadrada do erro quadrático médio da validação cruzada (*root mean squared error of cross validation*)

r_{cv} – Coeficiente de correlação da validação cruzada

SG – Resistência ao corte da junta colada

SG bg – Resistência média ao corte da junta colada de provetes com envelhecimento

SG bg_ini – Resistência média ao corte da junta colada de provetes sem envelhecimento

SG bg_ne – Resistência ao corte da junta colada de provetes tipo bg sem envelhecimento

SW – Resistência ao corte da madeira

SW bg – Resistência média ao corte da madeira de provetes com envelhecimento

SW bg_ini – Resistência média ao corte da madeira de provetes sem envelhecimento
SW bg_ne – Resistência ao corte da madeira de provetes tipo bg sem envelhecimento
T – Período
TMPA – Tempo para a máxima amplitude
UF – Ureia-formol
V – Velocidade
WFP – Percentagem de rotura pela madeira
WFP bg – Percentagem de rotura pela madeira de provetes com envelhecimento
WFP bg_ini – Percentagem de rotura pela madeira de provetes sem envelhecimento
WFP bg_ne – Percentagem de rotura pela madeira de provetes tipo bg sem envelhecimento
 z_i – Zona de medição
 $\rho_{g,k}$ – Valor característico da massa volúmica da madeira lamelada colada

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Índice

DEDICATÓRIA	I
AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE QUADROS	XIII
LISTA DE SIGLAS	XV
ÍNDICE.....	XIX
INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO E ÂMBITO DO TRABALHO	1
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	3
MADEIRA LAMELADA COLADA	5
2.1 RESENHA HISTÓRICA	5
2.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS NA SUA UTILIZAÇÃO.....	12
2.2.1 VANTAGENS RELATIVAMENTE À MADEIRA MACIÇA	12
2.2.2 VANTAGENS RELATIVAMENTE AO BETÃO E AO AÇO.....	13
2.2.3 DESVANTAGENS NA SUA UTILIZAÇÃO.....	15
2.3 PROCESSO DE FABRICO	16
2.3.1 A MADEIRA.....	16
2.3.2 A COLA	17
2.3.3 PROCESSO DE FABRICO.....	20
2.3.4 ENSAIOS EM FASE DE PRODUÇÃO.....	22
2.4 CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA LAMELADA COLADA	27
2.4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	27
2.4.2 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS	28
DEGRADAÇÃO E AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA.....	31
3.1 DEGRADAÇÃO DE ESTRUTURAS EM SERVIÇO	31
3.1.1 CAUSAS E EFEITOS DO ENVELHECIMENTO SOBRE ESTRUTURAS DE MADEIRA LAMELA COLADA	31
3.1.2 ALGUNS ESTUDOS REALIZADOS NO ÂMBITO DA AVALIAÇÃO DO EFEITO DA DELAMINAÇÃO NA RESISTÊNCIA DE VIGAS DE MADEIRA LAMELA COLADA.....	34
3.2 UTILIZAÇÃO DE ULTRA-SONS NA AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA	37
3.2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	37

3.2.2 PROPAGAÇÃO DOS ULTRA-SONS NA MADEIRA.....	38
3.2.3 MEDIÇÃO DE ULTRA-SONS.....	41
3.2.4 TRABALHOS REALIZADOS POR OUTRO AUTORES.....	43
TRABALHO EXPERIMENTAL DESENVOLVIDO	57
4.1 INTRODUÇÃO	57
4.2 MATERIAL DE ENSAIO.....	58
4.3 ENSAIOS COM ULTRA-SONS	59
4.3.1 EQUIPAMENTO DE ENSAIO.....	59
4.3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA ENSAIO	62
4.3.3 PROCEDIMENTO DE ENSAIO	64
4.4 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DE RESISTÊNCIA AO CORTE	67
4.4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	67
4.4.2 MATERIAL E PROCEDIMENTO DE ENSAIO.....	68
4.5 RESULTADOS DOS ENSAIOS AO CORTE	75
4.6 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM ULTRA-SONS	84
4.6.1 TRATAMENTO DAS ONDAS RECOLHIDAS.....	84
4.6.2 ANÁLISE DAS ONDAS CAPTADAS.....	85
4.6.3 AFINIDADE COM A RESISTÊNCIA AO CORTE	90
CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	101
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
5.2 PRINCIPAIS CONCLUSÕES	101
5.3 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	103
BIBLIOGRAFIA	105
APÊNDICES	ERRO! MARCADOR NÃO DEFINIDO.
ANEXOS.....	1

Introdução

1.1 Enquadramento e âmbito do trabalho

A madeira lamelada colada tem surgido em Portugal como uma excelente alternativa às estruturas tradicionais de betão armado, aço ou mistas betão-aço em algumas situações, fruto da sua elevada flexibilidade ao nível das soluções construtivas, à sua resistência, aparência e possibilidade de vencer vãos significativamente grandes, por exemplo. A sua aceitação no mercado nacional tem aumentado e nesse sentido existe já um largo número de empresas que se dedicam ao fabrico e importação de estruturas de madeira lamelada colada, provenientes na sua maioria do norte da Europa.

Ainda assim, como qualquer outro tipo de material, a madeira lamelada colada apresenta alguns problemas que podem tornar-se de importante gravidade a longo prazo. Para além disso, a crescente utilização deste tipo de material em estruturas tem levado frequentemente a uma perda de qualidade, que resulta em fenómenos de delaminação a longo prazo, consequência de processos de colagem imperfeitos durante o processo de fabrico e/ou exposição a tensões devidas a variações bruscas de humidade e temperatura.

Até hoje, para além da inspeção visual não é conhecido nenhum método de ensaio não destrutivo para a avaliação da integridade de juntas coladas de madeira lamelada colada. Para avaliação da qualidade do processo de fabrico são utilizados métodos de controlo do processo e colagem e posteriormente em serviço utilizam-se métodos baseados na inspeção visual das estruturas e realizam-se algumas campanhas de recolha de amostras em carotes cilíndricos que acabam por representar um número limitado de juntas, ensaiados depois ao corte para aferir a resistência residual.

Em fase de fabrico, as vigas de madeira lamelada colada são construídas em série. Os ensaios destrutivos para aferição da resistência das juntas são realizados sobre provetes retirados de uma viga ao acaso que representa um número alargado de vigas fabricadas nesse lote. Esta questão levanta desde logo o problema da representatividade da amostra. Não é certo que em todas as vigas, em todas as juntas e em qualquer secção os mesmos resultados se verifiquem, e isso pode significar problemas estruturais em serviço à *posteriori*. Por outro lado, é bem possível e perfeitamente aceitável que produtos de madeira lamelada colada pertencentes a um grupo maior (representado pela amostra) possam ser rejeitados como consequência da análise estatística de um ensaio destrutivo sobre uma pequena amostra. Daqui pode advir um desperdício perfeitamente desnecessário.

A necessidade de enfrentar este tipo de problema tem suscitado junto de muitos autores, o interesse no estudo de técnicas de avaliação não destrutiva de produtos de madeira lamelada colada, nomeadamente com recurso aos ultra-sons. A aplicação de ultra-sons à madeira tem sido essencialmente dirigida para a deteção e avaliação de defeitos ou para avaliação de propriedades mecânicas. Os métodos de inspeção ultrassónica, atualmente disponíveis, podem ser diferenciados segundo cinco grandes grupos, consoante sejam baseados na técnica: 1) do eco pulsado; 2) de transmissão ou sombra; 3) de imersão; 4) da emissão acústica; 5) da emissão ultrassónica. É esta última que serve de base ao desenvolvimento do presente trabalho experimental.

A ideia de base é fazer uma série de ensaios sobre vigas de madeira lamelada colada, previamente envelhecidas naturalmente, e concretizar posteriormente duas situações. A primeira, comparar os resultados obtidos em ensaio de corte com ensaios semelhantes realizados sobre peças de madeira lamelada colada não envelhecida, com o objetivo de relacionar a variação de resistência obtida. Segundo, das mesmas zonas de medição dos ultra-sons realizar uma campanha de levantamento de amostras e submete-las a ensaios de corte, com vista avaliar a correlação entre ambos os ensaios.

Este trabalho insere-se no âmbito de uma investigação iniciada pelo Professor Florindo Gaspar, docente do Departamento de Engenharia Civil da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico e Leiria, que levantou a possibilidade de realizar uma análise mais alargada a um número significativo de amostras de madeira lamelada colada no sentido de investigar a possibilidade de aplicar a técnica da emissão ultrassónica sobre estruturas de

madeira lamelada colada em serviço, constituindo um passo muito importante no desenvolvimento de técnicas de análise e avaliação não destrutivas.

1.2 Estrutura do trabalho

No sentido de estabelecer uma interligação entre o tema do trabalho e o material utilizado durante os ensaios, no Capítulo 2 faz-se uma resenha histórica onde se pode perceber de forma rápida a evolução da madeira lamelada colada enquanto material utilizado nos mais diversos tipos de estrutura. Mencionam-se ainda as principais vantagens e desvantagens na utilização deste material e será abordado também o processo de fabrico da madeira lamelada colada, indicando os tipos de madeira e cola utilizados e fazendo uma referência a cada uma das fases distintas em que se subdivide o processo de fabrico. Neste capítulo será ainda feita uma descrição exaustiva dos dois tipos de ensaios realizados em fase de fabrico, ensaios de flexão sobre as uniões de topo entre lamelas e ensaios de delaminação das juntas coladas. Termina-se com a indicação das principais características físicas da madeira utilizada bem como de algumas performances mecânicas, em termos de classes de resistência da madeira lamelada colada e respetivas propriedades.

De forma a contornar problemas relativos à extração de grandes amostras de madeira para análise das suas propriedades no âmbito dos ensaios destrutivos, têm-se vindo a desenvolver metodologias de ensaio não destrutivas, baseadas na sua grande maioria em técnicas já utilizadas na avaliação não destrutiva de outros materiais. Assim, no Capítulo 3 será feita uma revisão bibliográfica sobre o tema em estudo, apresentando-se vários trabalhos realizados por outros autores que estudaram a viabilidade da utilização da técnica de emissão ultrassónica com vista a caracterizar a resistência de juntas coladas em vigas de madeira lamelada colada. Esta revisão bibliográfica revelou que a maior parte dos estudos foram efetuados construindo amostras de madeira lamelada colada nas quais eram introduzidas, propositadamente, defeitos ao nível da junta colada, de forma a perceber até que ponto, a utilização dos ultrassons permitia perceber a localização desses defeitos, através da análise do sinal das ondas emitidas e recebidas nos seus vários domínios. O objetivo seria repercutir esta análise laboratorial, sob condições previamente e garantidamente conhecidas, para uma análise de elementos de madeira lamelada colada em condições de serviço.

Este capítulo abordará ainda a degradação de estruturas em serviço, recordando as principais causas e efeitos do envelhecimento sobre estruturas de madeira lamela colada bem como alguns estudos realizados no âmbito da avaliação do efeito da delaminação na resistência de vigas de madeira lamela colada.

Antes de descrever a forma como os ensaios com ultrassons foram realizados durante o trabalho experimental, este capítulo ainda tratará alguns temas pertinentes, explicando a forma como os ultrassons se podem propagar de uma forma geral e na madeira em particular. Será também explicada a forma como se pode realizar a medição dos ultrassons e serão descritos os métodos de inspeção ultrassónica, atualmente disponíveis.

No Capítulo 4 descreve-se todo o trabalho experimental desenvolvido em termos de ensaios com recurso aos ultrassons e ensaios ao corte. Inicialmente será feita uma descrição do material e de todo o equipamento de ensaio utilizado e posteriormente descreve-se todo o trabalho preliminar realizado no âmbito da preparação e acondicionamento das amostras, terminando com a explicação de todo o procedimento efetuado em ambos os ensaios realizados.

A discussão de resultados será também apresentada no Capítulo 4 onde, numa primeira fase, são abordados os resultados obtidos nos ensaios ao corte e numa segunda fase, são apresentados e discutidos os resultados relativos aos ensaios com ultrassons. Nestes últimos, faz-se inicialmente uma abordagem ao tratamento e análise das ondas captadas e por fim discute-se a sua afinidade com a resistência ao corte nos diversos domínios estudados.

Madeira Lamelada Colada

2.1 Resenha histórica

A madeira lamelada colada aparece historicamente como a conjugação de duas técnicas bastante antigas. Como o próprio nome sugere, este tipo de material assenta em três pilares essenciais, a matéria-prima composta pela madeira, a sua forma em lamelas e as juntas coladas entre as lamelas. Aliando a técnica da laminação dos troncos de madeira à técnica de colagem entre lameladas por meio de métodos de prensagem, foi possível realizar uma reconstituição da madeira a partir de lâminas, dispostas de tal forma que as suas fibras fiquem paralelas entre si.

Quando esta solução surgiu, dentro daquilo que nos dias de hoje se conhece, teve o impacto de uma verdadeira evolução em termos históricos. Todas as práticas tradicionais relativas à utilização da madeira foram revolucionadas graças a este novo material com características únicas a todos níveis.

No entanto, o aparecimento deste tipo de material é fruto de muitos anos de evolução, a sua história abarca progresso e homens talentosos. Foi o caso do Philibert Delorme, arquiteto francês Renascentista que, no século XVI teve a ideia de fazer com a madeira o que, até à data, era realizado com pedra. Foram idealizados os primeiros arcos em madeira, permitindo a realização de vãos muito superiores aos que até então eram utilizados. Assim, em 1548, Delorme começou a realizar uma estrutura em arco, composta por secções curtas de madeira solidarizadas entre si por um sistema de *clavetage*¹ em madeira (Figura 1). Nascia assim o método de laminação.

¹ Clavetage, é um sistema de acoplamento por interceção. Consiste em intercalar uma peça denominada “*clavette*” entre duas outras. Neste contexto, designa um sistema de aperto das lamelas com recurso à utilização de duas guias verticais e duas horizontais em madeira, que contornam o perímetro da viga. A ligação na interceção entre as guias é feita por atravessamento

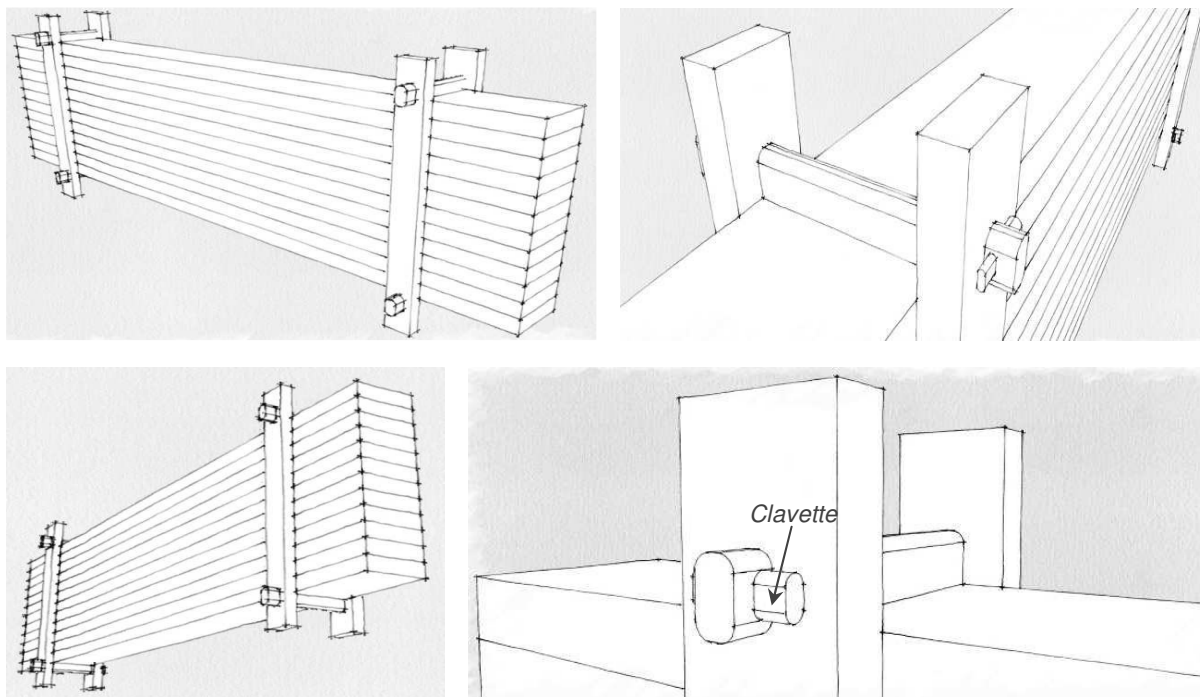


Figura 1: Esquema que exemplifica o sistema de clavetage ancião utilizado por Philibert Delorm.

Alguns séculos mais tarde, esta invenção continua a fazer o seu caminho. No século XIX, o coronel Emy deu mais alguns passos importantes e aperfeiçoa este método constituindo arcos de vão ainda superior seguindo o mesmo princípio básico de laminação e sobreposição de tábuas de madeira dispostas horizontalmente, mas cintando-as e fixando-as com ligações metálicas de grampos metálicos / braçadeiras e parafusos.

É no início do século XX, que a madeira lamelada colada dá os seus primeiros passos através de Otto Hetzer, carpinteiro alemão muito talentoso que teve a ideia de substituir as ligações metálicas utilizadas pelo coronel Emy por um sistema e colagem com caseína, técnica que iria eliminar qualquer tipo de deformação. Entre 1906 e 1907, este material é patenteado com a denominação “Sistema Hetzer” na Alemanha, França e Suíça, países aliás, com grande tradição na utilização de madeira na construção civil. Esta nova solução constitui uma tal evolução técnica que a sua aplicação em estruturas é de imediato generalizada. Torna-se, de facto, num material revolucionário.

Uns após outros, sucederam-se os exemplos onde, combinando a resistência, comprimento do vão e originalidade de formas, se foram criando estrutura cada vez mais arrojadas, sendo apresentados em 1910, no salão de exposições de Bruxelas, vãos com 43 metros de

das guias horizontais sobre as guias verticais. O fecho da ligação é formado pela colação de uma chaveta numa das extremidades da guia horizontal, que trava as guias verticais impedindo movimentos laterais e verticais das lamelas.

comprimento. De utilização simples e eficaz, a madeira lamelada colada iria ser fonte de inspiração arquitetônica e transformar o carpinteiro tradicional. Ultrapassando as capacidades naturais implícitas da madeira, este material importou novas dimensões para as estruturas: a criatividade e a alta tecnologia.

Nessa altura, Otto Hetzer utilizava colas que não são adequadas para ambientes com humidade relativa elevada. Assim, as aplicações deste novo material foram limitadas a condições de serviço de ambientes tipicamente interiores. Nesse sentido, durante e após a Primeira Guerra Mundial, foram estudadas e melhoradas algumas características relativamente ao tipo de cola, o que estimulou ainda mais o interesse Europeu em relação à utilização da madeira lamelada colada na construção de aeronaves e na construção civil.

Dezasseis anos passados sobre a Primeira Guerra Mundial, esta técnica chega aos Estados Unidos em 1934, quando Max Hanisch, arquitecto e engenheiro alemão, que havia colaborado com Hetzer durante a viragem de século, formou a sua própria empresa em Peshtigo, Wisconsin, para fabricação de madeira lamelada colada. Um dos primeiros exemplos de estrutura em madeira lamelada colada construída nos Estados Unidos foi um laboratório de pesquisa no Laboratório de Produtos Florestais USDA, em Madison, Wisconsin. A estrutura foi erguida em 1934 e ainda hoje se encontra em serviço (Figura 2).

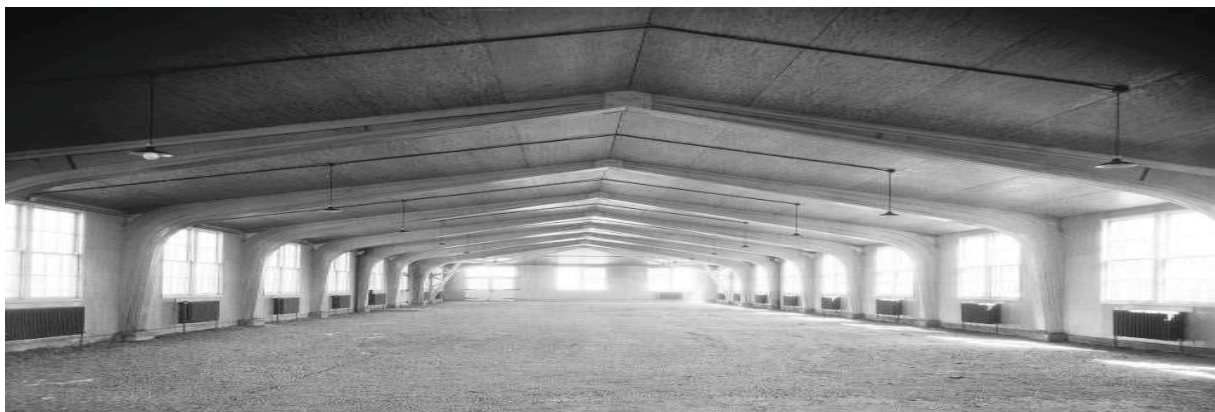


Figura 2: Erguido em 1934 no Laboratório de Produtos Florestais, em Madison, Wisconsin, este edifício é um dos primeiros construídos com madeira lamelada colada arqueada, projetado e construído utilizando princípios de engenharia (Moody, Hernandez e Liu 1999).

O aparecimento desta tecnologia nos Estados Unidos desencadeou o aparecimento de um número alargado de novas empresas utilizando a mesma tecnologia de base. Por essa altura este tipo de material foi muito utilizado em ginásios, igrejas, salões, fábricas, celeiros, estábulos, entre outros.

A Segunda Guerra Mundial, desencadeada em 1939, foi um meio de ignição importante que estimulou o interesse adicional e o desenvolvimento de colas à base de resinas sintéticas que, ao contrário das colas à base de caseína utilizadas inicialmente por Hetzer, eram resistentes à humidade. No seguimento desses estudos, em 1942, foi introduzida uma cola de fenol-resorcinol-formol. Este tipo de cola permitiu que a madeira lamelada colada fosse utilizada em pontes e noutras aplicações em ambientes exteriores expostos, diminuindo significativamente as preocupações com a degradação das juntas coladas (delaminação).

No início dos anos 50, existiam pelo menos uma dúzia de fabricantes de madeira lamelada colada nos Estados Unidos, que se uniram, em 1952, para formar o *American Institute of Timber Construction* (AITC). Em 1963 esta associação produziu o primeiro padrão de fabricação nacional. O AITC continua a preparar, atualizar e distribuir os padrões da indústria para a fabricação e projeto de madeira lamelada colada e a ser a entidade que representa a maioria dos fabricantes de madeira lamelada colada nos Estados Unidos da América.

Em termos Europeus, foram também criados alguns organismos que regulam e promovem as estruturas de madeira lamelada colada. Em França nasceu em 1974 o *Syndicat National des Constructeurs et Fournisseurs de Charpentes en Bois Lamellé Collé* (SNCCBLC – <http://www.glulam.org>). Em Inglaterra foi criada a *Glued Laminated Timber Association* (GLTA – <http://www.glulam.co.uk>).

A madeira lamelada colada, abreviadamente conhecida como MLC, é hoje designada internacionalmente de “Glulam”.

As dimensões dos vãos a vencer foram aumentando paralelamente ao avanço tecnológico a que a madeira lamelada colada foi sendo sujeita ao longo de mais de um século. Até à última década do século XX, as estruturas de madeira lamelada colada atingiram vãos que variaram entre os 100 e 150 metros. Atualmente, com o avanço tecnológico disponível é possível alcançar vãos na ordem dos 250 metros. Comparativamente com soluções estruturais tradicionais, a madeira lamelada colada é uma solução, neste aspeto particular, praticamente imbatível. Espalhados por todo o mundo, existem números exemplos de estruturas executadas com madeira lamelada colada que são o testemunho da sua versatilidade e potencialidade.

De seguida, faz-se uma pequena referência a algumas estruturas executadas com madeira lamelada colada:

- ✓ **Pavilhão Atlântico**, pavilhão multiusos, localizado no Parque das Nações, Lisboa, construído no âmbito da EXPO'98. A cobertura do Pavilhão de Portugal foi a primeira grande estrutura de madeira lamelada colada construída em Portugal. Terminada a construção em 1997, esta estrutura constitui também um marco importante a nível internacional, uma vez que foi um dos primeiros exemplos de uma grande estrutura dimensionada segundo o Eurocódigo 5 (então ENV 1995-1-1). A estrutura é composta por 17 arcos transversais triangulados com dimensões variáveis, tendo o maior arco 114 m de comprimento e altura máxima de 47 m em relação à arena. Os elementos destes arcos são de madeira lamelada colada de Espruce em cujo fabrico foi utilizada cola do tipo I e que receberam, na sua forma e dimensão final, um tratamento preservador superficial inseticida e fungicida (Figura 3).

- ✓ **Motorway Bridge Denmark**, ponte de auto-estrada, localizada em Ikast, Dinamarca, construída em 2001. As vigas da ponte, a plataforma e os pilares foram construídos utilizando madeira lamelada colada de abeto dinamarquês. O tabuleiro da ponte é constituído por dois pavimentos viários em quatro secções, cada uma com 55 m de comprimento, 3,5 m de largura e 2 m de altura e aproximadamente 50 toneladas de peso (Figura 4).

- ✓ **Passerelle de Vaires**, passagem pedonal aérea sobre linha de caminhos-de-ferro, localizada em Vaires-sur-Marne, França, construída em 2004. A passagem coberta com 75 m de comprimento, 49 m de vão e 9,4 m de largura constituiu à data a maior passagem deste género em França. Os arcos em madeira lamelada colada Douglas suportam uma passagem pedonal dupla, cada uma com 3 m de largura (Figura 5).

- ✓ **Centre Aquatique d'Agde**, centro aquático, localizado em Agde, França, inaugurado em 2008. A estrutura do edifício em madeira abrange 3000 m², tendo sido utilizados 200 m³ de madeira lamelada colada. As suas formas, devida em grande parte às condições aerodinâmicas, assemelham-se às de um inseto, tornando a estrutura de uma beleza inquestionável e que tornam bastante evidentes as capacidades e versatilidade da madeira lamelada colada enquanto material estrutural resistente e capaz de assumir

formas incomparáveis. Com uma altura de 18 m, a nave é composta por duas vigas curvas com 80 m de comprimento. As vigas principais são apoiadas por cerca de 300 vigas secundárias que ligam todo o muro de betão armado (Figura 6).

- ✓ **Centre Pompidou-Metz**, museu de arte moderna e contemporânea, localizado em Metz, França, inaugurado em 2010. A cobertura projetada pelos arquitetos Shigeru Ban e Jean de Gastines, japonês e francês respetivamente, é inspirada na forma de um chapéu chinês. A cobertura altamente complexa abarca uma área de 8500 m². É composta por uma estrutura realizada em madeira lamelada colada de alta resistência, na qual coexistem 1800 vigas todas diferentes, que sendo colocadas linearmente formariam uma linha com 15 km de comprimento. O ponto mais alto da cobertura atinge os 77 metros (Figura 7).

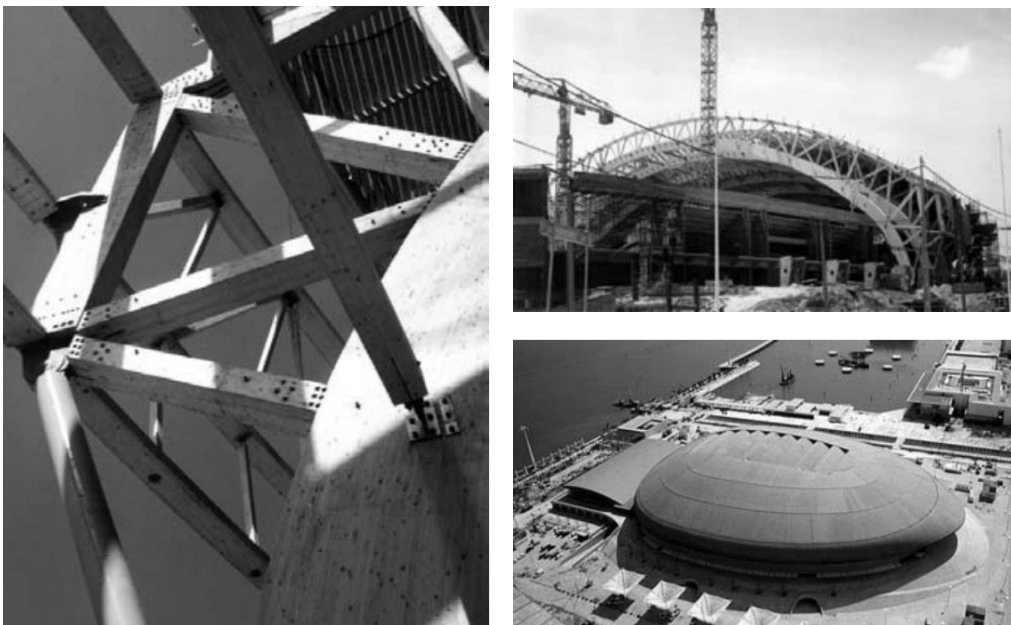


Figura 3: Pavilhão Atlântico no Parque das Nações, Lisboa, Portugal (Cruz 2007).



Figura 4: Ponte de autoestrada construída em Ikast, Dinamarca (<http://www.lilleheden.dk>).



Figura 5: Passerelle de Vaires, passagem pedonal aérea sobre linha de caminho-de-ferro, localizada em Vaires-sur-Marne, França (<http://fr.structurae.de>).



Figura 6: Centro Aquático de Agde, localizado em Agde, França (<http://www.glulam.org>).

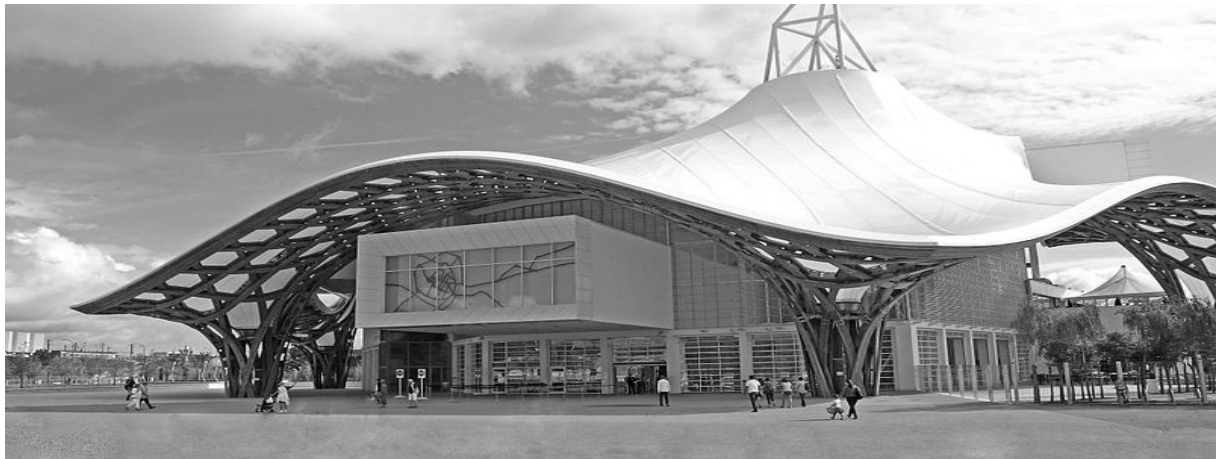


Figura 7: Centre Pompidou-Metz, museu de arte moderna e contemporânea, localizado em Metz, França (http://en.wikipedia.org/wiki/Centre_Pompidou-Metz).

2.2 Vantagens e desvantagens na sua utilização

2.2.1 Vantagens relativamente à madeira maciça

Comparativamente às madeiras maciças serradas, a madeira lamelada colada tem diversas vantagens nomeadamente nas dimensões que poderá ter, estética e classes de resistência.

Performance mecânica

Sendo um material que se torna leve e com relativa resistência, a madeira lamelada colada permite a realização de secções importantes, capazes de assegurar vãos bastante grandes. Além disso, a triagem dos defeitos, realizada durante o seu fabrico, melhora ainda mais o seu desempenho face à madeira maciça. Por exemplo, vãos de 40 m são comuns nos dias de hoje, podendo atingir 180 m com relativa facilidade.

Diversidade de formas e materiais

Tecnologicamente mais avançada do que a madeira maciça, a madeira lamelada colada é também um material moderno, mais contemporâneo, e com uma estética cada vez mais aprimorada. Correntemente, a madeira lamelada colada tem sido fabricada com base lamelas da mesma espécie e da mesma classe de resistência. Trata-se da madeira lamelada colada homogénea. No entanto, as vigas de madeira lamelada colada podem ser constituídas por um núcleo homogéneo (com madeira da mesma espécie e classe), reforçadas nas superfícies inferior e superior com lamelas de classe mais elevada uma vez que, de um modo geral, serão estas a suportar os esforços mecânicos mais elevados. Trata-se, neste caso, da madeira lamelada colada combinada (Figura 8).

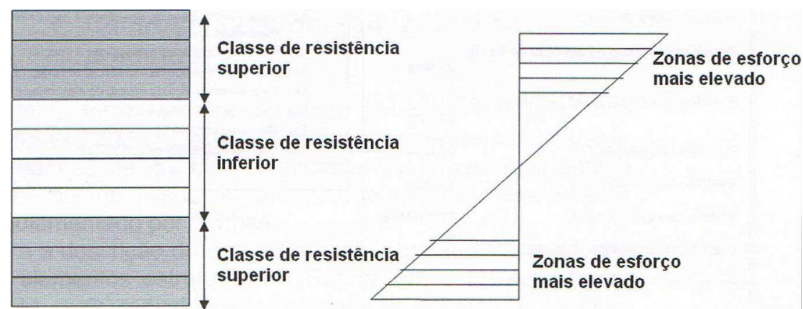


Figura 8: Disposição das lamelas em função do esforço (Negrão e Faria 2009).

As possibilidades de formas para os elementos de madeira lamelada colada são infinitas (Figura 9). As seções das vigas podem ser retangulares, circulares ou até mesmo variar de forma entre as suas extremidades, garantindo assim uma vantagem face a outros materiais. Deve notar-se no entanto que, tendo em consideração os desperdícios gerados, as formas mais simples são também as mais económicas.

Independentemente da secção, as vigas podem ser retas, curvas ou mistas, de acordo com as exigências do projetista. A diversidade destes elementos aliada à sua gama excecional de comprimento de vão, permite alargar a criatividade arquitetónica para patamares muito elevados. Não só os elementos permitem toda a audácia e segurança sob o ponto de vista resistência estrutural, como ainda, a estrutura torna-se numa verdadeira obra de arte sob o ponto de vista estético.

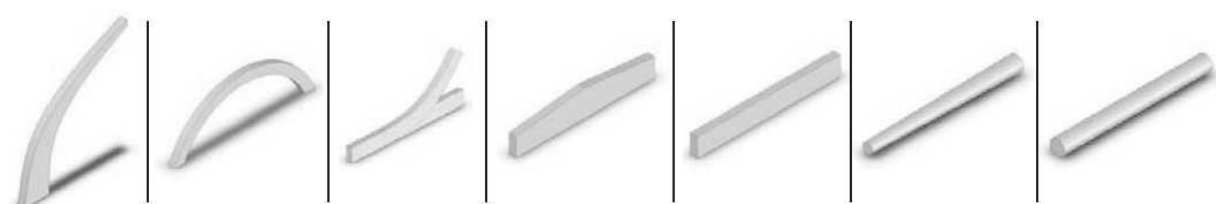


Figura 9: Exemplo de algumas formas possíveis de executar com madeira lamelada colada (<http://www.glulam.org>).

2.2.2 Vantagens relativamente ao betão e ao aço

Comparativamente a materiais como betão e aço, a madeira lamelada colada tem diversas vantagens nomeadamente na variação da secção transversal ao longo da peça, durabilidade e resistência e efeitos sobre o meio ambiente.

Performance mecânica

Termicamente a madeira lamelada colada é um material de excelência, uma vez que tem um coeficiente de condutibilidade térmica reduzido, o que diminui ainda a dilatação térmica. As suas características mecânicas são muito pouco alteradas em função da temperatura. Nesse sentido, a variação da dimensão na direção axial (do fio), é perfeitamente desprezável consoante a variação do teor de água.

Durabilidade e resistência

Uma grande vantagem da madeira lamelada colada é facto do seu comportamento face ao fogo ser previsível. Isso faz com que seja um material seguro e aconselhável para, entre outros, ser utilizado na construção de edifício abertos ao público. De forma resumida, durante um incêndio, a carbonização das vigas cria uma barreira superficial que retarda a combustão, uma vez que o carvão gerado à superfície apresenta uma baixa condutibilidade térmica. Além disso os fumos libertados durante a combustão não são tóxicos.

Face a materiais estruturais com aço e betão armado, as estruturas de madeira lamelada colada têm uma durabilidade muito superior. Durante a sua fabricação, são aplicados tratamentos e acabamentos em função da sua utilização (interior aquecido, exterior abrigado, exterior exposto, etc), que proporcionam um acréscimo de resistência a agentes biológicos que se podem desenvolver em situação de presença de humidade e exposição a radiação ultravioleta.

Por outro lado, é ainda um material que se comporta muito favoravelmente face a ambientes agressivos (sais, ácidos, bases) o que permite que este material esteja perfeitamente adaptado à utilização em instalações industriais ou de armazenamento, o que exclui muitos outros tipos de material de construção. Salinas, hangares de sais, armazéns de potássio, fertilizantes ou nitrato, docas portuárias, lixeiras, enxofre, galvanização, anodização, entre tantos outros, estão perfeitamente dentro do domínio de aplicabilidade deste material.

Diversidade de formas e materiais

O baixo peso obtido com a utilização deste tipo de estruturas oferece também maior facilidade de montagem, desmontagem e possibilidade de ampliação. Além disso, o peso próprio sendo menor, se comparado com outros materiais, pode significar economia nas fundações.

Qualidade ambiental

Outro aspeto a ter em consideração é a questão da reciclagem. Por um lado, a durabilidade intrínseca da madeira lamelada colada alarga o período de vida de uma determinada construção, uma virtude que evita a sua substituição e limita as despesas com novas matérias-primas. Por outro lado, a madeira lamelada colada apresenta como grande vantagem face a materiais como o betão armado, a possibilidade de poder ser reciclada ou valorizada (reutilização de vigas em novas estruturas ou fabricação de painéis de partículas).

2.2.3 Desvantagens na sua utilização

Como qualquer outro tipo de material, a madeira lamelada colada apresenta ainda assim algumas desvantagens na sua utilização enquanto material estrutural, face a materiais como o betão armado ou o aço. De seguida são enumeradas algumas dessas desvantagens:

- ✓ O transporte dos elementos estruturais pode ser uma desvantagem. Embora comum a qualquer tipo de estrutura pré-fabricada, no caso da madeira lamelada colada poderá ser uma situação ainda mais gravosa devido sobretudo às formas que as peças podem tomar, mas também devido ao seu tamanho, que muitas vezes é ainda superior ao de elementos em aço ou betão armado.
- ✓ Estruturalmente, a dificuldade de transporte dos elementos pode condicionar o sistema estrutural a adotar. Muitas vezes acaba por se dimensionar as estruturas com mais rótulas do que o que seria necessário, aumentando os esforços devidos a momentos a meio vão, com subsequente aumento da secção da peça. No entanto, a densidade baixa deste material reduz o peso próprio da estrutura e os esforços aplicados a nível das fundações. O menor peso é ainda uma vantagem no transporte dos elementos, em contraponto com as dimensões e formas mencionadas no ponto anterior.
- ✓ O custo associado a este tipo de material é, ainda, uma grande desvantagem. Geralmente, é correto admitir que o custo é superior comparativamente com outros materiais. Ainda assim, deve ser feita uma análise do custo global da estrutura. Se por um lado a superestrutura pode ser mais dispendiosa, a subestrutura (fundações) é certamente mais económica.
- ✓ A durabilidade do material é também um aspeto que pode ser algumas vezes colocado em causa, sobretudo devido a algumas más experiências vivenciadas no passado, designadamente relativas a aplicações de madeira não tratada cuja durabilidade natural não é suficiente para a exposição a que está sujeita. Ainda assim, o avanço tecnológico

tem sido notório também nesse aspeto. Hoje é em dia possível admitir um ciclo de vida igual ou superior a 50 anos, tratando devidamente a madeira em fase de fabrico.

2.3 Processo de fabrico

2.3.1 A madeira

De acordo com Pontífice de Sousa (1990), as espécies de madeira mais utilizadas no fabrico de estruturas lameladas-coladas na Europa, são: o espruce (*Picea abies*), o abeto (*Abies alba*), a casquinha (*Pinus sylvestris*) e a pseudotsuga (*Pseudotsuga menziessi*). No Quadro 2.1 podemos observar algumas características dos tipos de madeira mais utilizadas, colocando em destaque o espruce (*Picea abies*), o tipo de madeira utilizada no âmbito deste trabalho.

Quadro 2.1 – Características das principais espécies usadas em madeira lamelada-colada* (Gaspar 2005).

Característica	Pinho bravo ¹	Casquinha ²		Espruce ³	Pseudotsuga ⁴	Pitespaine ⁵
		Redwood	Scots pine			
Densidade (kg/m ³)	530 - 600	400	530	450	460 - 500	510 - 590
Retração total (%)	Radial	4,9	2,6	4,1	4,2	3,8 - 4,8
	Tangencial	8,6	4,6	7,9	9,4	6,9 - 7,6
	Volumétrica	14,2	7,0	12,7	14,2	10,7 - 12,4
Flexão estática	Tensão de rotura	98,4	69	98	75	82 - 90
	Módulo de elasticidade (N/mm ²)	13800	9250	11760	10500	10300 - 13400
Compressão axial - tensão de rotura (N/mm ²)	47,3 - 57	42	54	39	43 - 51,2	48,2 - 58,4
Tração transversal - tensão de rotura (N/mm ²)	3	1,7	2,9	2,2	2,3 - 2,7	3,2
Tração axial - tensão de rotura (N/mm ²)	89,4**	-	102	90	107,6	80
Corte - tensão de rotura (N/mm ²)	10,2	1,5	9,8	-	7,8 - 10,4	9,6 - 11,6

* - Valores médios referidos ao teor de água de 12%

** - Valor obtido de madeira seca ao ar, mas sem correção para a humidade de 12%

1 - Fonte: Mateus (1961)

2 - Fonte: Machado, J. Saporiti et al. (1997)

3 - Fontes: Carvalho (1996); http://www.storaenso.no/CDAvgn/main/0,,1_-4705-5754-,00.html

4 - Fonte: FPL - Wood Handbook (1999)

5 - Fonte: FPL - Wood Handbook (1999). Valores referidos para o conjunto das 4 espécies designadas por "Southern Pine", à exceção da tensão de rotura à tração que foi obtida para apenas uma delas.

Além das características mecânicas da madeira de espruce mencionadas no Quadro 2.1, refere-se ainda que este tipo de madeira provém na sua grande maioria do continente europeu.

É muito utilizada em estruturas de madeira lamelada colada, quer no interior quer no exterior, neste último caso com tratamento de proteção adequado.

Atualmente, os fabricantes estão bastante atentos à proveniência da madeira para minimizar os custos com o transporte e para assegurar uma boa gestão das florestas. Por exemplo, em França, 98% da madeira utilizada para o fabrico de madeira lamelada colada é proveniente de florestas francesas ou europeias e são, a esse respeito, oriundas de florestas geridas de forma sustentável.

Somente as espécies que apresentam as características requeridas (propriedades mecânicas, teor de água, classe de utilização), são utilizadas no fabrico de madeira lamelada colada. As espécies que geralmente são utilizadas em obra são as Resinosas, como o abeto, o espruce, o pinho silvestre e o abeto, sobretudo devido a duas questões essenciais. Por um lado a colagem entre lamelas é mais eficaz relativamente às de espécie Folhosa e, por outro, o seu valor comercial é inferior.

As espécies Folhosas têm algumas características vantajosas face às espécies Resinosas, nomeadamente em relação à durabilidade natural da madeira que é superior. No entanto, a sua utilização levanta sérios problemas relativamente ao nível da colagem e do desempenho do produto colado.

2.3.2 A cola

Segundo Gaspar (2006), na sua essência, as colas podem ser constituídas por:

- ✓ **Ligantes** – componente principal da cola, confere a propriedade de adesão necessária e dele resultam as principais propriedades da cola. São usualmente polímeros de origem natural ou sintética, sendo os últimos os mais utilizados atualmente.
- ✓ **Solventes** – com a função de dissolver as colas, agem com portadores do polímero, auxiliam na molhagem, controlo da fluência e penetração da cola na madeira. Podem ser de origem orgânica mas usualmente é utilizada a água, por ser mais económica e de baixa toxicidade.
- ✓ **Catalisadores** – retardadores ou aceleradores, são utilizados com o objetivo de alterar a velocidade de reação dos componentes poliméricos da cola. Os catalisadores são no entanto consumidos na fase de reação, não fazem portanto parte do composto final.

- ✓ **Endurecedores** – que segundo a norma NP 3672 (1990) são substâncias que iniciam e/ou regulam a reação de reticulação das colas. São adicionadas como componente reativa ao polímero base da cola, fazendo neste caso parte do composto final.
- ✓ **Cargas** – de modo geral são substâncias inertes sob o ponto de vista químico, adicionadas à cola com o intuito de alterar as suas características.
- ✓ **Aditivos** – que, de acordo com a norma NP 3672 (1990) podem ser adicionadas em proporção reduzida como forma de melhorar ou modificar determinadas propriedades da cola.

As colas utilizadas no fabrico das peças de madeira em estudo (MUF e PRF), são colas à base de formaldeído, formadas pela reação deste com vários produtos químicos, resultando as colas dos tipos (Grunwald em *COST Action E13-working group 1*, 2002):

- ✓ **Aminoplastos** – ureia-formol (UF), melamina-ureia-formol (MUF) e melamina-formol (MF) (não utilizada por razões de ordem económica);
- ✓ **Fenoplastos** – fenol-formol (PF), resorcinol-formol (RF) e fenol-resorcinol-formol (PRF);
- ✓ **Misturas** – fenol-ureia-formol (PUF) e melamina-ureia-fenol-formol (MUPF).

De acordo com Gaspar (2006), as colas de fenol-formol foram as primeiras a ser introduzidas no mercado. As qualidades principais das colas de resorcinol são essencialmente a sua durabilidade e a baixa temperatura de cura (é possível que a cura seja realizada à temperatura ambiente). Por outro lado, o seu custo elevado devido à presença de resorcinol é uma desvantagem evidente e nesse particular, as colas do tipo fenol-resorcinol-formol (PRF) são preferíveis face às colas de resorcinol-formol, porque têm uma durabilidade idêntica com um custo mais reduzido. A utilização deste tipo de cola permitiu obter elementos estruturais com durabilidade superior à madeira. Em fase de serviço, a exposição a ambientes exteriores com largos períodos de humedecimento e secagem não afeta significativamente estes tipos de colas, e também não são afetadas pela presença de fungos ou térmitas. Além disso, as ligações efetuadas com estes tipos de colas não se separam quando expostas ao fogo.

As colas de melamina-ureia-formol (MUF) curam com a adição de calor a temperaturas mais baixas que as colas de fenol, sendo também mais económicas que as colas de melamina-formol e resorcinol-formol. Além disso, a junta de colagem final apresenta uma cor clara, o que tem sido foco de grande apreciação por muitos utilizadores. Por esse aspeto em particular,

este tipo de cola tem tido uma crescente preferência na sua utilização face a outros tipos de cola.

Trata-se acima de tudo de produtos com vocação estrutural, que respondem prioritariamente às exigências de estabilidade e fiabilidade. A norma EN 301 (1992) define, em termos de durabilidade, dois tipos de cola de acordo com o seu desempenho:

- ✓ **Tipo I:** capaz de resistir a todas as exposições exteriores e a temperaturas superiores a 50 °C ou humidade relativa superior a 85%.
- ✓ **Tipo II:** para utilização interior em ambiente aquecido e ventilado ou no exterior, abrigada, e com uma temperatura acima dos 50°C apenas ocasional e humidade relativa abaixo de 85% (a 20°C).

Em termos ambientais, a cola não representa mais do que 1/500 da superfície emissiva de uma viga em madeira lamelada colada. A proporção é de facto pequena, e a emissão de COVs² ainda mais reduzida. Nos últimos 20 anos tem sido realizado um trabalho importante no sentido de minimizar a poluição e posicionar a madeira lamelada colada sobre um terreno ambientalmente pró-ativo. Têm sido desenvolvidas colas cada vez com menor taxa de emissividade ao ponto de, colas sem formaldeído na sua constituição, poderem atualmente entrar na composição dos elementos de madeira lamelada colada. Hoje em dia, todos os elementos respondem, no mínimo, aos requisitos impostos pela classe de emissão europeia E1³. Alguns elementos conseguem mesmo passar os testes exigidos pelo protocolo Francês AFSSET, muito além das atuais exigências em termos de emissões de Compostos Orgânicos Voláteis (COVs). Este protocolo foi criado em 2009. Trata-se de um procedimento para qualificação de emissões de Compostos Orgânicos Voláteis de materiais de construção e produtos para decoração com três objetivos essenciais:

1. Fornecer informações sobre estes produtos em comparação com os limites de concentração a fim de promover os produtos considerados "de baixa emissividade";
2. Apenas a exposição crónica por inalação às substâncias emitidas pelos materiais é tida em consideração. Os compostos analisados são os COV, o formaldeído e alguns outros compostos carbonilados;

² COVs, Compostos Orgânicos Voláteis, são compostos orgânicos que possuem alta pressão de vapor sob condições normais a tal ponto de vaporizar significativamente e entrar na atmosfera.

³ Na Europa só podem ser utilizados em espaços interiores materiais pertencentes à classe de emissão E1 (3,5 mig/m²h). Os materiais que causam emissões de formaldeído mais elevadas para o ar ambiente são proibidos, a fim de evitar riscos para a saúde (risco de cancro) dos utilizadores e habitantes.

3. Rejeitar qualquer produto de construção que pode induzir uma exposição a compostos voláteis cancerígenos (C1 ou C2) e/ou mutagénicos (M1 ou M2);
4. Informar as pessoas com reações alérgicas, que estão na presença de substâncias classificadas “sensibilizadores respiratórios”.

2.3.3 Processo de fabrico

Fase 1: Receção da madeira e união entre lamelas

A primeira tarefa compreende a receção da madeira, a sua classificação visual, a secagem e a eliminação dos grandes defeitos. A secagem tem como objetivo estabilizar a madeira conduzindo o seu teor de água ao nível requerido para o fabrico (8 a 15% para madeira não tratada e 11 a 18% para madeira tratada). A classificação inicial deve compreender a verificação da espessura dos anéis de crescimento da madeira, da inclinação das fibras em relação às arestas laterais da lamela e do diâmetro dos nós. A espessura de cada lamela depende do raio de curvatura a ser empregue, ou seja, quanto maior o raio de curvatura menor é a necessidade utilizar uma lamela de pequena espessura.

Após a fase da eliminação dos defeitos, as lamelas são cortadas e unidas pelo topo, de forma a obter os comprimentos requeridos. A união das lamelas pode ser efetuada topo-a-topo, através de entalhes múltiplos (*fingerjoints*) ou em bisel (Figura 10).

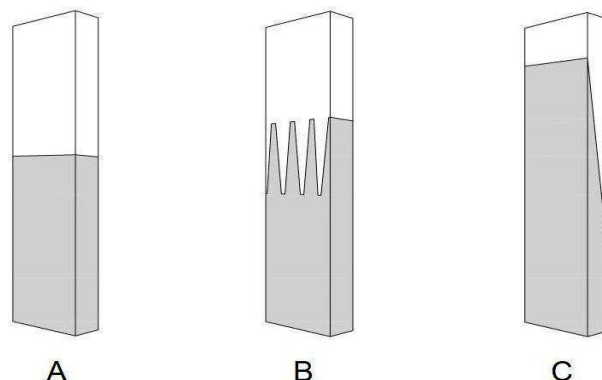


Figura 10: Ligações de topo: A – Ligação topo-a-topo; B – Ligação de entalhes múltiplos (*fingerjoints*); C – Ligação em bisel (Gaspar 2006a).

A pressão aplicada nesta fase da união de topo das lamelas é cerca 4 a 12 MPa. Durante esta operação, a temperatura da madeira deve ser superior ou igual a 15°C.

Fase 2: Aparelhamento das faces das lamelas

Após a ligação de topo as lamelas são aplainadas no máximo até 24 horas antes da colagem. O desvio máximo admissível em relação à espessura média, num comprimento de um metro de lamela, é de 0,2 mm. Para as colas Ureia-Formol não alteradas, este valor deve ser inferior a 0,1 mm.

Fase 3: Colagem

De seguida vem a fase da composição dos elementos. As lamelas são coladas individualmente topo a topo antes de serem sobrepostas e depois prensadas. Atualmente, a colagem é realizada com recurso a máquinas especiais de colagem de cortina ou de rolos (Figura 11), que permitem uma repartição mais uniforme da cola sobre toda a face da lamela. Este tipo de maquinaria permite ainda controlar e automatizar o ritmo da colagem, acelerando ou desacelerando consoante a situação e de acordo com o preconizado.

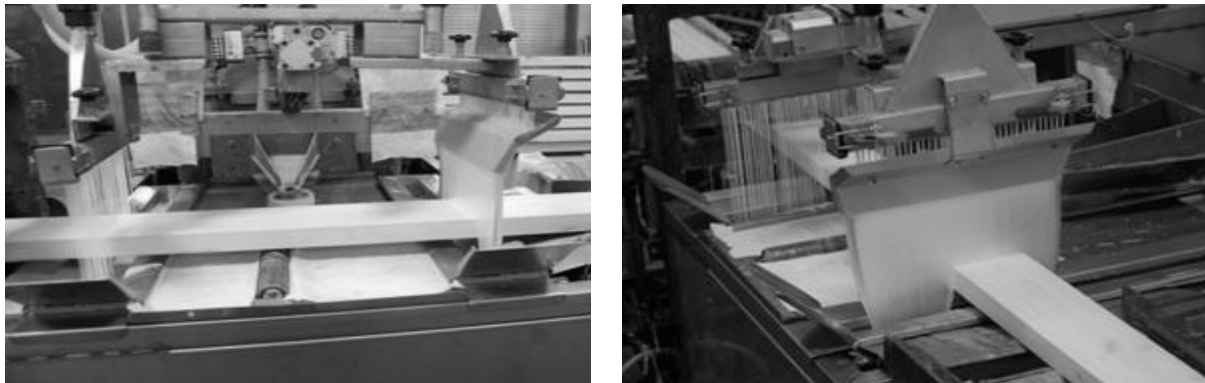
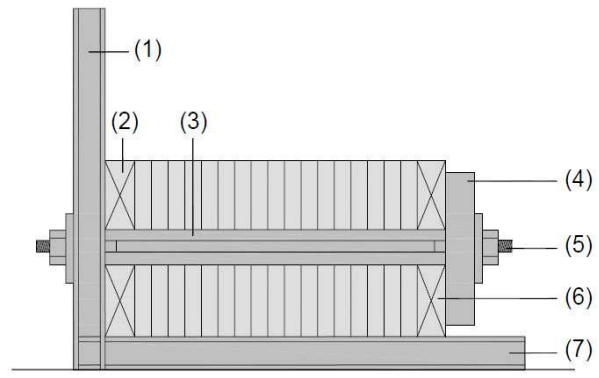
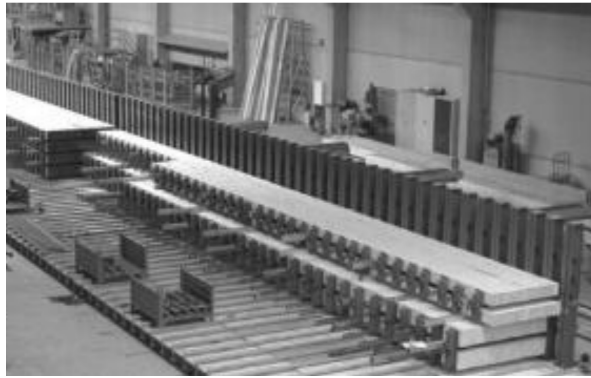


Figura 11: Processo de aplicação da cola na face das lamelas com máquina de cortina. São aplicados a cola e o endurecedor (<http://philippe.berger2.free.fr>).

Fase 4: Aperto das lamelas

Esta etapa tem como função manter as peças coladas com a pressão pretendida e na forma desejada, durante o tempo de cura da cola. Este tempo é variável em função do tipo de cola aplicada, da temperatura e do teor de água do ar ambiente e do modo de aquecimento.

A pressão mínima para os diferentes tipos de cola geralmente aplicada depende da espessura da lamela, variando entre 0,6 MPa para lamelas de pequena espessura até 0,8 a 1 MPa para lamelas de maior espessura. Os sistemas de prensagem hidráulica (Figura 12), as hastes roscadas ou os blocos de aperto permitem manter esta pressão durante a fase de cura da cola.



Apoio vertical; (2) Prancha distribuidora de pressão; (3) Espaçador; (4) Bloco de compressão; (5) Parafuso de tensão; (6) Prancha distribuidora de pressão; (7) Apoio horizontal.

Figura 12: Dispositivo hidráulico para aplicação da pressão de aperto sobre as lamelas à esquerda (<http://www.glulam.org>) e esquema ilustrativo à direita (Gaspar 2006a).

Fase 5: Aparelhamento e acabamento

A fase final do processo de fabrico compreende o acabamento do elemento estrutural. Nesta etapa, a peça é aplainada lateralmente, cortadas as extremidades para dar a sua forma final e são realizadas as furações e entalhes necessários para as ligações entre peças e também entre o elemento de madeira lamelada colada e o apoio.

Após esta preparação inicial, são aplicados os tratamentos e acabamentos de forma a assegurar a durabilidade esperada e obter a estética (textura, cor, aspeto) desejada pelo cliente. Deve destacar-se a substituição sistemática dos produtos de tratamento e acabamento solventes com produtos à base de água, limitando assim as emissões de COVs e melhorando as condições de trabalho.

2.3.4 Ensaios em fase de produção

Em fase de fabrico da madeira lamelada colada, os elementos são sujeitos a dois tipos de ensaio que, de forma abreviada, serão descritos de seguida.

Ensaios de flexão sobre as uniões de topo entre lamelas

O tipo de rotura associado aos elementos de madeira lamelada colada é do tipo frágil, com início na zona tracionada das peças. Nesse sentido, zonas tracionadas onde existam defeitos, tais como nós e bolsas de resina, ou zonas de ligação de topo entre lamelas (topo-a-topo, entalhes múltiplos, bisel), são ainda mais suscetíveis a esse tipo de rotura. Assim, o

comportamento das ligações de topo reveste-se de especial importância para a resistência global do elemento estrutural e por isso são submetidas a ensaio em fase de produção.

Os ensaios de flexão sobre as uniões de topo entre lamelas destinam-se então a determinar a sua resistência à flexão e são executados de acordo com o especificado na norma europeia EN 408 (2003). Esta norma propõe aliás, a realização de dois tipos de ensaio, à flexão e à tração, mas por questões de facilidade de ensaio, o ensaio à flexão é o mais utilizado e por isso aquele que será abordado de seguida.

Recolha e preparação das amostras

As amostras submetidas a ensaio são retiradas com uma frequência de 1 em cada 2000 m lineares de elemento produzido e só podem ser ensaiadas após 72 horas de secagem, no mínimo, conforme definido pela norma EN 385 (2001).

O provete de ensaio deverá possuir, no mínimo, um comprimento igual a 19 vezes a espessura da lamela e as dimensões da seção transversal devem ser as das lamelas utilizadas na madeira lamelada colada que compõe o lote. Cada provete deve conter uma ligação de topo a meio do comprimento e ser livre de defeitos na metade central do seu comprimento, sem grandes defeitos nas extremidades remanescentes.

Procedimento de ensaio

O provete de ensaio deverá ser carregado simetricamente à flexão em dois pontos situados ao longo de um comprimento igual a 18 vezes a espessura da lamela, correspondente à distância entre os apoios (o provete deve ser simplesmente apoiado). O ponto de aplicação das cargas deverá ficar situado a uma distância igual a 6 vezes a espessura da lamela (ou seja, a 1/3 do comprimento entre apoios), conforme se apresenta na Figura 13. Se, por algum motivo, o provete de ensaio ou o próprio equipamento não permitirem que estas condições sejam exatamente satisfeitas, a distância entre os pontos de carga e os pontos de apoio deve ser alterada numa relação igual ou inferior a 1,5 vezes a espessura da lamela. Além disso, quer o vão entre apoios quer o comprimento do provete podem também ser modificados numa relação igual ou inferior a 3 vezes a espessura da lamela, mantendo, contudo, a simetria do ensaio (Figura 14).

Relativamente a este ensaio, a norma define ainda algumas particularidades que devem ser tidas em consideração, nomeadamente:

1. De forma a minimizar o esmagamento local da madeira por ação das cabeças de aplicação da carga, podem ser inseridas entre o provete de ensaio e as cabeças de carregamento ou apoios, pequenas placas de aço com comprimento não superior a metade da espessura da lamela;
2. Pode ser aplicado um meio de restrição de movimento lateral para prevenir fenómenos de encurvadura lateral do provete de ensaio. Esta restrição deverá, no entanto, permitir que a peça possa defletir sem qualquer resistência significativa devida ao atrito;
3. O equipamento de carga utilizado deverá ser capaz de medir a carga com uma precisão de 1% da carga aplicada ao provete de ensaio;
4. A carga deve ser aplicada num movimento de carregamento constante, de tal modo que a carga máxima ($F_{máx}$) seja atingida em 300 ± 120 segundos;
5. Esta carga deve ser determinada a partir dos resultados de ensaios preliminares. O objetivo é que o tempo para alcançar $F_{máx}$ de cada provete seja de 300 segundos;
6. O tempo que decorre até à rotura do elemento deverá ser registado e determinada a média. Qualquer peça que apresente uma divergência superior a 120 segundos do limite de 300 segundos definidos pela norma, deve ser também registada.

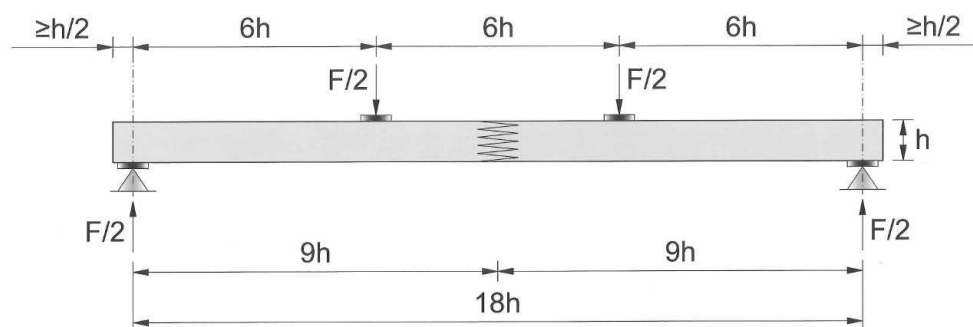


Figura 13: Esquema do ensaio de flexão sobre uniões de topo entre lamelas.

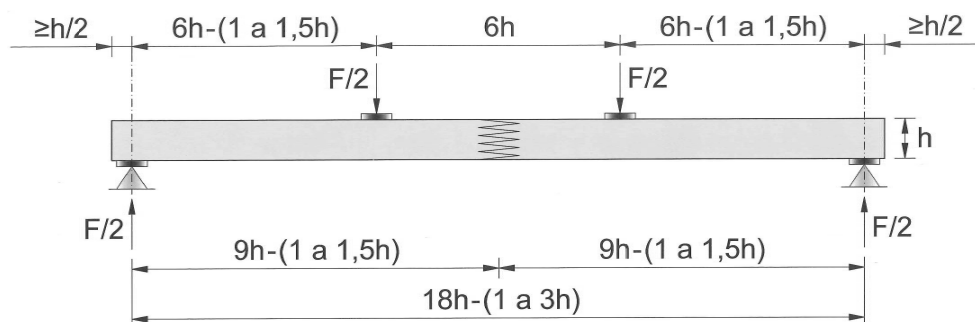


Figura 14: Esquema do ensaio de flexão sobre uniões de topo entre lamelas, caso as condições do provete de ensaio definidas na norma EN 408 (2003) não sejam cumpridas.

Na Figura 15 podemos visualizar o equipamento de ensaio utilizado para a realização dos ensaios de flexão e corte.

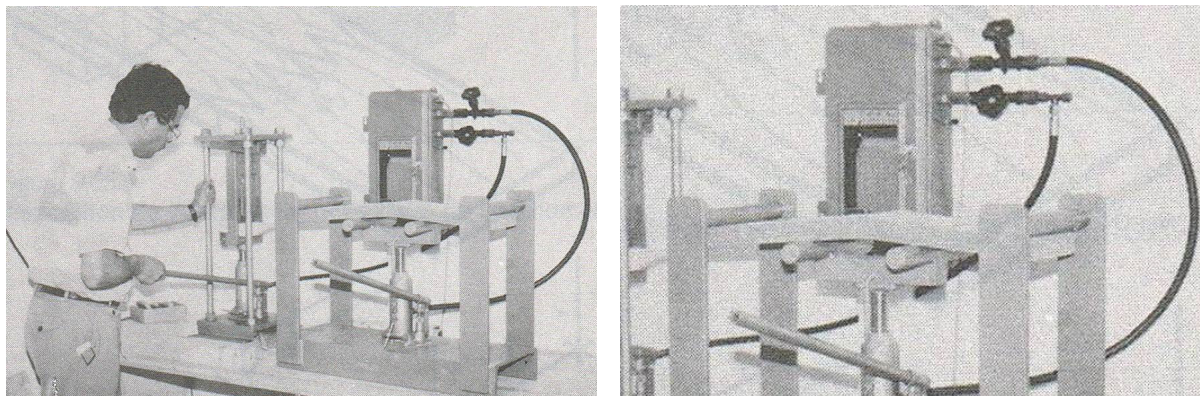


Figura 15: Controlo de qualidade da produção através do ensaio de corte (à esquerda) e flexão (à direita) sobre uniões de topo entre lamelas (Marchand et al. 1989).

O número de provetes testados por ensaios varia entre um mínimo de 10 e um máximo de 15. O ensaio é considerado conforme se cada valor de rutura individual for igual ou superior ao valor requerido para a classe de madeira em causa ou se o valor característico do lote testado está em conformidade. Da experiencia obtida neste tipo de ensaios, constata-se de uma forma geral que a rotura do conjunto ocorre no primeiro ponto fraco da madeira, geralmente num nó, e raramente sobre a junção entre lamelas.

Ensaio de delaminação das juntas coladas

Os ensaios de delaminação executados em fase de fabrico destinam-se a controlar a integridade das juntas coladas dos elementos de madeira lamelada colada após envelhecimento, e são executados de acordo com o especificado na norma europeia EN 391 (2001).

A incidência destes ensaios deve ser tida em conta muito seriamente, pois se o produto é desclassificado, existe uma grande probabilidade da causa do problema estar associada à cola. É necessário recordar que, para além da amostra da viga ensaiada, todos os elementos realizados com a mesma cola deverão também ser desclassificados. O controlo da colagem é por conseguinte preponderante e um dos aspetos que jamais pode ser descurado. É o garante do bom funcionamento do conjunto em fase de serviço.

O princípio subjacente a este ensaio é definido na norma EN 391 (2002) e baseia-se na introdução de um gradiente de teor de água para gerar tensões internas na madeira. A introdução deste gradiente hidráulico irá originar um conjunto de tensões de tração perpendiculares à junta de colagem de modo que a qualidade inadequada da ligação resulte na delaminação das linhas da colagem.

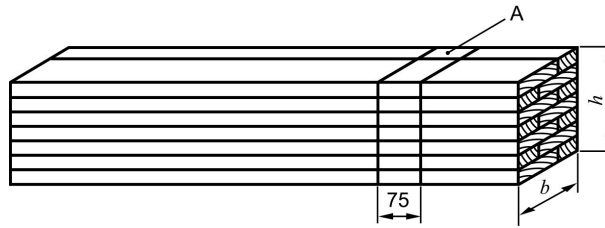
Para a realização do ensaio é necessário um recipiente de pressão concebido para suportar com condições de segurança uma pressão de, pelo menos, 600 kPa (700 kPa de pressão absoluta) e um vácuo de pelo menos 85 kPa (15 kPa de pressão absoluta). O recipiente deverá estar equipado com bomba ou dispositivo similar, capaz de aplicar pressão ou vácuo com a mesma intensidade referida (600 kPa de pressão e 85 kPa de vácuo).

É necessário ainda uma estufa de secagem, onde o ar circula a uma velocidade de 2 a 3 m/s, com uma temperatura e humidade relativa conforme indicado no Quadro 2.2, uma balança capaz de determinar a massa com uma precisão de 5 g e uma lupa para marcação da delaminação observada.

Quadro 2.2 – Condições de temperatura e humidade relativa na condução de secagem para os diferentes métodos de ensaio (EN 391-2002).

	Método		
	A	B	C
Temperatura [°C]	60 a 70	65 a 75	25 a 30
Humidade relativa [%]	< 15	8 a 10	25 a 35

Uma secção transversal de uma viga é retirada a cada 20 m³ de material produzido. A amostra deverá ter (75 ± 5) mm na dimensão paralela ao fio da madeira, sendo as restantes dimensões função da dimensão da secção transversal. A retirada da amostra deve ocorrer, no mínimo, a 150mm da extremidade da viga. Da extremidade da viga até este limite os provetes não são geralmente representativos, dadas as particularidades dos sistemas de aplicação da pressão de aperto. Se a largura *b* da secção transversal for superior a 300 mm ou a altura *h* superior a 600 mm, o teste pode ser dividido em dois ou mais provetes, com largura mínima de 130 mm e altura mínima de 300 mm respetivamente (Figura 16).



(A) Provede de ensaio; (b) Largura da secção transversal; (h) Altura da secção transversal.

Figura 16: Amostra para ensaio extraída a partir de um elemento de madeira lamela colada (EN 391-2002). Os ensaios de delaminação das juntas coladas de madeira lamelada colada podem ser realizados segundo três métodos, a saber, o Método A, B e C. Os três métodos são realizados de acordo com o prescrito pela norma EN 391 (2002) e diferem sobretudo no tempo de aplicação de vácuo e pressão numa fase inicial e posteriormente nos tempos de secagem em estufa conjugados com maior ou menor temperatura e humidade relativa do ar.

2.4 Características da madeira lamelada colada

2.4.1 Características físicas

A madeira lamelada colada distingue-se, entre outros, por uma relação desempenho / massa particularmente interessante, como já foi, aliás, mencionado anteriormente. Leve e paralelamente resistente, permite a realização de seções importantes, capazes de assumir vãos muito longos. Além disso, é um material cujo coeficiente de condutibilidade térmica é muito baixo, o que contribui para o desempenho global térmico das construções, limitando as pontes térmicas, um dos graves problemas ao qual se tem dado bastante importância nos últimos anos no nosso país. Por fim, o controlo da humidade relativa da madeira lamelada colada é uma garantia de estabilidade dimensional, assegurada por um coeficiente de retração conhecido e controlado.

Menciona-se de seguida algumas das principais características físicas da madeira lamelada colada:

- ✓ Massa volúmica (densidade) do Abeto e Espruce (duas das espécies de madeira mais utilizadas), com 15% de humidade relativa: entre 400 e 500 kg/m³;
- ✓ Coeficiente de condutibilidade térmica (λ): 0,12 W/m°C;
- ✓ Coeficiente de retração radial / tangencial por % de variação de humidade relativa: 0,25%
- ✓ Coeficiente de retração longitudinal: desprezável;
- ✓ Resistência corrente à flexão: de 24 a 30 MPa.

2.4.2 Características mecânicas

As cargas que uma estrutura de madeira lamelada colada pode suportar estão diretamente ligada ao desempenho mecânico das lamelas de madeira que compõem cada elemento estrutural. Por razões de ordem prática, a madeira lamelada colada é caracterizada por uma classificação de desempenho mecânico, determinando as características de resistência do material e as suas propriedades associadas.

As classes de resistência da madeira lamelada colada são determinadas a partir das classes de resistência das lamelas que a compõem, de acordo com o prescrito na norma NP EN 1194 (2002): *Estruturas em madeira – madeira lamelada colada – classes de resistência e determinação dos valores característicos*.

No Quadro 2.3 podemos observar as classes de resistência das lamelas para madeira lamelada colada e a sua relação com as classes da madeira lamelada colada homogénea.

Quadro 2.3 – Exemplos da constituição de vigas de acordo com os requisitos da norma NP EN 1194 (2002) (Gaspar 2006a).

Tipo madeira lamelada-colada	Classe de resistência da madeira lamelada-colada		
	GL24	GL28	GL32
	Classes de resistência das lamelas de madeira segundo a norma EN 338		
Homogénea	C24	C30	C40
Combinada	C24/C18	C30/C24	C40/C30

Esta classificação permite conhecer o conjunto das características mecânicas, em particular as diferentes resistências da madeira lamelada colada. Assim, de acordo com a classe, são determinadas as resistências à flexão, à tração (axial e transversal), à compressão (axial e transversal) e ao corte. A massa volúmica, o módulo de elasticidade axial médio e o módulo de distorção médio são igualmente conhecidos. Estas informações permitem obter um material em conformidade com a sua utilização futura.

A classe da madeira lamelada colada apresenta-se sob a forma de duas letras GL (Glulam), seguidas de um número que indica o valor característico da resistência à flexão e por fim uma letra que indica se a madeira lamelada colada é homogénea (letra h) ou combinada (letra c).

As propriedades mecânicas, além da resistência à flexão, podem ser deduzidas desta classificação. Por exemplo, a madeira lamelada colada classificada com “GL 24 h”, é uma madeira lamelada colada homogénea com uma resistência à flexão de 24 MPa.

No Quadro 2.4 indicam-se os valores característicos das propriedades associadas a cada classe resistente.

Quadro 2.4 – Classes de resistência da madeira lamelada-colada e respetivas propriedades (NP EN 1194-2002).

Propriedade		Madeira lamelada-colada homogénea				Madeira lamelada-colada combinada			
		GL24h	GL28h	GL32h	GL36h	GL24c	GL28c	GL32c	GL36c
Flexão (N/mm^2)	$f_{m,g,k}$	24	28	32	36	24	28	32	36
Tração (N/mm^2)	$f_{t,0,g,k}$	16,5	19,5	22,5	26	14	16,5	19,5	22,5
	$f_{t,90,g,k}$	0,4	0,45	0,5	0,6	0,35	0,4	0,45	0,5
Compressão (N/mm^2)	$f_{c,0,g,k}$	24	26,5	29	31	21	24	26,5	29
	$f_{c,90,g,k}$	2,7	3,0	3,3	3,6	2,4	2,7	3,0	3,3
Corte (N/mm^2)	$f_{v,g,k}$	2,7	3,2	3,8	4,3	2,2	2,7	3,2	3,8
Módulo elasticidade (N/mm^2)	$E_{0,g,médio}$	11600	12600	13700	14700	11600	12600	13700	14700
	$E_{0,g,05}$	9400	10200	11100	11900	9400	10200	11100	11900
	$E_{90,g,médio}$	390	420	460	490	320	390	420	460
Módulo de distorção (N/mm^2)	$G_{g,médio}$	720	780	850	910	590	720	780	850
Massa volúmica (kg/m^3)	$\rho_{g,k}$	380	410	430	450	350	380	410	430

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Degradação e avaliação de estruturas de madeira

3.1 Degradação de estruturas em serviço

3.1.1 Causas e efeitos do envelhecimento sobre estruturas de madeira lamela colada

Neste capítulo abordam-se as causas do aparecimento de defeitos em estruturas de madeira lamelada colada, situações que advêm do envelhecimento natural das estruturas e situações que aceleram esse processo, capazes de induzir ao longo do tempo efeitos prejudiciais, visíveis e não visíveis, excluindo naturalmente situações acidentais. Existem três temas essenciais que convém abordar, nomeadamente:

- ✓ Utilização de material com durabilidade insuficiente;
- ✓ Ligações: conceção, execução;
- ✓ Omissão ao nível do controlo da tração transversal nas peças.

Utilização de um material com durabilidade insuficiente

Grande parte da madeira utilizada na conceção de elementos de madeira lamelada colada necessita de um tratamento de preservação. Em função da sua classe de serviço, este tipo de estrutura pode estar mais ou menos exposta aos agentes atmosféricos. Um dos elementos que maior número de patologias causa a este tipo de material é a água. Assim, elementos estruturais concebidos para uma utilização interior em edifícios, não devem em qualquer circunstância estar expostos diretamente à água em estado líquido, mesmo se em situações locais isoladas, sob pena dos elementos humedecerem criando condições para o desenvolvimento de fungos lignívoros.

Situações como beirados de telhado insuficientemente curtos para proteger vigas de madeira lamelada colada, conforme apresentado na Figura 17a, ou pés de arcos e de pilares colocados no exterior dos edifícios (Figura 17b), constituem igualmente situações de concepção e execução erradas que a prazo conduzem ao envelhecimento precoce das estruturas devido ao apodrecimento das peças, colocando em causa a sua resistência.

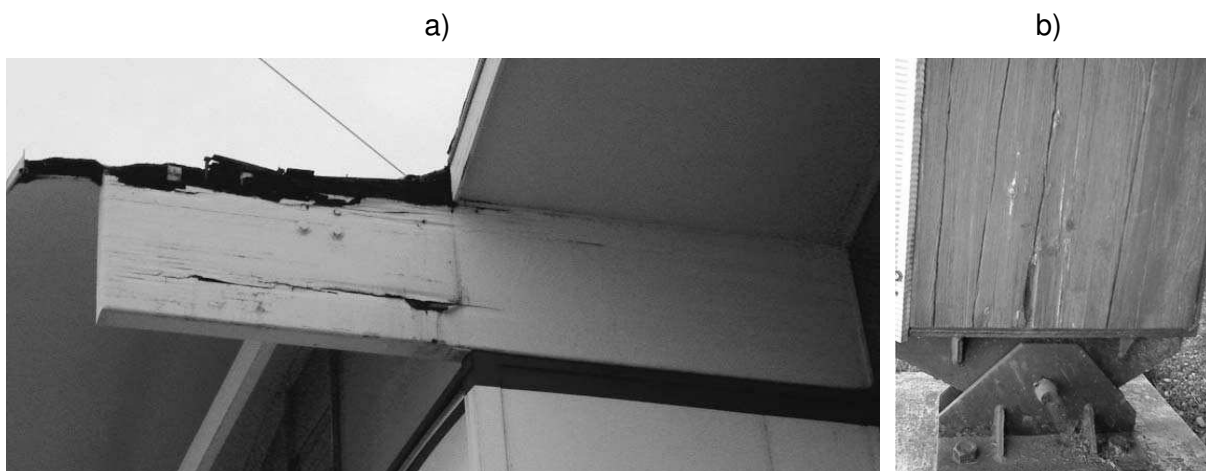


Figura 17: Exemplos de execução e utilização errada de madeira lamelada colada: a) Beirado de cobertura insuficiente para proteger a madeira lamelada colada, b) Patologia clássica em pés de pilares de madeira lamelada colada concebidos para uma utilização interior e não exterior (Le Govic 2008).

O prazo para o aparecimento deste tipo de patologia estrutural é função da exposição das peças à água e da presença de um revestimento de pintura. A manutenção do revestimento pode retardar o envelhecimento da madeira, mas este não tem como função preservar a madeira. Existe por vezes tendência para confundir entre o que é o tratamento de preservação e o que é o tratamento de acabamento.

Ligações

A realização dos diversos tipos de ligação, quer entre elementos de madeira lamelada colada, quer com outro tipo de elementos estruturais (apoios metálicos, etc), requer além da colagem normal das lamelas, a abertura de furações específicas nas peças de madeira. Qualquer alteração à concepção inicial do projeto introduz um comportamento global da estrutura diferente do previsto, tal como por exemplo o aumento do diâmetro das furações.

A concepção deve contemplar a verificação dos níveis de tensão de corte e de tração transversal na zona das ligações, sob pena de induzir fissurações nas peças, correntemente atribuídas apenas a fenómenos de retração/expansão da madeira confinada. O projeto não deve ser orientado para um número muito elevado de ligadores em linha, uma vez que quando

maior for esse número menor e menos eficaz é a capacidade de transmissão dos esforços à madeira.

Tração transversal

A tração transversal é o modo de solicitação mais desfavorável da madeira. Este tipo de esforço pode ser provocado por diversos tipos de solicitação, por exemplo cargas com sentido descendente, suspensas na face inferior de vigas de madeira lamelada colada (Figura 18). A este tipo de solicitação corresponde uma transferência de esforços na direção perpendicular ao fio da madeira.

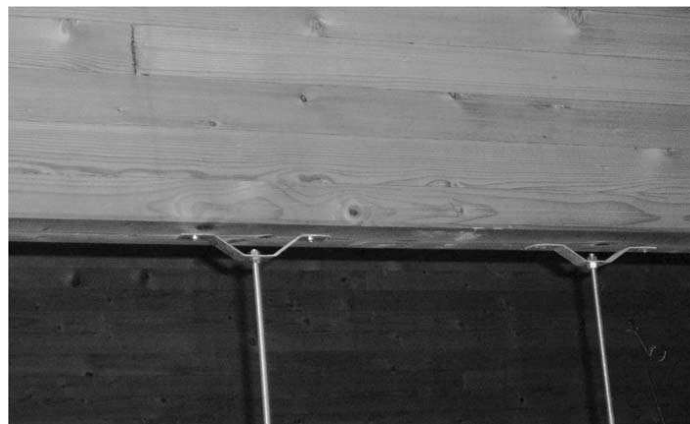


Figura 18: Estrutura em madeira lamelada colada: tração transversal induzida por suspensões fixas na face inferior da viga (Le Govic 2008).

Este tipo de solicitação atua na estrutura como um fator de abertura de fissuras e tem um efeito tanto mais importante quanto o nível de tensão de corte na secção carregada for maior. A “sobreposição”, em termos de sentido de atuação das cargas sobre o elemento, aumentam o risco de abertura de fendas e acelera todo o processo de envelhecimento da estrutura. Dada a semelhança entre os estados de tensão nas ligações com os das vigas entalhadas, o Eurocódigo 5 adotou um método de cálculo de verificação baseado na mecânica de rotura desenvolvido para as vigas entalhadas.

Fissuração e delaminação

A madeira lamelada colada, à semelhança de outros tipos de materiais de construção de natureza não metálica, está sujeita ao aparecimento de fissuras durante a fase de serviço. Uma questão recorrente está relacionada com a identificação da natureza das fissuras, ou seja, classificar o defeito e o seu potencial perigo em termos de estabilidade dimensional e solidez do elemento ou da estrutura à qual o elemento fissurado pertence. De um modo geral, a

fissuração da madeira maciça acaba por ser considerado um fenómeno normal, com origem na retração/expansão da madeira durante o seu relacionamento com o meio ambiente, que está em equilíbrio mas que não deverá, como é óbvio, exceder determinados limites.

No caso particular da madeira lamela colada, devem ser distinguidas as fissuras situadas no seio das lamelas de madeira maciça das fissuras ao nível da junta colada. Estas, correspondem a outro fenómeno denominado delaminação que corresponde à abertura das juntas coladas. A delaminação das juntas coladas, contrariamente à fissuração da madeira, é um fenómeno anormal e que deve ser tido como um problema estrutural que deverá ser observado com detalhe.

Na Figura 19 ilustra-se uma viga em madeira lamelada colada com a presença de ambos os tipos de defeitos.

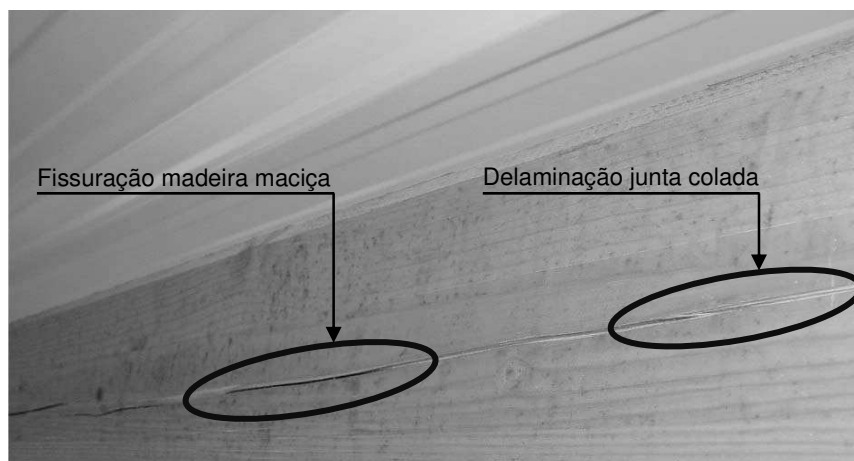


Figura 19: Fissuração da lamela de madeira maciça e delaminação da junta colada numa viga de madeira lamelada colada (Le Govic 2008).

3.1.2 Alguns estudos realizados no âmbito da avaliação do efeito da delaminação na resistência de vigas de madeira lamela colada

Em fase de fabrico são realizados ensaios de delaminação sobre os elementos de madeira lamelada colada, com o objetivo de prevenir danos na fase de serviço.

Muitos têm sido os autores que estudam os efeitos da delaminação na resistência de estruturas de madeira lamela colada, tentando perceber a sua influência, as causas e as consequências

que daí podem advir, na procura de métodos de avaliação não destrutiva de elementos de madeira lamelada colada.

Assim, no sentido de tentar perceber os efeitos adversos que o envelhecimento pode ter sobre a resistência da madeira lamelada colada a longo prazo, nomeadamente com o aparecimento do fenómeno de delaminação, Gaspar (2010) realizou uma série de ensaios sobre vigas de madeira lamelada colada sujeitas a um processo de envelhecimento natural (descrito no Capítulo 3.2, no âmbito da pesquisa realizada por Gaspar (2010)). Posteriormente comparou os resultados obtidos em vigas da mesma série de ensaios mas sem envelhecimento e daí retirou algumas conclusões importantes. Note-se que, o autor realizou ensaios sobre vigas de madeira lamelada colada de pinho e espruce. Neste caso, a informação descrita será reportada apenas para os ensaios relativos a vigas de Espruce, âmbito do presente trabalho.

Numa fase inicial após o processo de envelhecimento das vigas, foi realizada uma avaliação visual de todo o material, baseado na observação do aspeto final das vigas e na avaliação das fissuras e delaminação, medindo o seu comprimento, profundidade e abertura máximos, excluindo todos os defeitos iniciais das peças. Em alguns casos, foram detetadas algumas juntas com falta de cola (defeito de fabrico) que sujeitas ao envelhecimento ficaram ainda mais danificadas. As consequências deste defeito detetadas por observação visual foram também excluídas. Foram ainda excluídos os efeitos da delaminação nos primeiros 30cm do topo de cada viga, porque segundo o autor, a maior suscetibilidade da penetração de água na direção longitudinal face à direção transversal durante o envelhecimento, levou a que as juntas coladas fossem mais solicitadas pela ação da humidade junto aos topos das vigas. De facto, estas zonas atingiram um estado mais avançado de degradação em menor tempo, agravado ainda pelo facto de não terem sido protegidas, de modo a acelerar o processo de envelhecimento natural.

Para a madeira lamela colada de Espruce com cola tipo MUF, o autor observou para as vigas envelhecidas entre 6 e 15 meses um comprimento de delaminação na face norte maior que na face sul, ao contrário do que seria de esperar, talvez devido a alguns defeitos de fabrico já verificados antes de serem submetidas ao envelhecimento. No entanto, para os 24 e os 27 meses de envelhecimento, o comprimento de delaminação observado foi maior na face sul do que na face norte, tomando a superfície uma coloração acinzentada, conforme se pode verificar na Figura 20.

a)



b)



Figura 20: Aspeto de uma viga de madeira lamelada colada de Espruce com cola MUF com 30 meses de envelhecimento natural: a) Face sul, b) Face norte. (Gaspar (2010)).

Segundo o autor, o efeito da massa volúmica da madeira na delaminação é pouco pronunciado, ainda assim, de referir que após 15 meses de exposição, os valores mais baixos de massa volúmica (21 e 30 meses) estiveram relacionados com os valores mais baixos do comprimento de delaminação verificados na face sul e relacionados com os valores mais baixos da abertura e profundidade de delaminação máximos de ambas as faces.

No caso da madeira lamelada colada de Espruce com cola PRF, o autor observou que a delaminação obtida foi significativamente inferior para as amostras com dimensões da secção transversal das amostras menores, logo, com massa volúmica inferior.

Para a menor secção transversal foi detetada delaminação ao fim de 18, 24 e 30 meses de envelhecimento, sendo que, após 18 e 24 meses apenas a face sul da peça apresentava delaminação, dando a entender que existe um efeito da orientação da fase e do envelhecimento nos resultados. Após 30 meses, o comprimento de delaminação aumenta face ao anterior e torna-se similar em ambas as faces da viga.

Para a secção transversal maior, observaram-se valores de comprimento, abertura e profundidades maiores na face sul. Verificou-se ainda que a delaminação após 24 meses é

superior à registada após 12 meses de envelhecimento, eventual resultado do efeito de envelhecimento e de diferentes valores de massa volúmica.

Após todos os ensaios efetuados, o autor concluiu que existe uma clara influência da orientação da face (exposição direta ao sol) na delaminação obtida, aspeto que foi mais evidente nas vigas de Espruce com cola de PRF e secção transversal menor, onde a delaminação na face sul foi visivelmente superior à da face norte.

A espessura das lamelas, o tipo de cola e as dimensões da secção transversal, pareceram também influenciar os resultados. A maior espessura das lamelas e do tipo de cola (MUF) pareceram ter contribuído para a maior degradação do material de Espruce com cola MUF, em relação a outros tipos de situação estudadas pelo autor. No material de Espruce com cola PRF a diferente secção transversal das peças terá conduzido a uma maior delaminação nas vigas de maiores dimensões.

Em termos da resistência da junta colada, a delaminação observada na avaliação visual efetuada após envelhecimento natural, não está relacionada com a perda de resistência da junta. O autor concluiu que a não existência de delaminação não foi consistente com a hipótese de não existir degradação da junta colada. Por outro lado, a existência ou o aumento da delaminação não quer dizer que a junta colada tenha perdido resistência.

3.2 Utilização de ultra-sons na avaliação de estruturas de madeira lamelada colada

3.2.1 Considerações iniciais

Todas as peças de madeira lamelada colada são sujeitas a ensaios (ensaios ao corte e/ou de delaminação com extração de amostras) com vista ao controlo da sua qualidade e obtenção da marcação CE após o fabrico. No entanto, em fase de serviço, e no sentido de prever o comportamento mecânico dos elementos de madeira obtendo a resistência residual, desde cedo se deparou com o facto da respetiva variabilidade implicar o ensaio destrutivo de um volume de madeira elevado de forma a caracterizar corretamente, com maior grau de certeza, as propriedades físico-mecânicas, colocando em causa a própria resistência do elemento ensaio (Machado 2003).

De forma a contornar problemas relativos à extração de grandes amostras de madeira para análise das suas propriedades no âmbito dos ensaios destrutivos, têm-se vindo a desenvolver metodologias de ensaio não destrutivas, baseadas na sua grande maioria em técnicas já utilizadas na avaliação não destrutiva de outros materiais, tais como metais, plásticos e compósitos (Machado 2003).

Os objetivos de grande parte dos métodos de ensaio não destrutivos que têm sido desenvolvidos são os seguintes:

- ✓ Uma melhor caracterização geral do material lenhoso, sem recurso à sua destruição;
- ✓ Garantir a fiabilidade na atribuição da resistência mecânica, por razões de segurança estrutural;
- ✓ Possibilitar a sua utilização em novas situações, nomeadamente para avaliação do comportamento estrutural de produtos derivados de madeira para a construção, por exemplo, lamelados colados.

Nesse sentido, a utilização dos ultra-sons, como meio de ensaio não destrutivo para obtenção de resultados e conclusões, foi aplicada por exemplo por Bucur (2006), com base em conceitos anteriormente desenvolvidos por outros autores como Vary e Lark (1979), Vary (1979 e 1980) e Duke (1988).

3.2.2 Propagação dos ultra-sons na madeira

No âmbito da acústica, o ultra-som é um ramo que utiliza bandas acústicas com frequências bastante acima dos limites audíveis pelo ser humano (20000 Hz aproximadamente). O ultra-som pode propagar-se através de corpos no estado gasoso, líquido ou sólido.

Num meio material elástico, podem-se propagar ondas mecânicas (de choque) de diferentes frequências. As frequências acima do limite audível denominam-se por ondas ultrassónicas, diferindo das ondas sonoras no nível de frequência (Kočiš e Figura 1996).

Um movimento oscilatório pode ser obtido através de uma mudança no estado de equilíbrio de uma partícula de massa, agindo sobre ela com uma determinada força. Se este movimento for repetido durante um determinado intervalo de tempo com um período T, está-se perante

um chamado movimento periódico ou harmónico. O valor recíproco do período T é a frequência f , definida como o número de oscilações da partícula de massa por unidade de tempo (expressão (1)). A unidade da frequência é Hz [s^{-1}] (Kočiš e Figura 1996).

$$f = \frac{1}{T} [1]$$

Uma partícula de massa oscilante forma sempre um sistema com o meio envolvente, em que as partículas se encontram unidas através de ligações elásticas. A propagação num meio elástico efetua-se através de um movimento oscilatório, ou movimento de onda, causado por um movimento oscilatório de um grupo de partículas que é transmitido às partículas vizinhas através dessas ligações elásticas. A perturbação propaga-se no meio como um movimento de onda, com uma certa velocidade que depende das propriedades físicas do meio. Assim, o movimento de onda é caracterizado por duas características importantes: propagação e transmissão de energia, sem transmissão de massa (Kočiš e Figura 1996).

Se a direção de oscilação das partículas individuais corresponde em todos os pontos do meio com a direção da propagação das ondas, o movimento de onda diz-se longitudinal. Se, pelo contrário, as duas direções são perpendiculares entre si, o movimento de onda é transversal. A existência destes dois tipos de movimento de onda, depende do estado físico do meio, isto é, depende se estamos a falar de um meio sólido, líquido ou gasoso (Kočiš e Figura 1996).

Em materiais anisotrópicos ambos os tipos de onda se podem propagar nas direções principais de simetria ou fora delas (Bucur 2006).

A propagação de uma onda no interior da madeira é caracterizada por uma atenuação mais ou menos acentuada da sua amplitude, devido à ocorrência de fenómenos de dispersão e de absorção da onda, naturais num material com uma estrutura vincadamente anisotrópica. De forma simples Bucur (2006) apresentou a madeira como sendo um material composto por um conjunto de tubos (elementos celulares longitudinais) à base de celulose (com estrutura cristalina) que se encontram embebidos numa matriz de lenhina (com estrutura amorfa). A orientação longitudinal dos tubos é apenas perturbada pela ocorrência de estruturas transversais (raios lenhosos). Na Figura 21 observa-se a ultra-estrutura da madeira.

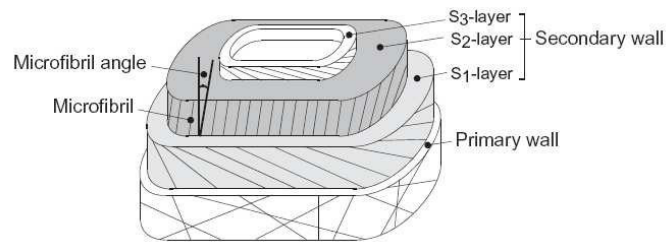


Figura 21: Estrutura da parede celular dos traqueídeos (Hasegawa 2010).

A dissipação de energia ultrassônica ocorre na fronteira (interface entre elementos lenhosos) desses tubos. Nesse sentido, dada a disposição dos elementos lenhosos no interior da madeira, a propagação dos ultra-sons ao longo da direção longitudinal encontrará um número de interfaces significativamente inferior, permitindo velocidades de propagação de onda superiores e valores de atenuação inferiores, em comparação com a propagação nas direções transversais (tangencial e radial) (Bucur 2006).

Em relação à propagação das ondas nas duas direções transversais mais importantes, dá-se conta que a velocidade de propagação é superior e atenuação inferior na direção radial do que na direção tangencial. Este facto pode ser possivelmente explicado pela existência, na direção radial, de elementos de continuidade (raios lenhosos), o que não acontece na tangencial. Ainda assim, este aspeto encontra-se dependente da espécie lenhosa em causa (Bucur 2006).

Os fenómenos de atenuação da onda são tanto mais importantes quanto maior o número de interfaces associadas, por exemplo à presença de fendas ou nós, onde a onda é refratada preferencialmente na direção de maior rigidez (Biernacki e Beall 1993).

Várias características físicas da madeira influenciam a propagação das ondas na madeira. Na direção tangencial e radial a propagação da onda é afetada pelo raio de curvatura dos anéis de crescimento (Bucur 2006). Além das diferenças verificadas segundo os três planos principais da madeira (longitudinal, tangencial e radial), verificam-se, igualmente, diferenças devidas às distintas características anatómicas entre o lenho de primavera e o lenho de outono (Machado 2003).

Outro fator que interfere na leitura de propagação de ultra-sons diz respeito ao teor de água da madeira na altura do ensaio, verificando-se um aumento da velocidade de propagação e uma diminuição de atenuação da onda, com a diminuição do teor de água (Sandoz 1993).

Para frequências na gama entre 100 kHz e 500 kHz a velocidade das ondas longitudinais na direção do fio é muito influenciada, tornando-se praticamente insensível para frequências superiores. Nas outras direções, as velocidades de propagação de onda são praticamente indiferentes à variação da frequência, para valores acima de 250 kHz (Bucur 1995).

Já na gama de frequências entre 100 kHz e 200 kHz, a atenuação da onda nas direções longitudinal e transversal é cerca de 30 dB/m e 200 dB/m, respetivamente (Beall 2002).

3.2.3 Medição de ultra-sons

A medição de ultra-sons pode ser realizada usando um movimento contínuo ou descontínuo (pulsado) da onda (Kočiš e Figura 1996) e, no caso do movimento descontínuo, com impulsos de banda larga ou banda estreita (Bucur 1995).

A aplicação de ultra-sons à madeira tem sido essencialmente dirigida para a deteção e avaliação de defeitos ou para avaliação de propriedades mecânicas. Os métodos de inspeção ultrassónica, atualmente disponíveis, podem ser diferenciados segundo cinco grandes grupos, consoante sejam baseados na técnica: 1) do eco pulsado; 2) de transmissão ou sombra; 3) de imersão; 4) da emissão acústica; 5) da emissão ultrassónica.

A técnica de eco-pulsado necessita que apenas uma das superfícies do elemento a analisar esteja visível, sendo que a análise recai sobre as alterações sofridas pela onda de retorno e decorrentes de fenómenos de reflexão, com origem em descontinuidades ou resultantes de embates nas superfícies da peça. Nesta técnica normalmente só é utilizada uma sonda (emissora e recetora) ou duas sondas colocadas sobre a mesma superfície do elemento (Machado 2003).

A técnica de transmissão corresponde à utilização de duas sondas (uma emissora e outra recetora) em duas faces opostas da peça a ensaiar. A maioria dos ensaios em madeira com recurso aos ultra-sons têm sido baseados nesta técnica (Machado 2003). Entre as duas sondas é emitida uma onda ultrassónica. Quando se está perante uma heterogeneidade, a pressão acústica altera-se relativamente à que seria medida num material homogéneo. Uma desvantagem usualmente apontada a este método tem a ver com o facto desta mudança de pressão acústica poder também estar relacionada com o deficiente acoplamento das sondas à

face da peça a ensaiar ou ainda a uma mudança na estrutura do material, o que vai dificultar a atribuição das causas aos resultados obtidos (Gaspar 2010).

A técnica de imersão pode ser vista como uma técnica de eco pulsado ou de transmissão, uma vez que difere apenas na forma de contacto estabelecido entre as sondas e as peças a analisar. Nesse sentido, no caso da transmissão ou de eco pulsado, o contacto é em geral estabelecido por um acoplante entre a sonda e a peça (um gel ou uma massa lubrificante), enquanto no caso da imersão, quer a sonda (ou sondas) quer a peça a ensaiar estão imersas no acoplante, que neste último caso é a água (Machado 2003). A vantagem do acoplamento ser feito desta forma é que se torna mais eficaz (Kočiš e Figura 1996). Este tipo de técnica é mais apropriada para ensaios laboratoriais enquanto a técnica de transmissão direta pode ser utilizada quer em laboratório quer *in situ* (Bucur 1995).

O método de emissão acústica, sigla AE do inglês *acoustic emission*, sustentada pela norma ASTM E1316 (2008), baseia-se num fenómeno no qual as ondas são geradas pela rápida libertação de energia de uma ou mais origens. Essa libertação pode ter origem numa fenda no interior do material inspecionado, após uma solicitação mecânica do material. Tal como na generalidade dos métodos, a atenuação das ondas de emissão acústica (AE) está muito dependente das propriedades do material. Os materiais porosos como a madeira têm um efeito atenuador muito superior quando comparados com materiais metálicos, por exemplo. O método de emissão acústica é vastamente utilizado na avaliação não-destrutiva e não requer uma fonte de energia externa, uma vez que a onda é libertada pela própria peça a analisar (Kawamoto e Williams 2002).

Por fim, a técnica da emissão ultrassónica, sigla AU do inglês *acousto-ultrasonics* – ou mais concretamente a técnica de simulação de emissão acústica, com recurso aos ultra-sons – foi desenvolvida como um complemento à técnica de emissão acústica, combinando a análise do sinal da emissão acústica com uma técnica de caracterização ultrassónica. Qualquer uma destas duas técnicas pertence à família dos ensaios não destrutivos com recurso a ultra-sons. A diferença reside no facto da emissão acústica ser gerada pela carga mecânica do material que induz ondas espontâneas, enquanto na técnica de emissão ultrassónica a onda é gerada por uma fonte externa pulsada ultrassónica (Bucur 2006). Nesta última, a posição e a localização da fonte emissora de ultra-som é fixa e corretamente caracterizada. As ondas são emitidas com intervalos de tempo previamente estabelecidos (Bucur 2006).

A emissão acústica é determinada por fontes internas ativadas durante o processo de carregamento do material, produzindo fenômenos de propagação estocásticos. A técnica de emissão ultrassônica é utilizada para caracterizar as propriedades físicas do material, entre a fonte emissora e a fonte recetora e não para localizar a fonte, como pode ser realizado com recurso à técnica de emissão acústica. Baixa atenuação da onda é associada com maior resistência e ausência de defeitos. A técnica de emissão ultrassônica é portanto uma abordagem alternativa que permite caracterizar os materiais sempre que as técnicas convencionais de ultra-sons (técnica de transmissão ou de eco pulsado) não podem ser utilizadas (Bucur 2006).

3.2.4 Trabalhos realizados por outro autores

O recurso aos ultra-sons para avaliação de juntas coladas de madeira lamelada colada tem sido vastamente utilizado (Reis 1989; Reis et al. 1990a; Biernacki e Beall 1993b; Dill-Langer et al. 2005b).

No estudo efetuado por Henrique dos Reis (Reis 1989), é realizada uma investigação acerca da viabilidade da utilização da técnica de Emissão Ultrassônica (AU – Acouso-Ultrasonic) com vista a caracterizar a resistência de juntas coladas em vigas de madeira lamelada colada, bem como ligações coladas em geral. A informação ultrassônica foi analisada e correlacionada com a resistência ao corte das juntas coladas, sendo que foram realizadas medições antes e depois das amostras serem submetidas a condições de temperatura e humidade com vista a simular o envelhecimento das peças ou a deterioração da junta colada (linha de colagem).

Para estudar a viabilidade da utilização da técnica de emissão ultrassônica (AU) nesta avaliação, foram produzidas dezoito amostras de vigas de madeira lamelada colada compostas por duas lamelas de 25,4 x 127 x 203 mm, conforme se pode observar na Figura 22. Em todas as amostras o fio da madeira foi orientado ao longo do comprimento das lamelas. Para que fosse possível obter amostras com diferentes níveis de resistência na junta colada, foram criadas zonas com diversos defeitos na junta colada, quer com espessuras diferentes do normal, com deficiente quantidade de cola ou com cura deficiente. O objetivo foi simular possíveis defeitos na junta de colada durante o processo de fabrico.

A Figura 22 apresenta ainda a configuração do sistema utilizado para aquisição de dados da emissão ultrassônica. Basicamente, trata-se de numa tecnologia portátil Acoustic Emission (AET), duas sondas (transdutores), um computador equipado com uma placa analógico-digital e um software específico para tratamento dos dados recolhidos.

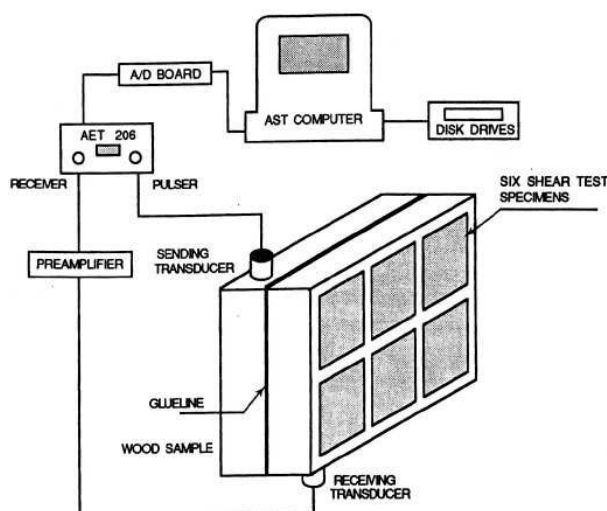


Figura 22: Configuração do sistema utilizado para aquisição de dados da Emissão Ultrassônica (Reis 1989).

As sondas (emissora e recetora) utilizadas tinham uma sensibilidade aproximada de 66 dB com uma frequência de ressonância de 175 kHz. A sonda emissora foi ativada pela tecnologia de emissão acústica AET com uma taxa de 250 pulsos/s. O sinal de saída da sonda recetora foi amplificado 85 dB. Como se pode verificar na Figura 22, as sondas foram colocadas em lados opostos das juntas, permitindo dessa forma fazer a leitura cruzada sobre a junta colada. Para o acoplamento entre as amostras de madeira e a sonda emissora e a sonda recetora foram utilizados discos de borracha de silicone com 25,4 mm de diâmetro e 1,6 mm de espessura fixos às sondas utilizando adesivos à base de silicone.

Com o objetivo de obter medições dos parâmetros da onda representativos em toda a junta colada, foi desenhada na parte superior da lamela uma quadrícula que permitiu centrar a sonda emissora e registar os dados obtidos apenas da zona central da lamela, eliminado o “efeito de borda”.

Uma vez registados os valores dos parâmetros da onda das amostras intactas, as mesmas amostras foram submetidas a condições laboratoriais severas, ficando sujeitas a 90% de humidade durante 16 dias a 20°C. A humidade provocou um aumento da dimensão das peças

de madeira lamelada criando um estado de tensão na junta colada, causando alguns danos e simulando desta forma o envelhecimento da madeira e o seu desgaste. Após serem sujeitas a estas condições as amostras foram novamente ensaiadas e calculados os respectivos valores dos parâmetros da onda.

Após realizados estes ensaios foram extraídas das vigas várias amostras com secção de 51 x 51 mm posteriormente sujeitas a ensaios de corte pela junta colada, conforme se pode visualizar na Figura 23.

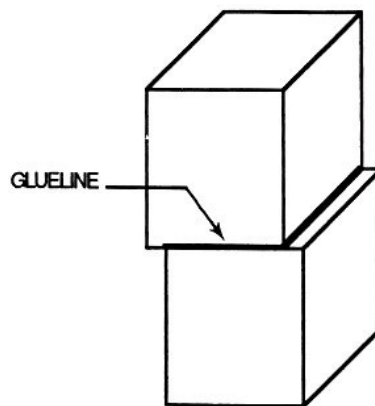


Figura 23: Configuração da amostra para medições do ensaio ao corte (Reis 1989).

Este estudo revelou que a técnica da emissão ultrassónica mostra ser promissora na avaliação da resistência de juntas coladas de madeira lamelada colada. Vários parâmetros da onda, em particular a amplitude e a área no domínio do tempo mostraram ter uma elevada correlação com a resistência ao corte da junta colada. Os resultados são indicadores de que este tipo de abordagem pode ser utilizado no controle da qualidade, eliminando a necessidade de um programa de testes destrutivos dispendioso. Além disso, esta técnica tem potencial para ser aplicada a estruturas em serviço para avaliar o estado de resistência das juntas coladas e para detetar delaminação, caso exista.

Por fim, e muito importante, a correlação que existe entre os parâmetros de onda medidos antes e depois das amostras sujeitas às condições mencionadas anteriormente, permite perceber que a utilização desta técnica permite prever a resistência da junta colada com base nos dados medidos imediatamente após o fabrico das peças, eliminando logo à partida a necessidade de sujeitar amostras a condições de humidade e temperatura específicos.

Contudo, este autor refere que, para aplicações mais eficazes e práticas desta técnica, deve ser feita uma investigação mais detalhada através do estudo de vigas de madeira lamelada colada com várias lamelas de espessuras diferentes.

Posteriormente, Frank C. Beall e Jacek Biernacki (Beall e Biernacki 1992, Biernacki e Beall 1993b) realizaram novos estudos no seguimento do trabalho desenvolvido por Henrique dos Reis em 1989.

Neste caso foram preparados provetes compostos por duas lamelas de Douglas-fir com 35 mm de espessura e 135 mm de altura, coladas com cola comercial de resorcinol. Conforme ilustrado na Figura 24, cada amostra continha duas zonas distintas, uma zona de controlo e uma zona com alguns defeitos. Na zona de controlo, a ligação colada foi realizada em condições de aderência ideais. Por outro lado, a zona com defeitos continha vários tipos de defeitos intencionalmente concebidos, como falta ou baixa quantidade de cola, espessuras de cola maiores que o normal e algumas fendas.

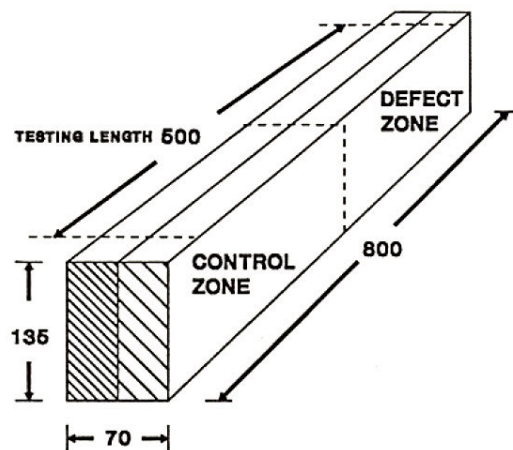


Figura 24: Amostra de madeira lamelada com zonas de controlo e defeitos (Beall e Biernacki 1992).

O material para a amostra foi selecionado de modo a que não existissem grandes defeitos na madeira e o veio foi orientado no sentido paralelo ao bordo, conforme ilustrado na Figura 25. As amostras foram construídas para várias combinações de ângulo do anel de crescimento (GRA – Growth Ring Angle). Após a colagem das lamelas, os provetes foram expostos a condições de humidade e temperatura variáveis no sentido de induzir tensões nas juntas coladas.

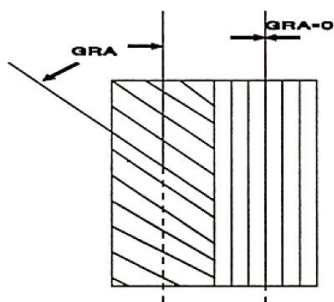


Figura 25: Secção de corte de uma amostra de madeira lamelada colada apresentando o ângulo de anel de crescimento (Beall e Biernacki 1992).

Os ensaios de emissão ultrassónica foram realizados com recurso a duas sondas colocadas em lados opostos da amostra e para que o sinal da AU fosse forçado a cruzar a junta colada, conforme ilustrado na Figura 26, que exemplifica ainda as quatro direções de transmissão do sinal possíveis. Além das tradicionais sondas utilizadas na técnica de emissão ultrassónica, foram ainda utilizadas duas sondas fabricadas especialmente para a realização deste estudo com frequências de ressonância de 375 kHz e 110 kHz para emissão e receção do sinal, respetivamente.

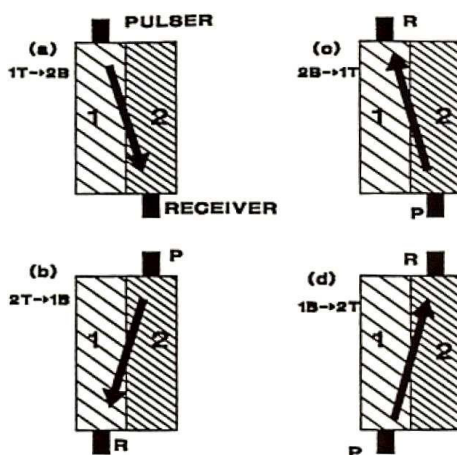


Figura 26: Direções de transmissão do sinal ultrassónico (Beall e Biernacki 1992).

Após os ensaios com recurso a ultra-sons, as juntas coladas das mesmas amostras foram ensaiadas ao corte, de acordo com a norma ASTM D905-89.

A avaliação dos resultados obtidos indica que o método de emissão ultrassónica não é diretamente sensível à resistência da junta colada, mas sim a determinados tipos de defeito. Este método mostrou ser mais sensível a juntas com espessura maior que o normal (com espessura de 3 mm) e à total falta de cola. Isto sugere que a resistência da junta colada não está, de certo modo, diretamente relacionada com as características de transmissão da emissão ultrassónica. Este facto poderá ser explicado com base na suposição de que a maior parte da

energia da onda emitida e que é perdida na junta colada, está relacionada com a reflexão da onda e não com a sua absorção.

A aplicação de quantidades de cola insuficientes e as juntas com espessura de 1 mm não influenciaram os parâmetros da AU. Estes defeitos também não acarretaram significativa redução da resistência ao corte (ASTM D905 1994).

As juntas coladas com 3 mm de espessura podem ser consideradas com uma dupla barreira à propagação da onda, entre a primeira lamela e a junta colada, e entre a junta colada e a segunda lamela. Causado pelas diferenças entre o módulo de elasticidade e a densidade entre a madeira e a junta colada, ambos os limites poderão causar a reflexão da onda emitida.

Ao contrário das juntas com 3 mm, segundo os autores, os resultados parecem demonstrar que as juntas de espessura normais não constituem um obstáculo à propagação das ondas, desde que a sua espessura seja comparável com as dimensões das características anatómicas da madeira, concretamente com espessuras da mesma ordem de grandeza da dimensão do raio das células de madeira resinosas, que varia entre os 17 μm e os 60 μm (0,017 mm e 0,60 mm).

Foi ainda observado que a forma da onda no domínio do tempo sofreu algumas alterações em zonas da amostra onde a junta continha alguns defeitos. A título de exemplo, foi possível demonstrar que o tempo entre o início da onda e a máxima amplitude (TPMA) cresceu nas juntas com 3 mm de espessura. De igual modo, a razão entre a AT e a amplitude máxima no domínio do tempo (Amp) também cresceu.

Comparativamente à utilização de toda a onda, o uso dos primeiros 64 μs possibilitou fazer uma distinção com mais certeza entre os valores obtidos em juntas coladas com e sem os defeitos mencionados. A AT calculada com esta parte da onda, permitiu fornecer ótimos resultados na distinção entre as zonas onde a junta não tinha cola e zonas com 3 mm de espessura. Tal facto, tem sobretudo que ver com uma parte inicial do sinal da onda recebido bastante inferior relativamente à duração da parte restante da onda, correspondente ao sinal transmitido, à qual se junta a parte refletida. Se a parte da onda que é refletida for maior, significa que a onda recebida será mais irregular.

Com este estudo, verificou-se ser possível detetar com sucesso pontos fracos nas juntas coladas de madeira lamelada colada devidos sobretudo à espessura da junta colada e zonas

sem cola. Em juntas com resistência moderada foram mais difíceis de detetar devido à variabilidade natural da própria madeira.

O problema fundamental destacado pelos autores, associado às limitações da AU relacionadas com a energia, é causado pelo efeito negativo, em termos de obtenção de dados, das características da madeira na propagação das ondas, tais como o ângulo dos anéis de crescimento, a espessura e curvatura dos anéis de crescimento, defeitos da madeira, condições da superfície, teor de água e massa volúmica da madeira. Além disso, os diferentes defeitos ao nível da junta colada parecem afetar a resposta AU de maneira diferente, o que torna a previsão da resistência da junta de uma amostra desconhecida ainda mais difícil.

Noutro estudo realizado por Dill-Langer, Bernauer e Aicher (Dill-Langer, Bernauer e Aicher 2005b) com vista à avaliação de juntas coladas em peças de madeira lamelada colada, foi utilizada um provete composto por duas lamelas com 1000 mm de comprimento, 150 mm de largura e 32 mm de espessura, coladas em laboratório com cola PRF, resultando uma junta com 0,1 mm de espessura. Conforme se pode verificar na Figura 27, na zona central do provete foi deixada uma zona sem cola, numa área correspondente à largura total das lamelas e num comprimento de 300 mm que representa, por exemplo, uma disfunção temporária do dispositivo de pulverização da cola. A amostra construída e o esquema da configuração do ensaio são apresentados na Figura 27.

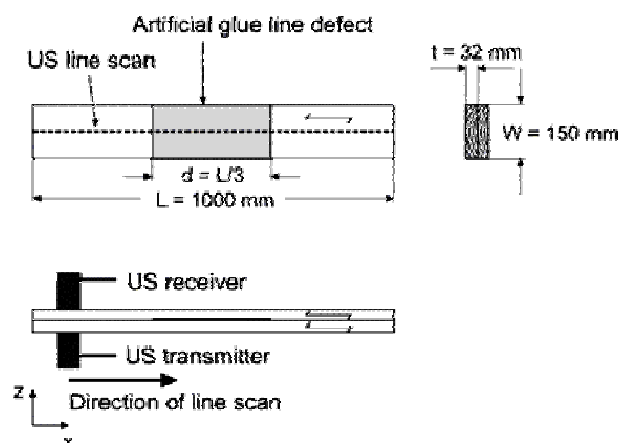


Figura 27: Amostra e esquema de configuração do ensaio (Dill Langer et al. 2005b).

Na realização dos ensaios, as medições de transmissão de ultrassom foram efetuadas por meio de um gerador de alta energia ultrassônica. Foram utilizadas dois diferentes tipos de sonda. Sondas de baixa frequência (20 kHz) com extremidade em forma de cone de onde resulta um

diâmetro de acoplamento de cerca de 3 mm e sondas de frequência média (350 kHz) com extremidades planas e um de diâmetro de acoplamento de 64 mm. As sondas foram fixas em lados opostos da junta ensaiada através de uma estrutura com um parafuso para aplicação de compressão. Não foi utilizado nenhum meio de acoplamento (denominado acoplamento a seco).

Os autores verificaram que, a amplitude da primeira oscilação, a amplitude entre o pico máximo e mínimo registado pela onda (PaP), e o tempo entre o início da onda e o início do sinal recolhido (denominado time-of-flight) mostraram ser sensíveis à existência de uma zona sem cola.

Os resultados apresentados foram obtidos a partir de amostras com dimensões relativamente pequenas. Nesse sentido, a avaliação dos parâmetros característicos do sinal foram parcialmente afetados pelo ruído. No intuito de transferir os métodos utilizados para membros de madeira lamelada colada com dimensões estruturais, o ruído de sinais altamente atenuados e altamente amplificados tem de ser reduzido com recurso a técnicas de cálculo da média e por filtragem digital.

Segundo os autores, o ultra-som utilizado e os métodos de processamento do sinal devem continuar a ser desenvolvidos no que diz respeito à sensibilidade aos defeitos na junta colada causados por exemplo pela falta ou errada pressão de colagem ou errada razão entre a resina e o endurecer. Além disso, o procedimento de ensaio não destrutivo deve ser avaliado para influências de interferência da variabilidade natural de madeira e contra influências do ambiente industrial.

Posteriormente, os mesmos autores (Dill-Langer, Aicher e Bernauer 2005a) aplicaram um par (emissor e recetor) de sondas de ondas ultrassónicas de corte sobre uma viga de madeira lamelada colada com 600 mm de largura, 114 mm de espessura e 1180 mm de comprimento. As sondas de banda larga com uma frequência central de 250 kHz e um tamanho de elemento nominal de 25 mm foram impulsionadas por um gerador de pulso de alta voltagem.

A direção de propagação da onda de corte foi perpendicular ao fio, na direção da largura da viga (direção Z, de acordo com a Figura 28). A configuração do teste é apresentada na Figura

28. A sonda recetora foi deslocada longitudinalmente (direção do fio) relativamente à sonda emissora 100 mm. Note-se que, neste caso, o ensaio foi realizado com as sondas do mesmo lado da peça analisada. Verificou-se que, os melhores resultados foram obtidos com a direção de propagação das ondas de corte paralelas à direção do fio. Não foi utilizado nenhum meio de acoplamento (denominado acoplamento a seco) e as sondas foram pressionadas contra a superfície da viga com uma pressão controlada de 1000 N.

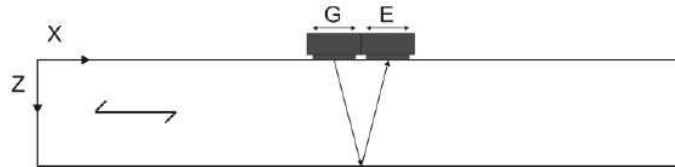


Figura 28: Configuração do ensaio para medições da reflexão da onda, numa viga lamelada colada com propagação na direção perpendicular à direção das fibras (Dill Langer et al. 2005a).

Ainda no âmbito do mesmo estudo, os autores criaram um provete para detetar defeitos na junta colada fabricada em duas fases. Numa primeira fase todas as lamelas de madeira foram coladas, resultando numa secção transversal comum (colagem primária). Foram criados dois elementos com cerca de 19 lamelas. De seguida, esses dois elementos de madeira lamelada colada foram ligados por um processo de colagem secundário (realizada com cola PRF a uma pressão de $0,8 \text{ N/mm}^2$), onde os dois componentes de montagem foram colados na perpendicular, originando num denominado membro “bloco colado”. As duas faces de colagem foram antecipadamente aplainadas o que permitiu obter uma junta colada com espessura inferior a $0,1 \text{ mm}$. Propositadamente, no centro da amostra, uma secção de 400 mm de comprimento por 300 mm de largura foi deixada sem qualquer cola (adesivo). Na Figura 29 é apresentada a secção transversal resultante.

Devido à qualidade da superfície e à pressão de colagem aplicada, não existe, virtualmente nenhuma diferença entre os dois componentes de madeira lamelada colada na zona da área com defeito.

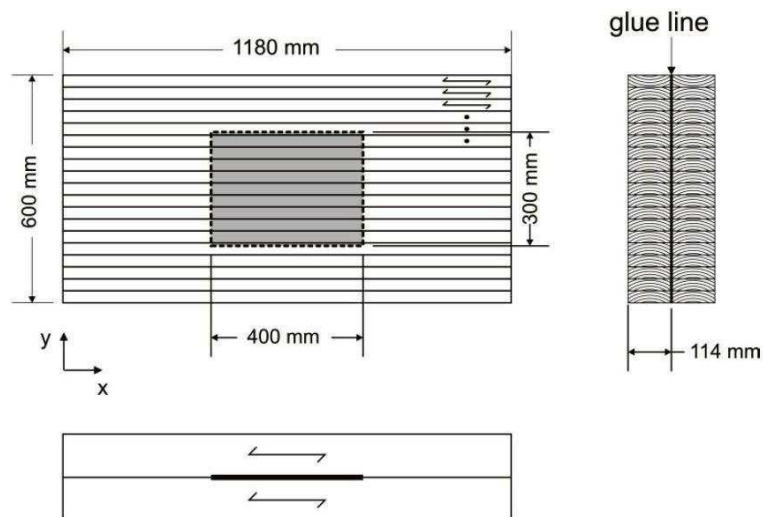


Figura 29: Secção transversal resultante da amostra com dois blocos obtidos pela colagem secundária (Dill Langer et al. 2005a).

Neste caso, a configuração do ensaio para realizar as medições da reflexão é análoga às medições realizadas no âmbito de um único elemento de madeira lamelada colada, descrito anteriormente. O par de sondas é colocado do mesmo lado da peça a ensaiar. Os ultra-sons são aplicados através de um emissor e o sinal resultante é medido pelo recetor e gravado por um sistema de registo dos dados obtidos. As condições de acoplamento das sondas, a orientação e distância entre sondas, a direção de propagação e os dados do equipamento de ultra-sons são iguais aos utilizados anteriormente. Toda a superfície da amostra foi ensaiada, deslocando o par de sondas emissora / recetora dentro de uma grelha de 50 mm segundo a direção do fio e 32 mm na direção perpendicular ao fio, tendo sido registados 357 sinais. Na Figura 30 podemos visualizar o esquema do ensaio realizado.

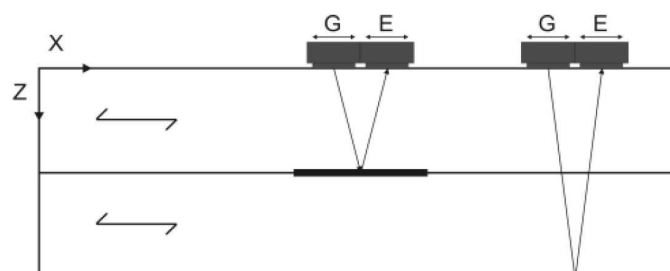


Figura 30: Configuração do ensaio para deteção de defeitos na junta colada, utilizando as medições de reflexão da onda através de ultra-sons (Dill Langer et al. 2005a).

Com este estudo, os autores conseguiram demonstrar que este método permite detetar o defeito introduzido em blocos de madeira lamelada colada com colagem secundaria (Figura 29), mesmo com linhas de cola muito finas ($< 0,1$ mm) e com altas pressões de colagem aplicadas, analisando as diferenças entre as ondas refletidas com e sem defeito. No entanto, os

autores referem ainda que tiveram algumas dificuldades devido à quantidade relativamente elevada de dispersão que tornou difícil estabelecer um limite claro entre o que é o som e o defeito da junta colada.

Nesse sentido, os autores sugerem que sejam elaborados mais ensaios neste âmbito, com mais amostras e configurações de amostra diferentes no que diz respeito às dimensões e qualidade da madeira. Para tentar diminuir ainda mais a dispersão, poderá ser necessário medir simultaneamente parâmetros adicionais não destrutivos para normalizar os dados de reflexão.

Num trabalho realizado recentemente, Gaspar (2010) estuda a possibilidade da utilização dos ultra-sons na avaliação da integridade de juntas coladas em madeira lamelada colada, como auxílio à inspeção de estruturas em serviço, quer seja na avaliação da resistência quer na avaliação de fenómenos de delaminação.

A preparação dos provetes para ensaio teve duas finalidades distintas. Em primeiro lugar o objetivo foi estimar a resistência da junta colada com recurso aos ultra-sons. O segundo objetivo foi analisar o estado de degradação da junta, fator que pode influenciar a sua resistência, sobretudo se estivermos perante fenómenos de delaminação.

Nesse sentido, para atingir o primeiro objetivo foram realizados um conjunto de ensaios preliminares com 16 provetes ensaiados ao corte. Cada provete tinha quatro juntas coladas com cola do tipo PRF, com uma secção transversal de 50 x 50 mm².

Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios e por isso o autor decidiu alargar a campanha de ensaios às peças previamente submetidas ao envelhecimento natural. O envelhecimento natural das vigas foi realizado sobre a cobertura de um dos edifícios da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria, onde foi colocado um conjunto de vigas que ficaram durante alguns meses expostas diretamente às condições atmosféricas.



Figura 31: Colocação das vigas para envelhecimento natural (Gaspar 2010).

Este tipo de abordagem obedece a determinados cuidados a ter em conta. Neste caso, existem vários aspetos que condicionam o posicionamento das vigas. Estas, foram colocadas a 90 cm do pavimento para que o equipamento circundante presente na cobertura não provocasse sombra sobre as vigas. No mesmo sentido, o espaçamento entre vigas foi estudado de forma a que, no dia o ano com menor tempo de luz solar as vigas não provocassem sombreamento sobre as vigas seguintes.

Devido à exposição direta aos agentes atmosféricos, os gradientes térmicos são bastante elevados e como tal, os ciclos de extensão / retração são de igual forma bastante severos. Nesse sentido, as vigas foram colocadas sobre os apoios com uma das extremidades fixa e outra livre, simplesmente apoiada, o que permitiu às vigas deslocarem-se livremente na direção paralela ao fio.

Findo o processo de envelhecimento natural das vigas, foram ensaiadas 2 vigas de pinho bravo não tratado com 3 e 9 meses de envelhecimento respetivamente, 1 viga de pinho bravo tratado com 3 meses de envelhecimento, 1 viga de espruce com cola de MUF com 3 meses de envelhecimento e 2 vigas de espruce com cola de PRF com 3 e 6 meses de envelhecimento respetivamente.

De seguida, e no seguimento do segundo objetivo a atingir, foram preparadas peças com 5 lamelas de madeira de pinho bravo coladas com cola tipo PRF, compondo elementos de secção transversal com 0,055 m (largura) x 0,16 m (altura) e com 0,53 m de comprimento.

Os ensaios com recurso aos ultra-sons foram realizados utilizando duas sondas (uma emissora e outra recetora), associadas a um equipamento gerador e recetor do sinal (designado por

PUNDIT) no qual se efetuou a leitura do tempo que decorreu entre a emissão e a receção do sinal, o que veio indicar posteriormente a velocidade da onda emitida.

Foi utilizado um osciloscópio TDS 220 da Tecktronix e a transferência de dados para o computador foi realizada com recurso ao software do fabricante (WaveStar). As ondas foram captadas, recolhendo 2500 pontos espaçados de 1 μ s o que corresponde a uma frequência de amostragem de 1000 kHz.

O fabricante aconselhou a utilização de sondas com frequências entre 150 e 220 kHz para ensaios sobre peças de madeira. Nesse sentido, optou-se pelo uso de 2 sondas planas com picos de ressonância de 200 kHz e com 20 mm de diâmetro compostas por cristais cerâmicos piezoelétricos de zirconato/titanato de chumbo envoltas numa caixa cilíndrica de aço. O diâmetro das sondas foi escolhido de forma a não exceder a espessura das lamelas. Desta forma foi garantido que o sinal foi recebido de apenas um dos lados de cada junta ensaiada.

Quanto ao acoplante, o fabricante indicava uma massa lubrificante para motores de água da Castrol. No entanto, foi utilizado uma massa lubrificante de lítio fabricada pela WD-40 Company, com a qual se obtiveram resultados similares aos obtidos com o acoplante indicado pelo fabricante em ensaios expeditos realizados pelo autor.

Para efetuar as medições de ultra-sons, todas as juntas foram ensaiadas, colocando as sondas (emissor e recetora) em faces opostas do provete de modo a que a onda cruzasse a junta. Para cada junta foram realizadas medições nas duas direções, sendo recolhidas para cada uma das direções três ondas, adotando-se depois a sua média na análise de resultados.

De referir ainda que a medição dos ultra-sons foi efetuada na mesma zona de onde foram posteriormente retirados os provetes para ensaio ao corte e que antes dos ensaios, todo o material foi acondicionado em ambiente normalizado ($65 \pm 5\%$ de humidade relativa, $20 \pm 2^\circ\text{C}$) até massa constante.

Com a realização dos ensaios verificou-se que existe uma elevada sensibilidade dos ultra-sons às dimensões dos provetes, à espécie e propriedades da madeira. O autor concluiu que foi obtido um elevado grau de correlação entre os dados ultrassónicos recolhidos, a massa volúmica da madeira e sua resistência ao corte.

Confirmou-se a influência do ângulo dos anéis de crescimento na velocidade da onda e no domínio do tempo. A distinção no domínio da frequência foi menos evidente. Detetou-se uma menor influência da espessura dos anéis de crescimento nos ultra-sons. Verificou-se também que a degradação da madeira pode ser detetada com recurso aos ultra-sons, uma vez que no domínio da frequência a onda foi bastante influenciada.

Comparando a degradação da madeira e da junta colada, verificou-se que estas afetaram de forma diferente a informação ultrassónica, sugerindo que este método possa ser muito útil na avaliação e deteção de fenómenos de delaminação não visível, através dos parâmetros de onda relacionados com a sua forma e com a sua diferente configuração no domínio da frequência.

O autor concluiu ainda que a utilização da técnica de emissão ultrassónica é bastante promissora na avaliação da resistência ao corte de juntas coladas e que futuramente será de grande interesse alargar o estudo desenvolvido incluindo juntas com diferentes níveis de envelhecimento e conseqüentemente com uma gama mais ampla de resistências para averiguar a aplicabilidade desta técnica na avaliação de estruturas em serviço.

Trabalho experimental desenvolvido

4.1 Introdução

A aplicação dos ultra-sons à madeira tem sido sobretudo utilizada por diversos autores para detetar e avaliar possíveis defeitos da madeira ou para avaliar as suas propriedades mecânicas.

A utilização dos ultra-sons no desenvolvimento deste trabalho experimental serviu sobretudo para estudar a possibilidade de alargar a sua atual utilização à avaliação das juntas coladas em peças de madeira lamelada colada, no sentido de, futuramente, ser possível avaliar estruturas de madeira lamelada colada em fase de serviço, quer a nível de resistência residual, quer a nível de possíveis fenómenos de delaminação bastante característicos deste tipo de estrutura.

Nesse sentido, foram realizados uma série de ensaios com ultra-sons sobre vigas de madeira lamelada colada de Espruce envelhecidas naturalmente, de forma a avaliar a capacidade resistente das suas juntas. Posteriormente, das mesmas vigas, foram retirados vários provetes, com dimensões normalizadas, os quais foram sujeitos a ensaios de corte em cada uma das suas juntas de forma a comparar os resultados dos ensaios com ultra-sons e a resistência obtida com os provetes sem envelhecimento com a resistência obtido nos provetes com envelhecimento. No caso das vigas de madeira lamelada colada de Espruce com cola a resistência inicial foi estimada com base nos resultados obtidos por Gaspar (2010).

Foi realizada uma análise global dos resultados obtidos, comparando os dados de ambos os ensaios, tendo-se obtido conclusões relevantes sobre o desempenho das juntas e a possibilidade do uso dos ultra-sons na avaliação da resistência ao corte das juntas coladas.

4.2 Material de ensaio

As amostras de madeira lamelada colada utilizadas neste trabalho estavam disponíveis na Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria (ESTG), preparadas no âmbito de trabalhos anteriores realizados pelo Professor Florindo Gaspar (Gaspar 2010). As vigas ensaiadas foram sujeitas a um processo de envelhecimento natural, devidamente controlado e acompanhado, de forma a simular o efeito das condições atmosféricas sobre estruturas em fase de serviço e daí retirar dados que permitam comparar a resistência ao corte das juntas de madeira lamelada colada antes e após o envelhecimento.

No Quadro 4.1 apresentam-se as características das peças sujeitas a ensaio. As peças eram constituídas por madeira de Espruce e por dois tipos de cola: fenol-ressorcinol-formol (PRF) e melamina-ureia-formol (MUF). Às vigas com cola dos tipos MUF e PRF foi atribuída a designação M e P, respetivamente.

Quadro 4.1 – Características das peças de madeira lamelada colada ensaiadas.

Tipo de viga	Tempo de envelhecimento [meses]	Tratamento preservador	Tipo de cola*	Características geométricas	
				N.º Lamelas	Secção [mm]
M	12	Sem tratamento	MUF	6	120 x 240
M	18	Sem tratamento	MUF	6	120 x 240
M	24	Sem tratamento	MUF	6	120 x 240
M	27	Sem tratamento	MUF	6	120 x 240
M	30	Sem tratamento	MUF	6	120 x 240
P	12	Sem tratamento	PRF	3	78 x 130
P	18	Sem tratamento	PRF	3	78 x 130
P	24	Sem tratamento	PRF	3	78 x 130
P	12	Sem tratamento	PRF	5	88 x 225
P	24	Sem tratamento	PRF	5	88 x 225

* – PRF: fenol-ressorcinol-formol; MUF: melamina-ureia-formol

Na Figura 32 apresenta-se o aspeto das vigas ensaiadas.



Figura 32: Aspeto geral das vigas ensaiadas.

4.3 Ensaaios com ultra-sons

4.3.1 Equipamento de ensaio

Todo o equipamento utilizado foi igualmente disponibilizado pela ESTG. Na Figura 33 apresenta-se o esquema do ensaio realizado bem como o equipamento utilizado.

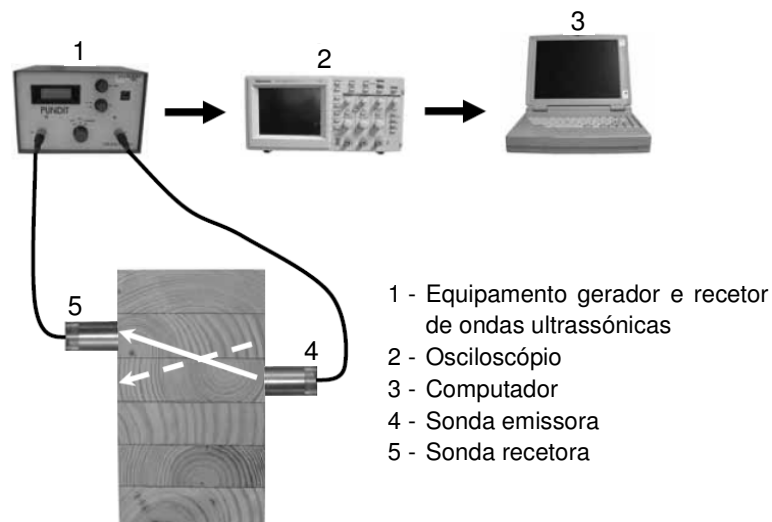


Figura 33: Posicionamento das sondas e equipamento utilizado no ensaio ultrassónico (Gaspar 2010).

Equipamento emissor e recetor da onda ultrassónica

O equipamento utilizado para gerar ondas ultrassónicas foi um PUNDIT (designação comercial), produzido pela CNS Electronics que segundo vários autores (entre eles Machado 2003) é adequado para ser utilizado na avaliação não destrutiva de madeira. Recorda-se que,

este tipo de ensaio se enquadra no grupo dos ensaios não-destrutivos que se podem realizar sobre peças de madeira. Na Figura 34 ilustra-se o aspeto do PUNDIT que foi utilizado nos ensaios.

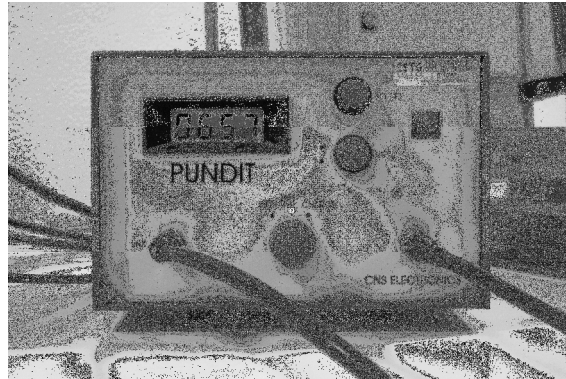


Figura 34: PUNDIT – Equipamento que emite e recebe as ondas ultrassónicas.

Existem alguns parâmetros que podem ser regulados neste equipamento tais como a voltagem e a frequência de disparo dos impulsos ultrassónicos. No caso deste trabalho, o aparelho foi regulado para uma voltagem de 500 V e para uma frequência de 10 impulsos por segundo. A este equipamento são ligadas a sonda emissora e recetora que irão emitir e receber as ondas ultrassónicas sobre a amostra de madeira ensaiada.

Osciloscópio

O osciloscópio utilizado (TDS 220 da Tektronix) é ilustrado na Figura 35.

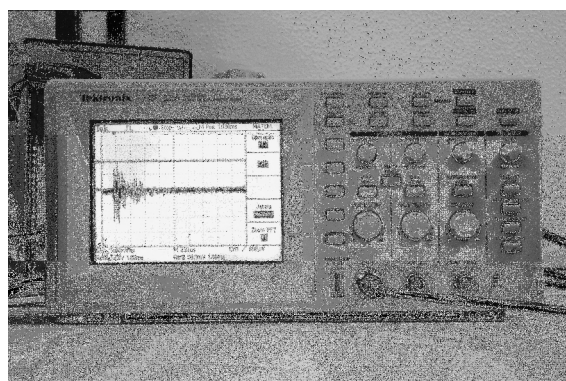


Figura 35: Osciloscópio TDS 220 – Equipamento que capta as ondas ultrassónicas recebidas e as transmite ao software WaveStar instalado num computador.

Este equipamento permitiu obter a onda captada pela sonda recetora. Foi necessário garantir uma adequada resolução da onda. No que diz respeito à frequência de amostragem que deve ser realizada no mínimo duas vezes superior à frequência em análise, segundo o critério de

Nyquist (Fitting e Adler 1981). Neste caso, as ondas foram captadas recolhendo 2500 pontos espaçados de 1 μ s, ou seja, uma frequência de amostragem de 1000 kHz.

Sonda emissora e recetora

A escolha do tipo de sondas a utilizar obedece essencialmente a dois aspetos importantes. O primeiro relaciona-se com o tipo de sondas que o fabricante do equipamento sugere, no que diz respeito à gama de frequências a utilizar. Para ensaios sobre peças de madeira, o fabricante aconselha a utilização de sondas com frequências entre 150 e 220 kHz. Por outro lado, o segundo aspeto está relacionado com a limitação do diâmetro das sondas em função da largura das lameladas das amostras. A superfície de contacto entre sonda e lamela não deve exceder a largura da lamela, pois só assim pode ser garantido que a onda ultrassónica atravessa literalmente a junta colada. De outra forma, poderá haver uma dispersão de resultados que torne a leitura e tratamento de dados bastante mais complexos.

Assim, tendo em conta os dois aspetos mencionados, optou-se pela utilização de 2 sondas planas com picos de ressonância de 200 kHz e com 20 mm de diâmetro, uma vez que a largura das lamelas, neste caso, nunca é inferior a 40 mm. Estas sondas são compostas por cristais cerâmicos piezoelétricos de zirconato/titanato de chumbo (PZT4) envoltas numa caixa cilíndrica de aço. Na Figura 36 ilustra-se o aspeto das sondas mencionadas.

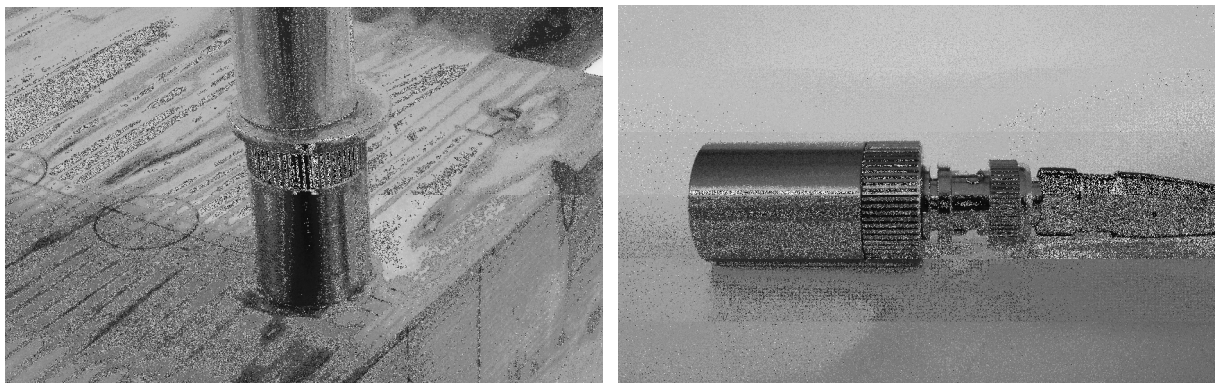


Figura 36: Sonda de 200 kHz com 20 mm de diâmetro.

Software para captura dos dados de onda

Após a emissão do sinal ultrassónico através do osciloscópio, é necessário um software específico que recolhe todos os parâmetros de onda necessários para posterior análise de dados. Neste caso foi utilizado o WaveStar™ Software for Oscilloscopes da Tektronix. Este programa serve de interface entre o osciloscópio e o computador, permitindo capturar,

visualizar, analisar, medir e documentar o sinal e forma de onda via GPIB, RS-232 ou conexões Ethernet.

4.3.2 Preparação das amostras para ensaio

Antes de serem submetidas aos ensaios com ultra-sons foi necessário realizar um conjunto de trabalhos preliminares na preparação das amostras. Numa fase inicial as amostras foram transportadas do local de armazenagem até à sala de ensaios e aí acondicionadas sobre ripas de madeira de forma a não absorverem qualquer tipo de humidade proveniente do pavimento, tal como se apresenta na Figura 37. Este cuidado é essencial, sob pena de alteração das condições de humidade das peças de madeira.

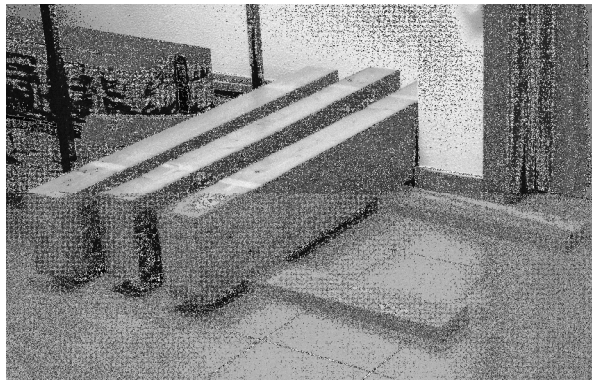


Figura 37: Acondicionamento das amostras na sala de ensaios.

Marcação das vigas

O primeiro passo a realizar na preparação das vigas foi proceder à numeração das lamelas (de L1 a L5), sendo L1 a lamela situada junto à face superior que esteve diretamente exposta à radiação solar durante o processo de envelhecimento natural. O passo seguinte foi marcar na superfície da madeira a localização das zonas da viga onde serão realizados os ensaios. No caso das vigas do tipo M, foram definidas 5 zonas de ensaio numeradas de 1 a 5, a primeira a 10 cm de um dos topos da viga e as restantes espaçadas de 25 cm. As vigas do tipo P eram um pouco mais compridas, sendo que neste caso foram definidas 7 zonas de ensaio com a mesma ordem de numeração, a primeira a 12 cm de um dos topos da viga e as restantes espaçadas de 22 cm.

Devido à exposição às intempéries, a que foram sujeitas numa fase posterior, o estado natural da superfície das vigas exigiu que em todas as zonas de medição e em ambas as faces laterais

da viga fosse passada uma lixa fina de forma a regularizar a superfície de contacto entre a sonda e a lamela, conforme se ilustra na Figura 38. Só desta forma pôde garantir-se que a emissão e receção da onda ultrassónica foi eficaz no contacto entre as sondas e a peça de madeira a ensaiar. De outra forma, poderia ocorrer alguma dispersão de onda logo no início da sua emissão.

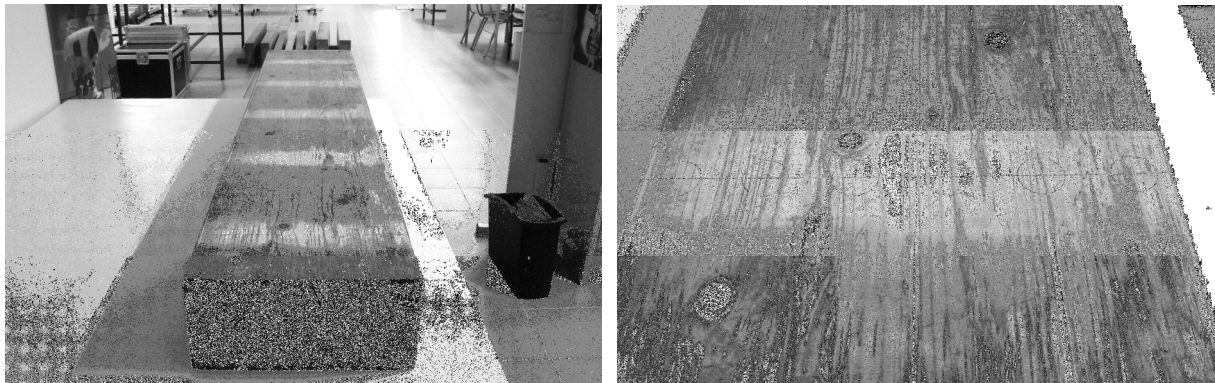


Figura 38: Preparação das vigas de madeira lamelada colada – aspeto das superfícies lixadas para contacto da sonda com as lamelas.

Só após a conclusão deste trabalho inicial foram realizadas as restantes marcações necessárias. Nesta fase, as vigas foram marcadas, quer para o ensaio com ultra-sons quer para o ensaio ao corte a realizar posteriormente.

Nas zonas de contacto da sonda com a lamela foram marcadas circunferências com 20 mm de diâmetro em ambas faces de cada lamela, de forma a garantir o correto posicionamento da sonda. Outro aspeto importante, ilustrado na Figura 39, é a marcação dos provetes quadrados para ensaio ao corte, que foi realizada no mesmo alinhamento das marcações para os ultra-sons, garantindo quem ambos os ensaios se podem relacionar. Neste caso, numa das faces superior da viga foram marcados 2 quadrados com 50 mm de lado em cada zona, que serviram posteriormente de referência à extração de provetes para o ensaio ao corte. Cada provete para o ensaio de corte foi identificado através de 4 referências, a primeira identificando o nome da viga (M4, M6, M8, M10, P5.1, P2.3, P4.3, P6.1 ou P7.1), depois o tipo de provete (bg, abreviatura de “barra grande”), de seguida a zona de ensaio (zona 1 a zona 5 ou 7) e por fim o número de ordem do provete na zona de ensaio (a ou b). Para a viga M4, na zona 2 e para o provete b, a nomenclatura será, a título de exemplo, M4.bg.z2.b.

Na Figura 39, podemos visualizar o procedimento realizado para marcação das vigas.

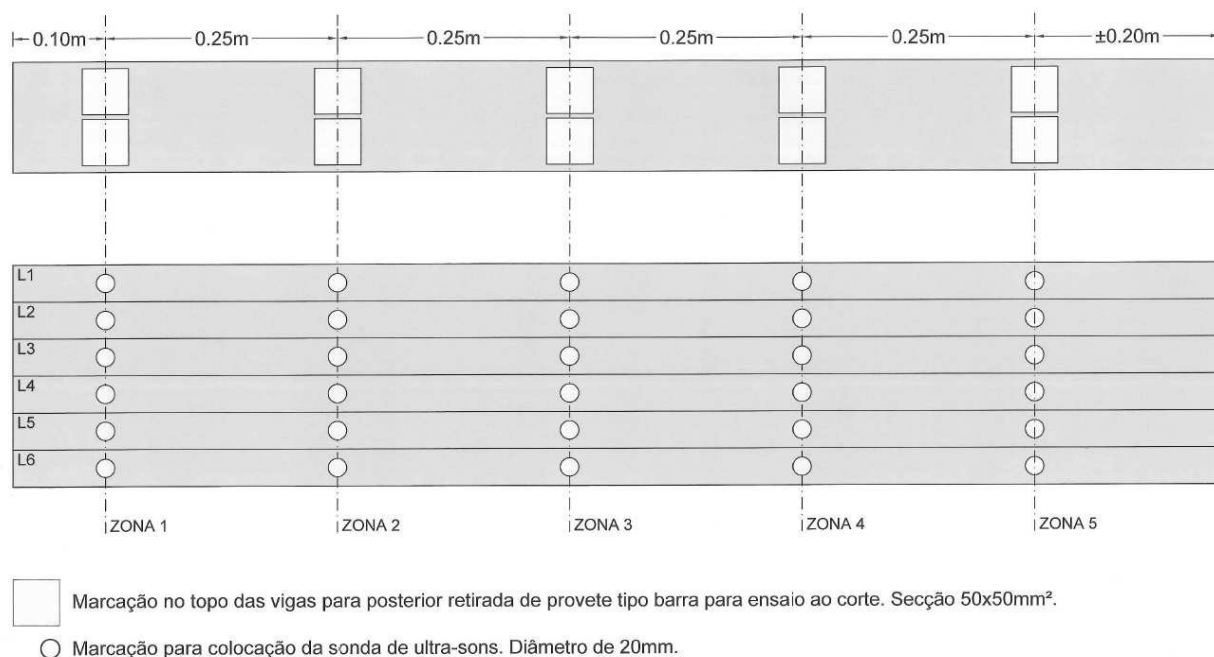


Figura 39: Procedimento de marcação das vigas para ensaio com ultra-sons e ao corte.

4.3.3 Procedimento de ensaio

O ensaio com recurso a ultra-sons requer alguns cuidados preliminares a ter em conta antes da realização das medições, para que os resultados se enquadrem dentro daquilo que são as expectativas esperadas. De seguida faz-se uma descrição de todo o processo de ensaio.

O acoplante utilizado neste trabalho é uma massa lubrificante de lítio da marca WD-40 Company. Gaspar (2010), na sua investigação, realizou alguns ensaios expeditos preliminarmente e obteve parâmetros ultrassónicos similares aos obtidos com o acoplante indicado pelo fabricante (massa lubrificante para motores de água da Castrol), confirmando dessa forma a viabilidade na utilização da massa lubrificante de lítio WD-40.

Relativamente à força que a sonda deve exercer sobre a superfície da peça de madeira de modo a garantir resultados fiáveis, o mesmo autor procedeu a uma série de ciclos de carga e descarga das sondas de uma forma expedita, o que lhe permitiu confirmar que a energia transmitida cresce com a aplicação da força até determinado nível. A partir daí, a influência da força aplicada deixa de ser importante. Nesse sentido, o autor concluiu que estes ensaios poderiam ser realizados com um nível de força aplicada constante, neste caso correspondente a uma deformação da barra metálica de apoio de 0,35 mm. Esta deformação foi monitorizada

em cada emissão de onda ultrassónica com recurso a um extensómetro conforme ilustrado na Figura 41.

Antes de se dar início à emissão das ondas ultrassónicas foi necessário calibrar o equipamento, ligando ao PUNDIT duas sondas de calibração que são colocadas com acoplante em contacto com uma barra metálica do mesmo diâmetro, conforme se ilustra na Figura 40, e ajustando o tempo que decorre entre a emissão e a receção do sinal. Esta calibração foi realizada antes do início de cada lote de ensaios.



Figura 40: Calibração das sondas para ensaio com ultra-sons.

As sondas utilizadas no ensaio (diferentes das sondas de calibração) foram apertadas contra a viga de madeira com a ajuda de uma estrutura de ensaio disponível no laboratório. Esta estrutura permite fixar e regular a amostra de modo a que a marcação do contato da sonda com a madeira fique devidamente alinhada, permitindo ainda fixar a sonda emissora e recetora sobre a amostra de madeira e fixar também o extensómetro que controla a força de aplicação das sondas. Na Figura 41 ilustra-se nas duas imagens à esquerda a colocação das sondas sobre a viga e nas duas imagens à direita o extensómetro e o seu posicionamento na estrutura de ensaio.

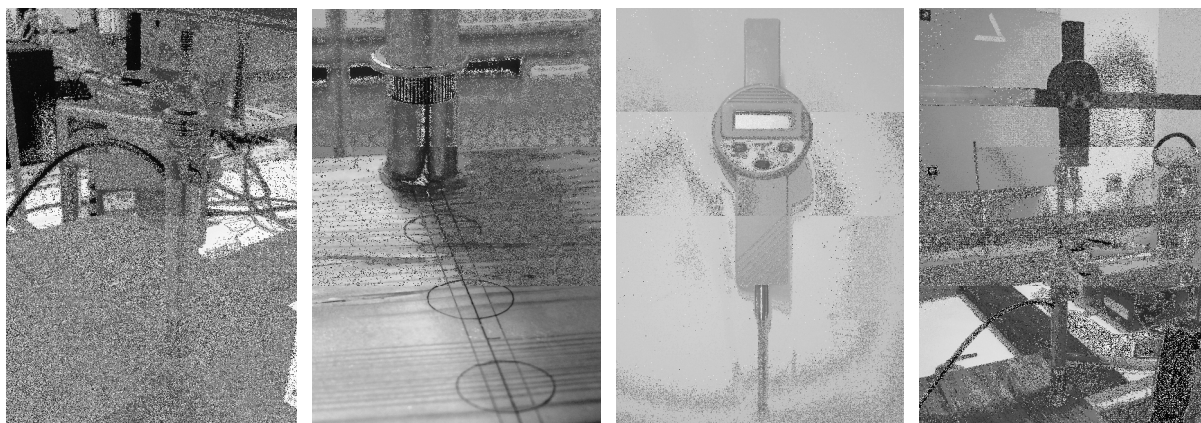


Figura 41: Colocação das sondas sobre as marcações efetuadas previamente nas duas imagens à esquerda e regulação da pressão de aplicação da força através do extensómetro à direita.

As medições foram efetuadas seguindo sempre o mesmo procedimento de forma a assegurar a comparabilidade dos resultados. Nesse sentido, as ondas foram captadas para cada junta, colocando as sondas em faces opostas (a emissora na face superior da viga e a recetora na face inferior) de modo a que a onda emitida seja captada em lados opostos da junta. Foi ensaiado um lado da viga nas suas várias zonas de uma vez, rodando depois a viga 180° e fazendo a medição na mesma face mas com cruzamento de onda no sentido inverso. Na Figura 42 apresenta-se a sequência do ensaio numa zona de medição onde para cada junta serão realizadas medições em duas direções diferentes, abreviadamente designadas por 1-2 até 5-6 e 2-1 até 6-5, no caso das vigas com 6 lamelas. Para cada uma das direções foram recolhidos os dados de 3 ondas, sendo posteriormente adotado uma média aquando da análise de resultados. No total, foram recolhidas 1338 ondas ultrassónicas fruto do ensaio das 10 vigas de madeira lamelada colada.

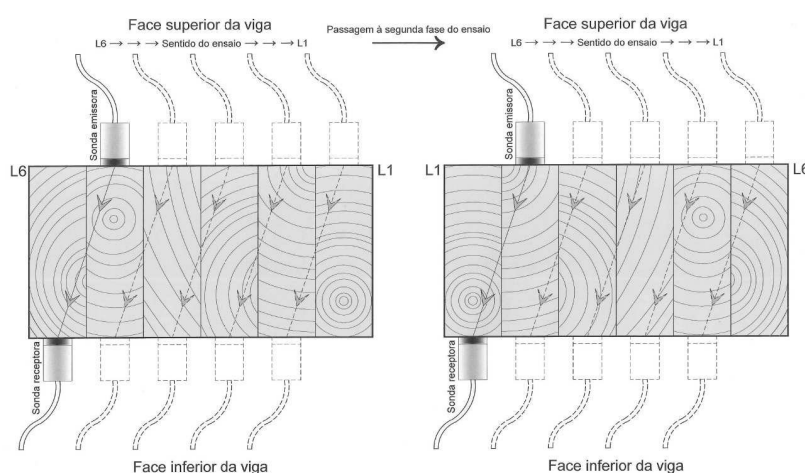


Figura 42: Procedimento de medição em cada zona da viga a ensaiar.

Os dados das ondas ultrassónicas recolhidas foram captados pelo software WaveStar™, que organizou um ficheiro para cada direção de emissão de onda em cada junta e em cada zona de medição. Posteriormente, esses dados foram tratados e analisados no software MS-Office™ Excel.

4.4 Ensaios para avaliação de resistência ao corte

4.4.1 Considerações iniciais

A norma europeia que regula os ensaios ao corte sobre provetes de madeira lamelada colada é a EN 392 (1995). Todas as peças de madeira lamelada colada são sujeitas a ensaios (ensaios ao corte e/ou de delaminação com extração de amostras) com vista ao controlo da sua qualidade e obtenção da marcação CE após o fabrico. Esta norma define vários aspetos a considerar, nomeadamente a forma dos provetes – quadrados (denominados por barras) ou cilíndricos (denominados por carotes). O primeiro tipo de provete é usualmente extraído a partir dos topos das peças de madeira lamelada colada, após o fabrico, enquanto o segundo tipo de provete será mais adequado para ensaiar juntas coladas de estruturas em serviço, uma vez que, neste caso, as amostras poderão ser retiradas em qualquer ponto do elemento. Como facilmente se percebe, a remoção do primeiro tipo de provete (barra quadrada) raramente é possível sobre estruturas em serviço, uma vez que pressupõe a extração de uma parte significativa da secção transversal do elemento, colocando em causa o seu funcionamento estrutural.

Na Figura 43 ilustra-se o esquema dos tipos de provetes que poderão ser extraídos em madeira lamelada colada.

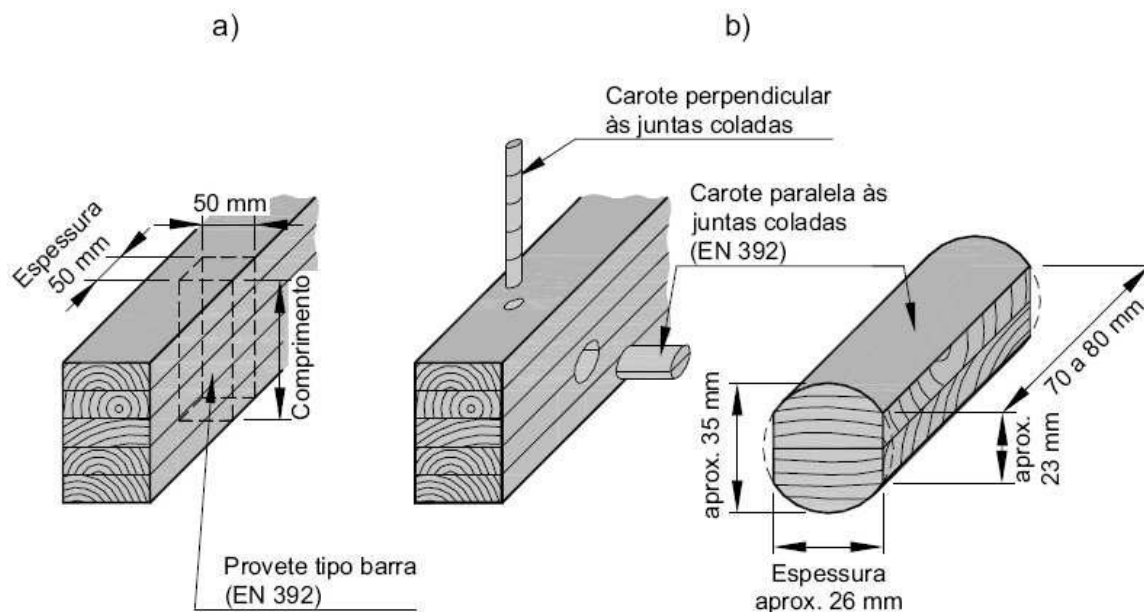


Figura 43: Tipos de provetes em madeira lamelada colada: a) Provete tipo barra, b) Carotes (Gaspar 2010).

A extração de provetes do tipo barra de acordo com a EN 392 (1995) deverá ser realizada perpendicularmente à face superior da peça de madeira, para que todas as juntas sejam intersectadas pelo provete (Figura 43a).

No caso das carotes, a mesma norma define que a sua extração deverá ser realizada perpendicularmente à face da peça de forma que a junta colada fique situada no meio da carote (Figura 43b). Em ambos os tipos de provete, a aplicação da carga para ensaio ao corte é feita na direção longitudinal (paralela às fibras).

Para avaliação *in situ* os provetes podem, em alternativa, ser extraídos perpendicularmente às juntas coladas. Desta forma, com apenas um carote consegue-se ter a amostra de todas as juntas coladas nessa secção e portanto com um impacto muito menor na resistência dos elementos a inspecionar (Gaspar 2010).

4.4.2 Material e procedimento de ensaio

Após o ensaio de todas as vigas com recurso aos ultra-sons, foi necessário extrair de cada uma delas uma série de provetes do tipo barra com as características definidas pela norma EN 392 (1995), ou seja, barras quadradas com 50 mm de lado, para ensaio ao corte. Aquando a sua extração foi verificada a perpendicularidade do corte com a serra de mesa bem como as

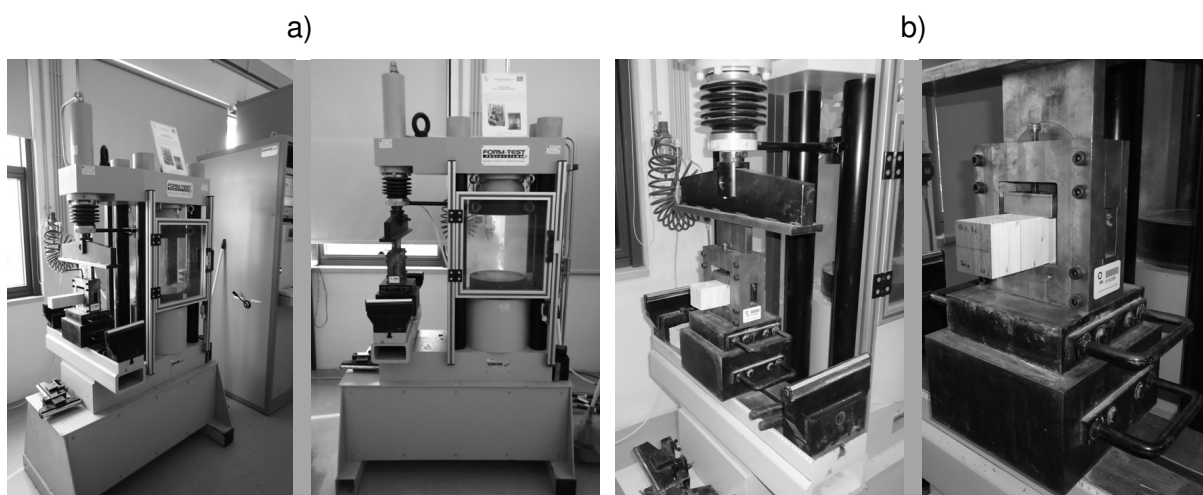
dimensões da secção, de modo a que a variação das suas dimensões não fosse além de ± 1 mm. Na generalidade esta variação foi de apenas 0,5 mm.

Para as vigas do tipo M foram extraídos 12 provetes e para as vigas do tipo P foram extraídos 14 provetes para ensaio ao corte.

As amostras foram acondicionadas de modo a manter as condições de humidade relativa estáveis. Este aspeto é bastante importante porque pode influenciar o peso da amostra durante o ensaio de corte e alterar o teor de água, valor muito importante na posterior correção da resistência ao corte pela madeira e pela junta colada.

Na realização dos ensaios pela junta colada deverá ter-se o cuidado de verificar a distância máxima de 1 mm entre a junta e o plano de corte permitida pela EN 392 (1995). Nos ensaios de corte pela madeira, o plano de corte foi definido ao meio da espessura de cada lamela. Nesse sentido, antes de submeter as amostras a ensaio, foi necessário proceder à marcação quer dos centros das lamelas quer da localização das juntas no caso das amostras com cola MUF, uma vez que na generalidade dos casos é difícil distinguir a junta colada. No caso das amostras com cola PRF a junta colada apresenta uma tonalidade escura bem vincada, não deixando margem para qualquer dúvida.

As barras extraídas foram depois ensaiadas de acordo com o esquema apresentado na Figura 44c, no dispositivo de corte (Figura 44b), o qual foi colocado entre os pratos do equipamento de ensaio que existe no laboratório da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria e submetido à compressão (ver Figura 44a).



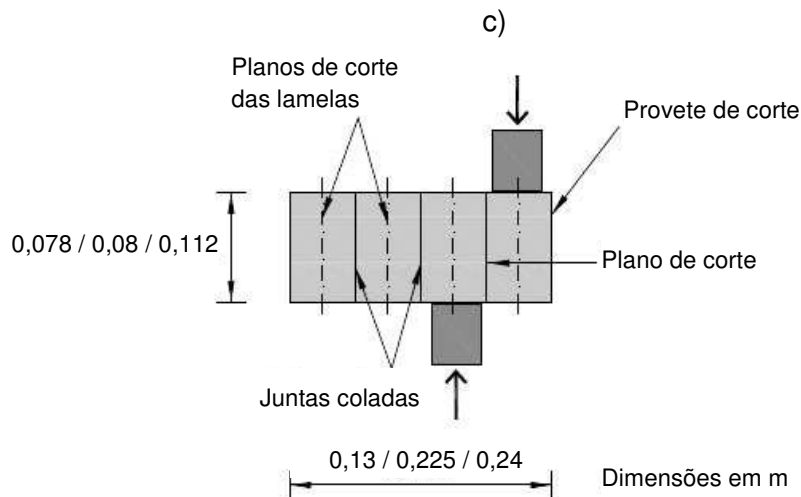


Figura 44: Aspeto do equipamento a utilizar nos ensaios de corte: a) Equipamento para ensaios de compressão e flexão, b) Dispositivo para ensaios de corte, c) Esquema do ensaio de corte.

O equipamento é controlado através de um Software específico incorporado no equipamento, o Proteus. Antes do início do ensaio, foi necessário definir a sequência do teste neste programa.

Após estabelecer a sequência do teste, foi feito um levantamento e registo de defeitos das amostras, tais como fendas, nós, bolsas de resina e fenómenos de delaminação da junta colada, que possam interferir no desempenho da madeira e da junta colada durante o ensaio. Foi também feita a medição das dimensões transversais das amostras (no sentido do fio da madeira e no plano radial). Antes de submeter as amostras a ensaio foi ainda necessário pesá-las de forma a obter a massa volúmica da madeira.

Depois de realizados estes passos iniciais deu-se início ao ensaio, colocando as amostras no dispositivo de corte de acordo com a Figura 44c, com o plano de corte no sentido do fio da madeira (Figura 45).

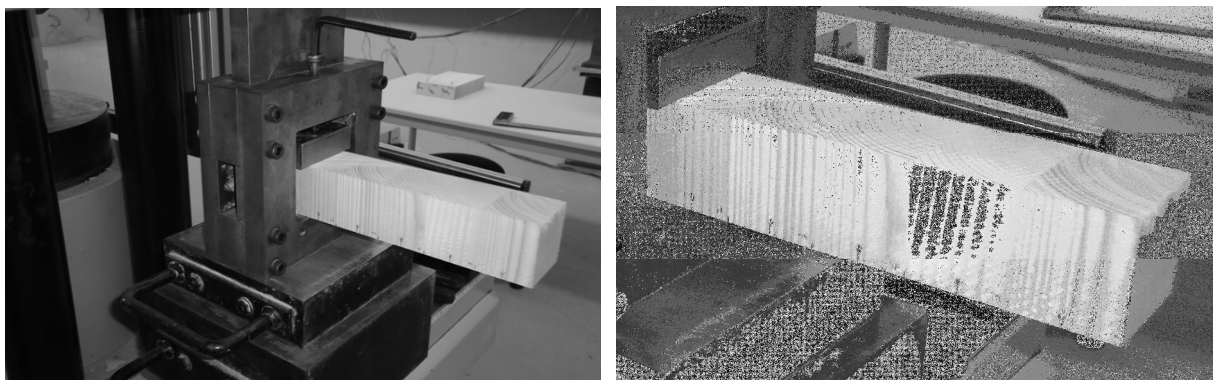
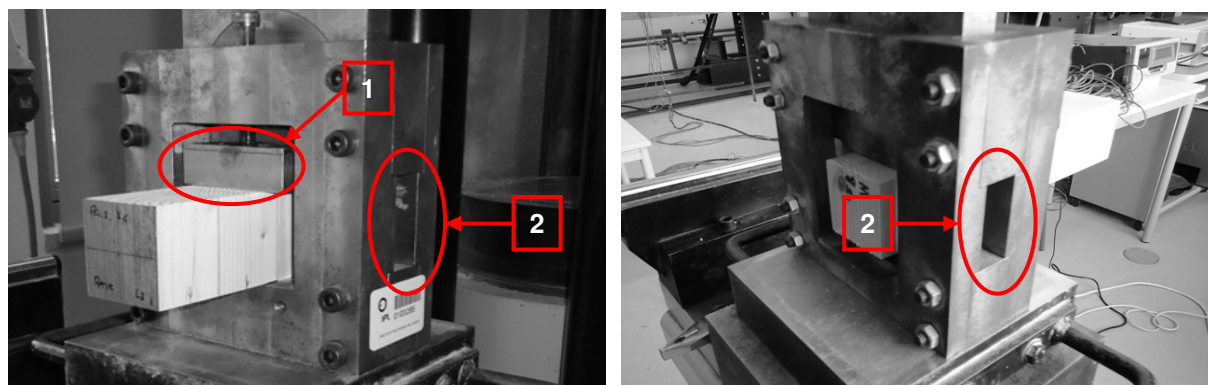


Figura 45: Colocação da amostra no dispositivo de corte, com plano de corte no sentido do fio da madeira.

O dispositivo de corte utilizado permite ter total acesso visual ao plano de corte, condição necessária para garantir o correto posicionamento da amostra no dispositivo. Além disso, um elemento apropriado de fixação da amostra permitiu um total aperto da amostra para que esta não tivesse qualquer tipo de deslocamento durante o ensaio (Figura 46).



1 – Elemento de fixação | 2 – Abertura lateral para visualização do plano de corte

Figura 46: Dispositivo para ensaio ao corte das amostras de madeira lamelada colada.

Em cada provete os planos de corte foram estabelecidos de forma a medir a resistência ao corte da junta colada e da madeira. Nalguns casos não foi possível ensaiar todos os planos de corte porque existiu interferência com o plano de corte adjacente. Procurou-se obter a resistência de maior número de juntas coladas possível, uma vez que eram esses os dados necessários para cruzar com os ensaios com ultra-sons. Nesse sentido, adotou-se ensaiar sempre a primeira junta colada, e a partir daí ir ensaiando consoante a interferência dos planos de rotura sobre os planos de corte seguintes.

Após o ensaio procurou-se avaliar as situações que pudessem constituir *outliers*, nomeadamente devido a:

- ✓ Interferência do plano de rotura sobre o plano de corte da lamela de madeira ou junta colada adjacente, consoante o caso;
- ✓ A presença de *finger joint* no plano de corte;
- ✓ Espessura dos anéis de crescimento elevada;
- ✓ Presença de defeitos naturais da madeira que interfiram com os planos de corte, nomeadamente, fendas, bolsas de resina e nós.

Numa análise que se fez a alguns casos, a interferência do plano de rotura com o plano de corte adjacente em 19 planos de rotura pela madeira de corte terá levado à redução da

resistência ao corte em cerca 44,5% e pela junta colada em cerca de 65,8% (em 6 juntas coladas), em termos médios.

Verificou-se também que, a espessura dos anéis de crescimento da madeira parece ter influenciado a resistência da madeira e da junta colada. A produção de madeira difere de acordo com a época do ano. Na primavera, as células formadas são mais largas, com paredes mais finas, resultando em madeira menos densa, menos resistente, mais clara e mais acessível à água. Durante o verão, outono e inverno, por outro lado, as novas células criadas são menores e suas paredes celulares são mais espessas. Consequentemente, a madeira formada é mais densa, escura e resistente e menos permeável. Esta alternância de células menos densas e mais densas forma os anéis de crescimento. A camada formada durante a primavera, denominada lenho inicial, primaveril ou madeira de primavera, aparece como uma faixa mais clara, ao passo que a camada originada no verão, chamada de lenho tardio, estival ou madeira de verão, pode ser vista como uma região mais escura.

Assim, quanto menor for a espessura dos anéis de crescimento, maior foi a resistência da madeira e da junta colada, uma vez que existe menos lenho primaveril (lenho menos denso, logo menos resistente). Nesse sentido, detetaram-se algumas situações onde a espessura dos anéis de crescimento eram mais largos do que nos restantes casos, tendo levado a uma redução considerável da resistência, em média de 55,2% na junta colada (em 3 planos de rotura) e de 26,0% na madeira (em 4 planos de rotura).

Relativamente aos defeitos naturais, verificou-se que a presença de fendas, bolsas de resina ou nós está associada a um decréscimo da resistência pela madeira em 42,4% (em 9 planos de rotura) e pela junta colada em 38,9% (em 12 planos de rotura). De facto, foi visível que a presença de nós em juntas coladas afeta bastante a sua resistência na medida em que apresenta uma superfície de corte maioritariamente pela junta colada, evidenciando fraca aderência à madeira.

Após registados todos os valores de resistência obtidos para as juntas coladas e para a madeira, as amostras foram pesadas novamente. De seguida, todas as amostras foram colocadas em estufa para secagem a 103°C durante um período mínimo de 24 horas. Este processo teve como objetivo obter o teor de água das amostras durante o ensaio.

Concluídos estes ensaios, foi determinada a percentagem de rotura pela madeira de cada junta colada. Essa percentagem foi depois arredondada aos 5% mais próximos, conforme descrito na norma EN 392 (1995). Nas vigas de madeira do tipo P, a cola utilizada foi fenol-ressorcinol-formol (PRF) e nesse caso a determinação da percentagem de rotura pela madeira foi facilitada pela cor distinta que estas apresentam em relação à cor da madeira. A cola apresenta uma coloração quase preta e a madeira uma cor quase branca. As zonas de tom alaranjado são zonas a rotura é repartida pela cola e pela madeira. Na Figura 47 apresentam-se alguns exemplos onde a distinção entre cores é bastante evidente.



Figura 47: Exemplos do aspeto das juntas coladas com PRF após ensaio de corte.

Nas vigas do tipo M, a utilização da cola de melamina-ureia-formol (MUF) torna a mesma verificação impossível dessa forma. Nesse caso foi utilizado um indicador de PH, que demonstrou ser adequado para este efeito (Dibuz e Shelton 1967; Gibson e Kraemer 1980; Künniger 2008) em colas de ureia-formol, melamina-formol e melamina-ureia-formol dada a diferente colocação obtida entre a madeira e a cola, com a seguinte formulação:

0,25 g de alaranjado de metilo	50 ml de etanol
0,25 g de verde de bromocresol	25 ml de água destilada
0,01 g de carmim de índigo	-

A preparação desta solução foi realizada no Laboratório de Química da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria (ESTG). Numa primeira abordagem, a solução foi preparada adicionando o alaranjado de metilo, o verde de bromocresol e o carmim de índigo ao etanol ao qual, posteriormente, foi adicionada a água destilada. No entanto, verificou-se que o alaranjado de metilo teve bastante dificuldade em se dissolver no etanol, uma vez que a água destilada vai primeiramente preencher os espaços vazios do etanol e só depois reagir com os restantes componentes. Foi necessário muito tempo de mistura e elevar um pouco a temperatura da solução. Ainda assim, no final, a solução continha alguns resíduos não totalmente diluídos.

Assim, numa segunda solução, optou-se por dissolver isoladamente o alaranjado de metilo num pouco de água destilada, elevando um pouco a temperatura de mistura e, noutro recipiente, dissolver o verde de bromocresol no etanol e juntar posteriormente o carmim de índigo. Por fim, adicionou-se o alaranjado de metilo dissolvido em água destilada preparado à parte. Verificou-se que deste modo a solução ficou totalmente dissolvida. Na Figura 48 apresentam-se algumas imagens da preparação da solução.



Figura 48: Preparação da solução para o indicador de PH.

Aplicando esta solução com um pincel sobre as superfícies de rotura das juntas coladas com cola MUF, o indicador de PH revelou um contraste bastante vincado entre as superfícies que correspondem a madeira e a cola. No caso da cola, o indicador revelou uma cor esverdeada, sendo alaranjada a vermelha no caso da madeira. Na Figura 49, apresentam-se alguns exemplos de superfícies pintadas com esta solução onde facilmente se percebe esta distinção.

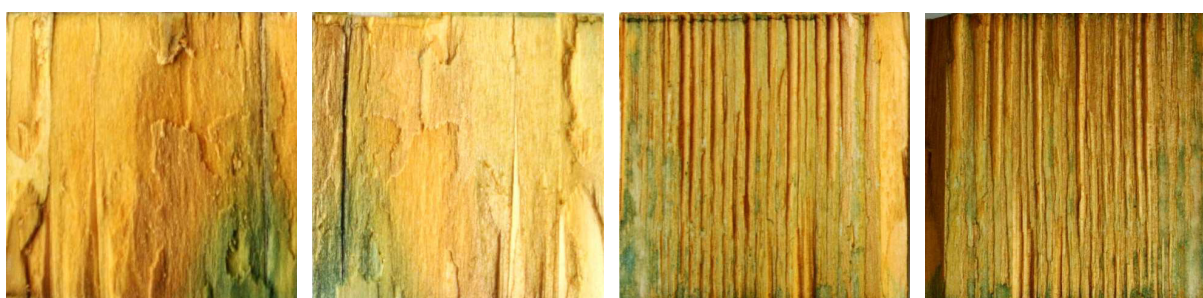


Figura 49: Exemplos de juntas coladas com MUF pintadas com o indicador de PH após o ensaio de corte, para determinação da percentagem de rotura pela madeira.

A percentagem de rotura pela madeira foi medida utilizando um método de medição visual, colocando as imagens da Figura 50 sobre as superfícies de rotura. Com estas imagens conseguiu-se estimar a percentagem de rotura pela madeira fazendo corresponder cada espaço

à rotura pela cola ou pela madeira. No primeiro caso, cada coluna corresponde a uma percentagem de 10% da superfície total de rotura (secção 50 x 50mm²), no segundo a 5%, no terceiro cada espaço corresponde a 5% e no quarto a 2,5%.

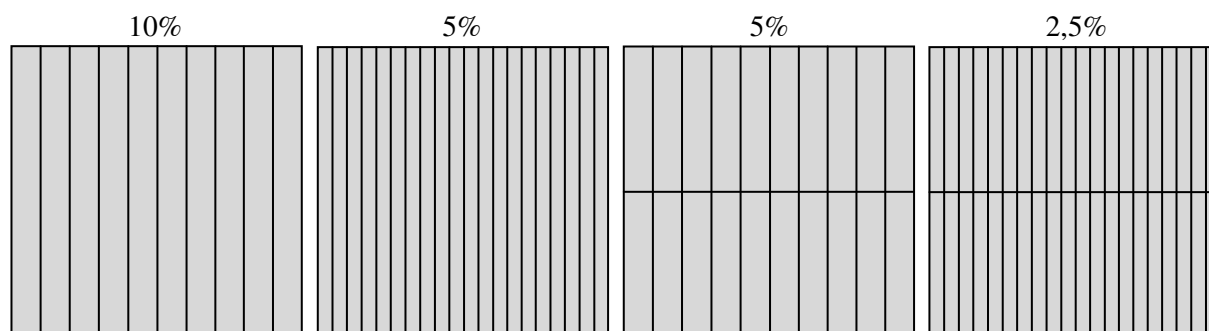


Figura 50: Imagens utilizadas para medição da percentagem de rotura pela madeira.

4.5 Resultados dos ensaios ao corte

Com este capítulo pretende-se apresentar os resultados obtidos e discutir as principais conclusões que daí se podem retirar. Conforme já foi referido anteriormente, os ensaios de corte foram realizados de acordo com a norma europeia que regula este tipo de ensaios sobre peças de madeira, a EN 392 (1995).

No Quadro 4.2 apresenta-se o teor de água durante o ensaio, determinado com base nos dados relativos à massa das amostras.

Quadro 4.2 – Massa volúmica e teor de água médios de cada viga ensaiada.

Tipo de madeira lamelada colada	Viga	Tempo de envelhecimento (meses)	Massa volúmica (kg/m ³)	Teor de água ensaio (%)
M, com envelhecimento	M4	12	474,47	12,7
	M6	18	484,45	13,0
	M8	24	472,52	12,7
	M9	26	477,56	12,8
	M10	30	469,32	12,7
	Valores médios	-	475,7	12,8
M, sem envelhecimento	M4_ini	-	493,09	13,3
	M6_ini	-	493,18	13,7
	M8_ini	-	467,60	13,5
	M9_ini	-	476,33	13,8
	M10_ini	-	490,95	13,3
	Valores médios	-	484,2	13,5
P, com envelhecimento	P5.1	12	404,63	12,0
	P2.3	18	463,88	12,7
	P4.3	24	450,09	12,7
	P6.1	12	461,17	12,5
	P7.1	24	512,65	12,4
	Valores médios	-	458,5	12,5

Para os provetes com envelhecimento e cola MUF, o teor de água para todas as amostras variou entre 12,7% e 13%, com média de 12,8%. Para provetes com envelhecimento e cola PRF, o teor de água das amostras variou entre 12,0% e 12,7%, com média de 12,5%. Já para os provetes sem envelhecimento, o teor de água foi ligeiramente superior, situado entre 13,3% e 13,8% com média de 13,5%. É possível denotar que, para os provetes sem envelhecimento, o teor de água foi sempre um pouco superior, pelo que se procedeu à correção do valor da resistência ao corte de 3% por cada variação unitária do teor de água, conforme sugerido por Mateus (1961).

No Quadro 4.3 apresenta-se um resumo dos valores médios da resistência o corte da madeira e da junta colada e da percentagem de rotura pela madeira obtidos para cada viga. Apresenta-se ainda os valores médios obtidos para os diferentes tipos de provetes ensaiados, provetes de Espruce com cola MUF com e sem envelhecimento natural e provetes de Espruce com cola PRF. No Anexo I apresenta-se uma listagem detalhada dos valores de resistência ao corte e da percentagem de rotura pela madeira obtidos para cada tipo de viga ensaiada.

Quadro 4.3 – Resultados dos ensaios de corte para provetes com e sem envelhecimento natural.

Tipo de madeira lamelada colada	Viga	Tempo de envelhecimento (meses)	Resistência da junta colada			% de rotura pela madeira	Resistência da madeira		
			N.º de valores	Média (MPa)	Desvio Padrão (Mpa)		N.º de valores	Média (MPa)	Desvio Padrão (Mpa)
M, com envelhecimento	M4	12	50	10,2	1,6	91,7	60	11,8	2,0
	M6	18	50	10,3	1,3	97,3	60	11,3	1,2
	M8	24	50	9,5	1,4	95,3	60	10,5	1,3
	M9	27	47	9,6	1,9	92,7	60	11,4	1,5
	M10	30	50	9,9	1,7	91,5	60	11,6	1,6
Valores médios		-	-	9,9	1,6	93,7	-	11,3	1,5
M, sem envelhecimento	M4.ini	-	20	10,5	2,1	86,7	24	13,1	1,7
	M6.ini	-	20	11,0	1,2	95,1	24	12,3	1,2
	M8.ini	-	20	9,8	1,1	92,6	24	11,4	0,8
	M9.ini	-	17	10,5	1,5	92,4	21	12,7	1,6
	M10.ini	-	20	10,0	1,4	90,4	24	11,7	1,5
Valores médios		-	-	10,4	1,5	91,4	-	12,2	1,4
P, com envelhecimento	P5.1	12	14	9,7	1,1	84,5	21	10,2	2,0
	P2.3	18	14	9,6	0,7	88,0	21	10,0	1,1
	P4.3	24	14	11,2	1,1	88,3	21	10,6	1,0
	P6.1	12	28	9,4	1,7	92,1	35	10,9	2,0
	P7.1	24	28	9,9	1,6	92,2	35	12,0	1,8
Valores médios		-	-	10,0	1,2	89,0	-	10,7	1,6

Numa primeira análise é visível que entre os provetes com envelhecimento com cola MUF e PRF as resistências médias obtidas, quer para a madeira quer para a junta colada, são semelhantes. Numa análise mais aprofundada observa-se que, no caso da resistência pela junta colada, os resultados da viga P4.3, com 24 meses de envelhecimento, foram bastante superiores quando comparados com as restantes vigas com cola PRF. No caso da resistência pela madeira, dentro do mesmo lote de vigas, a viga P7.1, também com 24 meses de envelhecimento, apresenta também valores médios bastante superiores às restantes, assim como a viga M8, com 24 meses de envelhecimento, do lote de vigas com cola MUF, que neste caso apresenta resultados médios nitidamente inferiores às restantes. Se, no primeiro caso, para a viga P7.1 o aumento da resistência pela madeira poderá ser justificada por uma massa volúmica claramente superior às restantes vigas, o mesmo não se passa no caso da viga M8, onde a massa volúmica é até superior a outras vigas com maior resistência pela madeira.

Os resultados verificados são bastante consistentes com os apresentados por Gaspar (2010), que para provetes com as mesmas características, obteve valores de resistência pela madeira de 9,9 MPa e 9,3 MPa para madeira de Espruce envelhecido com cola MUF e PRF respetivamente e de 11,3 MPa e 10,6 MPa em termos de resistência pela junta colada.

Como se pode observar em termos de percentagem de rotura pela madeira, é nas amostras com cola MUF que este valor é maior, indo de encontro com a hipótese avançada anteriormente, ou seja, para valores de resistência de junta colada superiores, a percentagem de rotura pela madeira também é maior, uma vez que existe uma clara tendência para a rotura se dar pela madeira e não pela junta.

Verifica-se também que o envelhecimento natural tem um efeito dentro do que seria de esperar. Em todos os ensaios realizados, o envelhecimento natural conduziu a uma diminuição da resistência da madeira e da junta colada. Por outro lado, a percentagem de rotura pela madeira aumentou, o que poderá ser devido à eventual perda de resistência da madeira. Ao diminuir a sua resistência pelo envelhecimento, haverá uma tendência natural para a rotura se dar pela madeira e não pela junta colada. Ainda que o efeito do envelhecimento recaia também sobre a junta colada, em termos médios percentuais verificou-se que a resistência da junta colada diminuiu 4,6% enquanto a resistência da madeira diminuiu 8,1%. Na Figura 51 constata-se isso mesmo. Na apresentação dos resultados optou-se por utilizar as seguintes designações abreviadas:

- ✓ SW bg – Resistência média ao corte da madeira de provetes com envelhecimento;
- ✓ SW bg_ini - Resistência média ao corte da madeira de provetes sem envelhecimento;
- ✓ SG bg – Resistência média ao corte da junta colada de provetes com envelhecimento;
- ✓ SG bg_ini – Resistência média ao corte da junta colada de provetes sem envelhecimento;
- ✓ WFP bg – Percentagem de rotura pela madeira de provetes com envelhecimento;
- ✓ WFP bg_ini - Percentagem de rotura pela madeira de provetes sem envelhecimento.

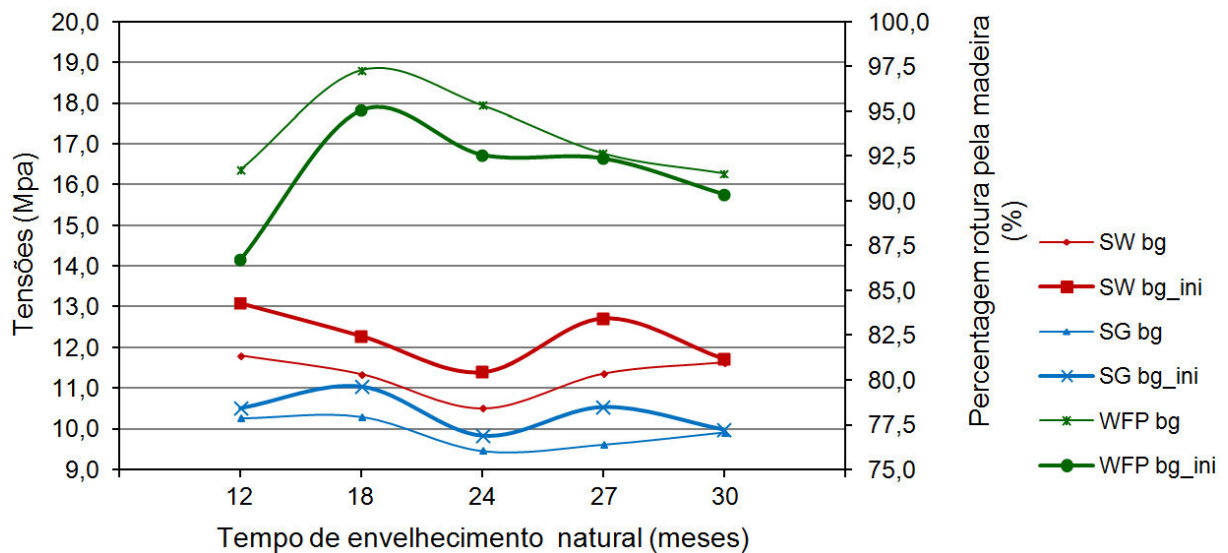


Figura 51: Valores médios de resistência ao corte e percentagem de rotura pela madeira dos provetes de madeira lamelada colada de Espruce com cola MUF, com e sem envelhecimento natural.

Como podemos observar, para todas as vigas a resistência da madeira (SW bg) e da junta colada (SG bg) é inferior para os provetes com envelhecimento. Já a percentagem de rotura pela madeira é superior (WFP bg). Além disso, observa-se ainda que os valores da resistência seguem a mesma tendência. Se a resistência pela madeira diminui, o mesmo acontece com a resistência pela junta, ainda que, como já foi mencionado, em menor percentagem, e vice-versa.

Na Figura 52 apresenta-se um gráfico com os resultados obtidos para o material envelhecido de madeira lamelada colada de Espruce com cola MUF, onde se apresentam os quocientes da SW (resistência pela madeira, em MPa), SG (resistência pela junta colada, em MPa) e WFP (percentagem de rotura pela madeira, em %) entre provetes envelhecidos e não envelhecidos e ainda a MV (massa volúmica, em kg/m^3) dos provetes envelhecidos.

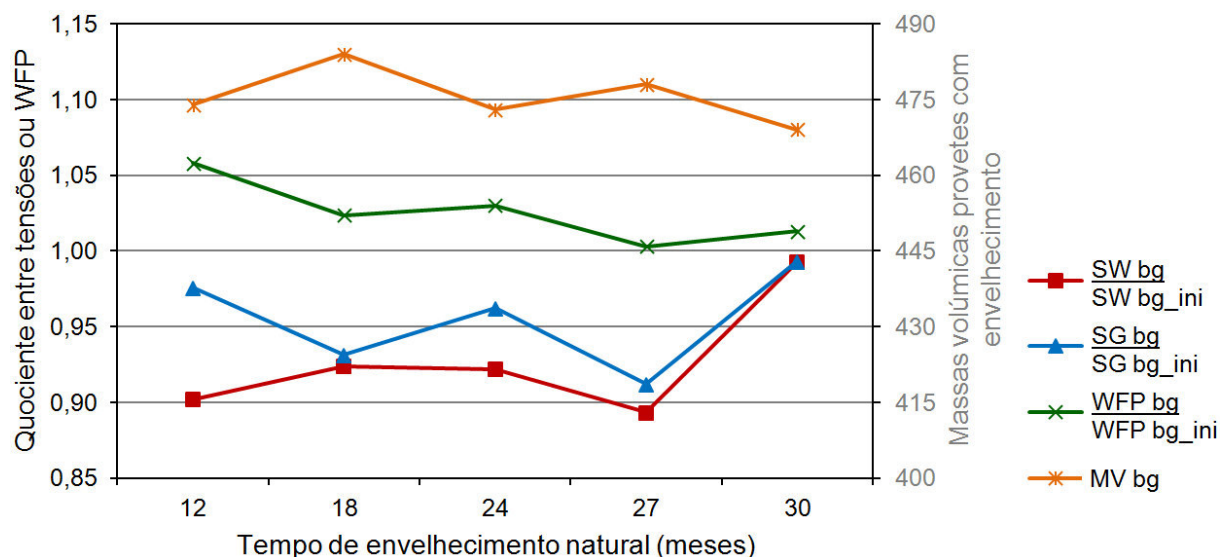


Figura 52: Resultados dos ensaios de corte em provetes de madeira lamela colada de Espruce com cola de MUF envelhecida naturalmente.

Como se pode observar, e se pode constatar mais em pormenor no gráfico da Figura 51, o valor médio da SW e da SG dos provetes tipo bg (com envelhecimento) é sempre menor do que a resistência dos provetes bg_ini (sem envelhecimento) durante todo o período de envelhecimento, dado que o quociente entre as duas resistências é inferior a 1. No caso particular da SW, o decréscimo nos primeiros 27 meses de envelhecimento não é significativo, pelo que a descida dos valores médios poderá estar relacionada com a natural variabilidade da madeira e em alguns casos de um menor valor de MV. Aliás, a massa volúmica das amostras parece ter influenciado quer a SW, quer a SG e a WFP, uma vez que com o decréscimo da MV parece existir a tendência para aumento da SG e da SW e diminuição da WFP.

Para os 18 meses e sobretudo para os 27 meses de envelhecimento a descida do valor médio da SG é bastante acentuado (4,7 a 5,5%), o que poderá estar relacionado com a diminuição da SW, também evidente (3,2%) e com eventuais defeitos de colagem.

A descida da SG para os 24 meses de envelhecimento foi mais baixa, podendo estar relacionada com um aumento da massa volúmica dos provetes envelhecidos. Ainda relacionado com a massa volúmica, ao longo do processo de envelhecimento, observa-se que existe uma relação assimétrica entre esta e a WFP. De facto, os resultados parecem ser consistentes com a teoria de que uma maior massa volúmica diminui a percentagem de rotura pela madeira e vice-versa. No entanto, aos 27 meses esta teoria parece não ser tão evidente,

mas neste caso existe também um decréscimo evidente da SW, que irá naturalmente aumentar a WFP.

Os resultados médios observados para a WFP têm uma tendência decrescente, aumentando apenas aos 24 e 30 meses de envelhecimento, mas de uma forma muito ligeira (menos de 1%). Além disso, de uma forma grosseira, parecem ser consistentes com a variação da SW e da MV, ou seja, aumentando com a diminuição da SW ou vice-versa, podendo ainda ser influenciados pela MV mas neste caso, em menor grau. Por exemplo, para os 18 meses de envelhecimento é notório que a diminuição da WFP surge a par do aumento médio da SW, afetada ainda pelo aumento da MV.

Concluindo, os resultados obtidos parecem indicar uma redução efetiva da resistência nos provetes com 27 meses de envelhecimento. Por outro, nos provetes com 30 meses de envelhecimento a existência de vestígios de degradação pode ser considerada duvidosa, uma vez que o quociente entre tensões dos provetes com e sem envelhecimento releva que o envelhecimento não afetou a resistência média quer da SW quer da SG.

Para os 18 meses de envelhecimento parece existir uma diminuição do valor médio da SG eventualmente associado a algum defeito de fabrico da junta colada. Já para os 12 e 30 meses de envelhecimento o mesmo não se verifica, a resistência da junta colada parece não ter sido afetada, e nesse caso o quociente de tensões é muito próximo de 1, sobretudo para os 30 meses.

Na maioria dos casos, o decréscimo ou acréscimo da SG é quase sempre acompanhado de igual forma pelo decréscimo ou acréscimo da SW, indiciando que a degradação da madeira existe em paralelo com a degradação da junta colada. Assim, a perda de resistência da junta colada parece ser, de um modo geral, também devida à perda da resistência da madeira e não apenas da sua própria degradação.

No caso das vigas de madeira lamelada colada de Espruce com cola PRF a resistência inicial foi obtida com recurso a duas equações apresentadas por Gaspar (2010) que, ao estudar a variação da resistência ao corte e da percentagem de rotura pela madeira com a massa volúmica na madeira lamelada colada de Espruce, com cola PRF, antes do envelhecimento, estabeleceu duas retas de regressão linear com coeficientes de correlação bastante elevados.

Na Figura 53, apresenta-se o gráfico obtido pelo autor, onde apresenta também as equações mencionadas.

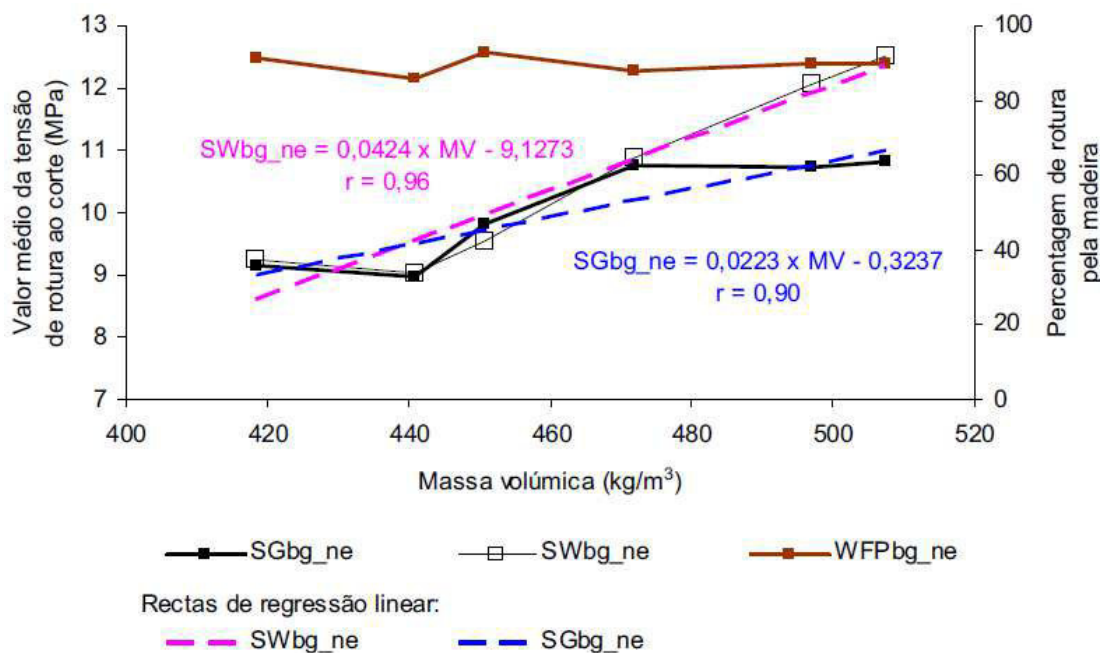


Figura 53: Variação da resistência ao corte e da percentagem de rotura pela madeira com a massa volúmica na madeira lamelada colada de Espruce, com cola de PRF, antes do envelhecimento (Gaspar 2010).

Aplicando as mesmas equações na determinação da resistência inicial para as vigas de madeira lamelada colada de Espruce com cola PRF ensaiadas neste trabalho, obteve-se o gráfico apresentado na Figura 54.

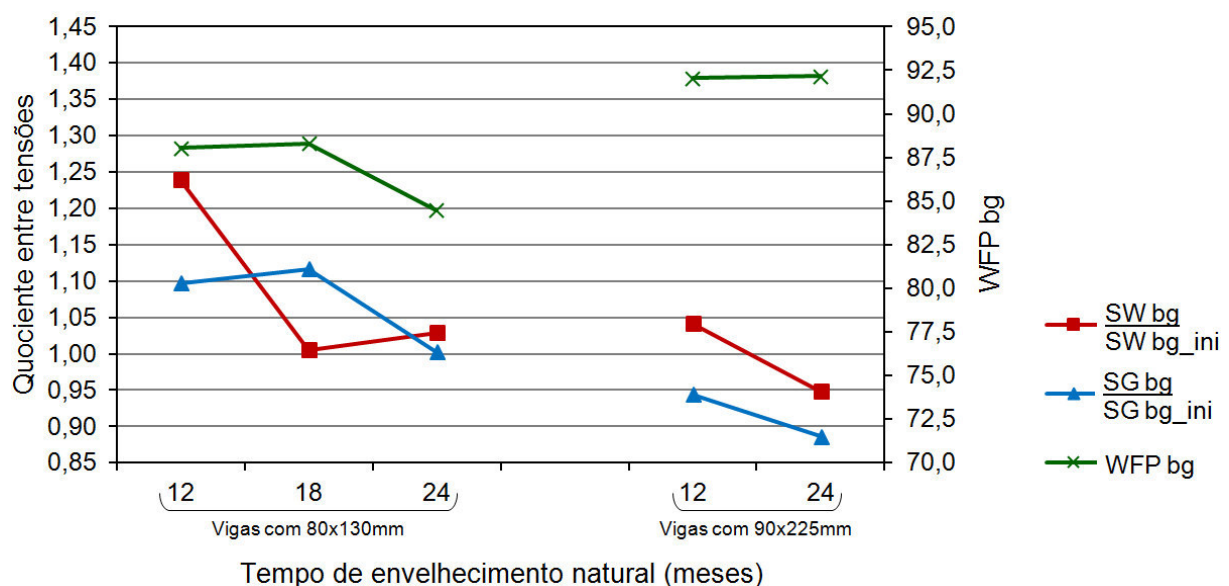


Figura 54: Resultados dos ensaios de corte em provetes de madeira lamela colada de Espruce com cola de PRF envelhecida naturalmente. À esquerda para vigas com 80 x 13 mm de secção e à direita com 90 x 225 mm.

Conforme se pode observar, para as vigas com 80 x 130 mm de secção, à semelhança do que se passa para as vigas com cola MUF, não existe uma clara tendência decrescente da SW e da SG com o tempo de envelhecimento. O mesmo não se verifica para as vigas de maior secção, onde ambas as resistências diminuem bastante entre os 12 meses e os 24 meses de envelhecimento.

Para as vigas de menor secção, a resistência inicial parece ser inferior à resistência após envelhecimento, uma vez que o quociente entre tensões é superior a 1 (Figura 54). A variabilidade natural da madeira e o facto de que a resistência inicial ter sido estimada através das equações apresentadas anteriormente, pode justificar a obtenção de valores menos exatos do que o esperado na realidade.

No caso das vigas com maior dimensão, o mesmo parece não acontecer. À exceção da resistência da madeira para os 12 meses de envelhecimento, os quocientes entre tensões situam-se abaixo de 1, o que poderá estar relacionado com o efeito da dimensão das amostras. Quanto maior é a dimensão, maiores são as variações dimensionais, nomeadamente devido à variação do teor de água e como tal, maior é a degradação devido ao maior gradiente de tensões instaladas.

Para os 18 meses de envelhecimento e para as vigas de menor secção, a descida do valor médio da SW é elevado (23,3%) o que poderá estar relacionado com eventuais defeitos de colagem ou presença de delaminação causada pela exposição às condições atmosféricas adversas durante o processo de envelhecimento natural.

No caso das vigas de maior secção, o envelhecimento natural conduziu a uma diminuição das resistências médias de SW e SG, na ordem dos 9,9% e 6,5% respetivamente. A diminuição da resistência, neste caso, seguiu em ambas as vigas a mesma tendência decrescente.

Em termos de percentagem de rotura pela madeira WFP, deve notar-se que, no caso das vigas de menor dimensão, esta aumentou ligeiramente entre os 12 meses e 18 meses e diminuiu entre estes últimos e os 24 meses de envelhecimento. De facto faz sentido, uma vez que aos 18 meses de envelhecimento a SW diminuiu e a SG aumentou, seguindo a lógica de uma maior propensão para a rotura se dar pela madeira e não pela cola. Para os 24 meses observa-se o contrário, ou seja, a SW aumenta e a SG diminuiu. A WFP tem uma tendência crescente ou

decrecente semelhante à SG e apresenta-se como simétrica da tendência evidenciada pela SW.

Para as vigas de maior secção, a WFP aumentou muito ligeiramente entre os 12 meses e os 24 meses de envelhecimento. Neste caso, ambas as resistências SW e SG diminuíram neste período, mas como já foi referido, seguiram uma tendência decrecente praticamente paralela entre si, e daí a WFP se ter mantido praticamente inalterável durante o mesmo período.

Concluindo, da mesma forma como foi verificado nas amostras com cola MUF também nas amostras com cola PRF a tendência crescente ou decrecente da SG existiu em paralelo com a SW. Esta situação comprova mais uma vez que a degradação da madeira e da junta colada são fenómenos que estão muito interligados.

De um modo geral, quer para as amostras com cola MUF quer para as amostras com cola PRF observa-se que não existe em geral uma clara tendência decrecente da SG e da SW ao longo do processo de envelhecimento natural, o que é consistente com os resultados apresentados por Gaspar (2010). Ainda que em muitos casos exista um decréscimo de resistência entre provetes envelhecidos e não envelhecidos, conforme apresentado no gráfico da Figura 51, de um ponto de vista temporal, parece que o facto de um elemento ter mais tempo de envelhecimento do que outro, não significa obrigatoriamente que este tenha uma resistência residual inferior.

4.6 Resultados dos ensaios com ultra-sons

4.6.1 Tratamento das ondas recolhidas

Para proceder à análise das ondas recolhidas a partir dos ensaios com recurso a ultra-sons foi necessário determinar o valor de alguns parâmetros importantes, nomeadamente:

- ✓ Valor eficaz (RMS);
- ✓ Amplitude (Amp);
- ✓ Pico a pico (PaP);
- ✓ Tempo para a máxima amplitude (TPMA);
- ✓ Momento de ordem 0 (igual à área, AT);
- ✓ Momento de ordem 1 (M1);

- ✓ Momento de ordem 2 (M2);
- ✓ Centróide tempo (CT).

De forma resumida, o valor de pico a pico (PaP) diz respeito à diferença observada entre a amplitude máxima e mínima da onda recolhida. O valor eficaz (RMS), a amplitude (Amp), o pico a pico (PaP) e a área (AT) são parâmetros que se relacionam com a energia transmitida. Por outro lado, o tempo para a máxima amplitude (TPMA) e o centróide tempo (CT) são parâmetros que apresentam mais afinidade com a forma da onda e permitem apreciar a forma com a transferência da energia da onda se processa. Dos três valores determinados para cada direção de medição adotou-se o valor médio.

O início e fim de onda e os restantes parâmetros ultrassônicos foram determinados através de folhas de cálculo do software MS-Office™ Excel, com implementação da programação de rotinas de Visual Basic for Applications que permitiu uma automatização do cálculo.

Todo o tratamento matemático e estatístico foi realizado utilizando o software Matlab, versão 6.5 (Mathworks, Natick, M.A.), utilizando em particular a aplicação PLS toolbox (Eigenvector Research, Inc. West Eaglerock Drive Wenatchee, WA) na análise multivariada.

4.6.2 Análise das ondas captadas

Domínio do tempo

À análise das ondas ultrassônicas no domínio do tempo está associado um problema bastante comum que resulta da presença de ruído. Neste trabalho, foi estabelecida uma determinada fronteira que delimitará a parte da onda de amplitude inferior a excluir para determinação dos parâmetros da onda, conforme se ilustra na Figura 55.

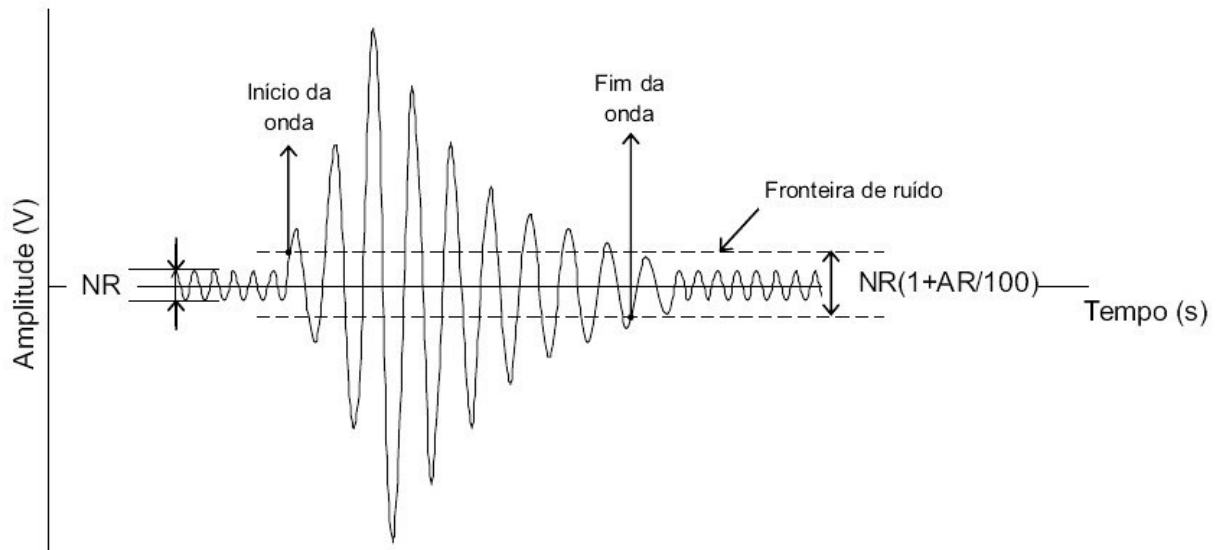


Figura 55: Determinação do fim e do início da onda pelo estabelecimento de uma fronteira de ruído (Gaspar 2010).

O nível de ruído (NR) foi determinado calculando os valores máximo e mínimo observados nos 60 pontos iniciais da onda e a fronteira de ruído foi estabelecida pelo valor $NR \times (1 + AR / 100)$, onde “AR” é o acréscimo de ruído em percentagem. Este procedimento é semelhante ao utilizado por outros autores (Machado 2003).

Para cada onda ultrassônica foi determinado o TMPA com vários níveis de ruído, iniciando com 20% e 200%. A realização de um gráfico preliminar permitiu perceber que a curva obtida para cada viga ensaiada estabilizava para valores entre 50 a 150% de ruído. Na Figura 56, ilustra-se a variação do valor médio do TMPA em função de AR para as diversas vigas de madeira lamelada colada ensaiadas.

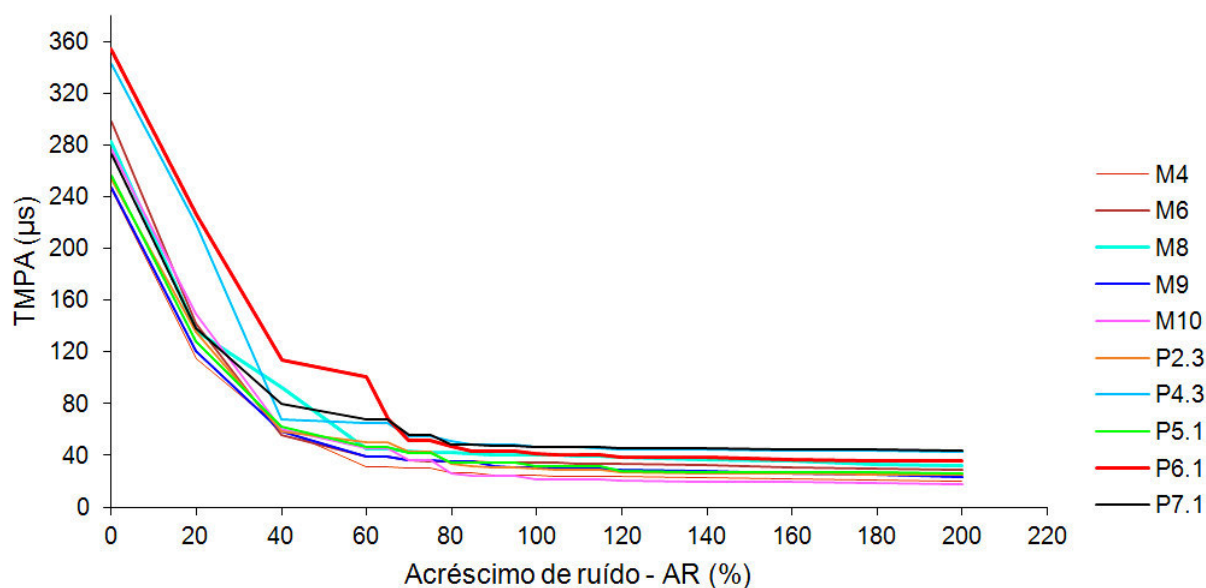


Figura 56: Variação do tempo para a máxima amplitude (TMPA) em função do acréscimo de ruído (AR).
Vigas M – Espruce com cola MUF, P – Espruce com cola PRF.

Verifica-se que existe uma diminuição acentuada do TMPA para valores de AR entre 0 e 40%. A partir desta fase, que corresponde à eliminação de grande parte do ruído na parte inicial da onda, a variação ainda é bastante significativa até valores de ruído na ordem dos 70%, estabilizando para valores até 140%. Para valores de AR superiores a este patamar, verifica-se que a variação do TMPA é praticamente constante até aos 200%, indicando uma exclusão completa do ruído. Nesse sentido, foi definido um AR de 140% no cálculo de todos os parâmetros ultrassónicos mencionados anteriormente.

Outro aspeto que importa realçar ainda no domínio do tempo tem a ver com o aspeto que a configuração da onda toma, em termos médios, durante os primeiros 50 µs de duração. Na Figura 57 é possível observar essa mesma configuração da onda ultrassónica.

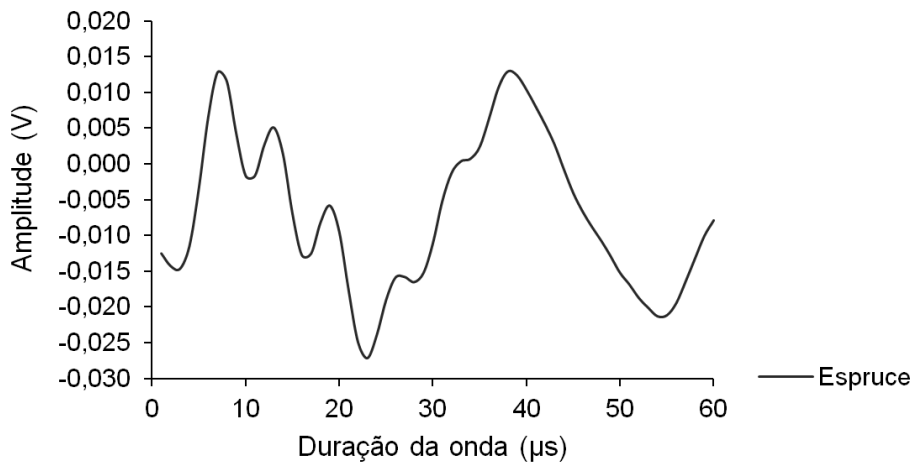


Figura 57: Configuração da onda ultrassônica nos primeiros 50 μs de duração, em termos médios.

Como se pode observar, existe a uma tendência clara para a configuração da onda seguir uma lógica de três picos descendentes seguidos de três picos ascendentes. Esta situação verifica-se na parte inicial da onda ultrassônica e é consistente com os resultados obtidos anteriormente por Gaspar (2010).

Domínio da frequência

Neste domínio, foi estabelecido um espectro típico de uma onda captada pela sonda recetora quando colocada diretamente em contacto com a sonda emissora, interpondo uma camada de acoplante entre as duas sondas, e foi feita a verificação de quais as frequências que apresentavam maiores picos de amplitude. Estes valores foram depois comparados com os espectros médios das ondas captadas para cada tipo de zona de medição de forma a perceber qual a semelhança que existe entre ambos os espectros. Na Figura 58 podemos observar o aspeto do espectro típico obtido.

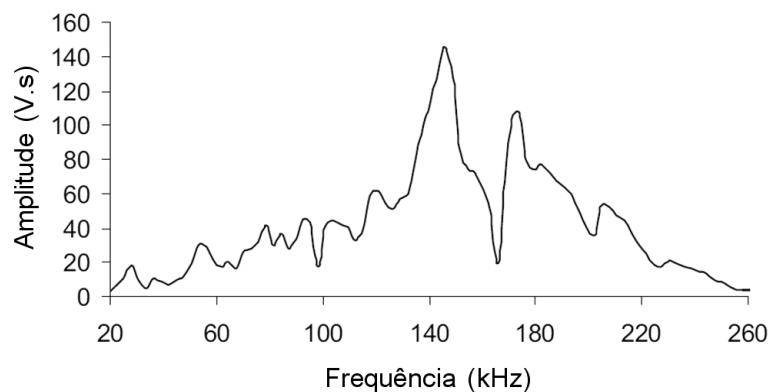


Figura 58: Espectro de uma onda típica captada com a sonda emissora colocada diretamente em contacto com a recetora (Gaspar (2010)).

Na figura é possível observar que o espectro apresenta picos de maior amplitude para frequências entre 140 e 150 kHz e entre 170 e 180 kHz. Além destes picos de maior amplitude, podem ser observados os picos de menor amplitude para frequências na ordem dos 30, 50, 80, 90, 120, 180, 200 e 230 kHz.

Na Figura 59 apresenta-se o espectro médio das ondas captadas para os provetes de madeira lamelada colada de Espruce.

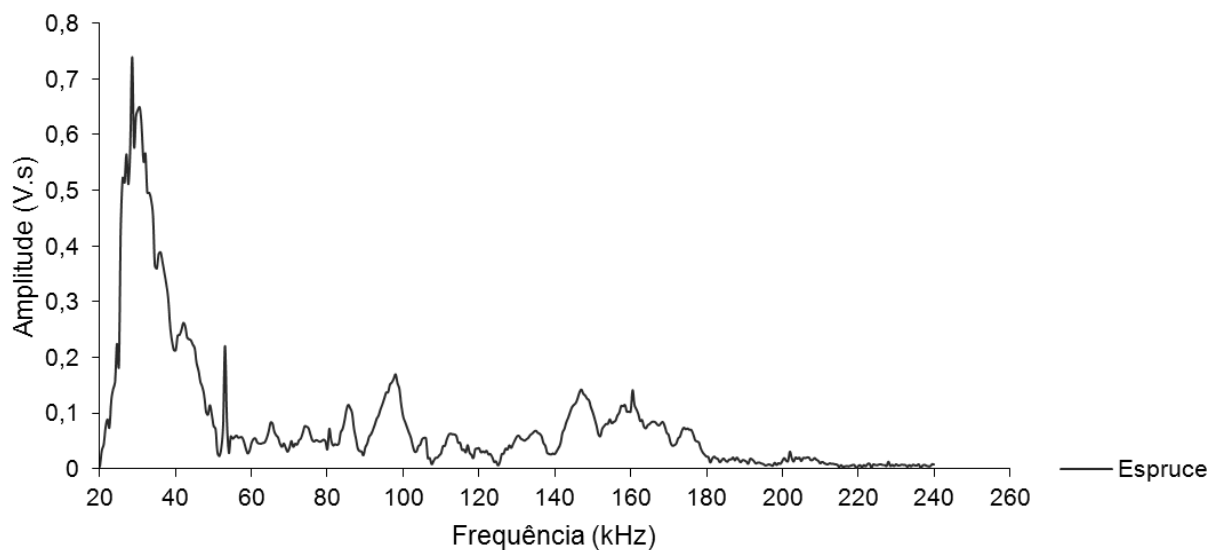


Figura 59: Amplitudes médias dos espectros obtidos para provetes de madeira lamelada colada de Espruce.

Comparando este espectro com o espectro captado com as sondas em contacto direto apresentado na Figura 58, podemos observar que neste último caso (Figura 58) a gama de amplitudes mais baixas verificam-se entre os 20 e os 100 kHz enquanto, no primeiro caso (Figura 59), o mesmo não acontece, existindo uma gama de amplitudes bastante elevadas entre as frequências de 20 a 50 kHz e depois denota-se o aparecimento de várias bandas com picos mais baixos entre 50 e 180 kHz.

Tal facto, deve-se essencialmente às alterações que a onda ultrassónica sofre no trajeto entre a sonda emissora e recetora. Ainda assim, podemos verificar algumas semelhanças entre ambos os espectros em termos de picos de amplitude, sobretudo para frequências (entre parênteses os valores para o espectro captado com as sondas em contacto direto) em torno de 30 (28), 36 (37), 53, 65 (65), 74, 80 (79), 85 (84), 98 (93), 105 (104), 112, 117 (120), 130, 135, 147 (146), 155, 158, 160, 174 (174), 191, 198, 200, 202, 207 (205), 228 (230).

4.6.3 Afinidade com a resistência ao corte

A afinidade dos ultra-sons com a resistência ao corte foi determinada para vários domínios, nomeadamente:

- ✓ Calibração utilizando a onda no domínio do tempo;
- ✓ Calibração utilizando a velocidade e a onda no domínio do tempo;
- ✓ Calibração utilizando a onda no domínio da frequência;
- ✓ Calibração utilizando a velocidade e a onda no domínio da frequência;
- ✓ Calibração utilizando a velocidade e os parâmetros ultra-sónicos.

Foram analisados os diversos domínios para cada tipo de resistência, pela junta colada (SG) e pela madeira (SW), e para a percentagem de rotura pela madeira (WFP). Esta análise foi efetuada com recurso ao software Matlab, utilizando a aplicação PLS toolbox na análise multivariada, como já foi aliás referido anteriormente, e definindo algumas condições iniciais de análise de dados dentro do programa, não utilizando pré-processamento de dados, definindo o *Cross Validation Method* como “*leave one out*” e um máximo de Variáveis Latentes fixadas em 20.

Resultados no domínio do tempo

A análise de resultados no domínio do tempo foi efetuada de acordo com cada uma das direções de medição (direção 1-2 ou direção 2-1) ou tomando a média de ambos os espectros. Foram também consideradas várias durações de onda de 5 μ s em 5 μ s até 50 μ s, depois de 100 μ s em 100 μ s entre 100 μ s e 1000 μ s finalizando com 1500 μ s e 2000 μ s.

No Quadro 4.4 apresentam-se os coeficientes de correlação máximos de cada viga obtidos para a resistência a corte, da junta colada e da madeira, e da percentagem de rotura pela madeira, utilizando a onda no domínio do tempo. Já no Quadro 4.5, apresentam-se os coeficientes de correlação máximos de cada viga obtidos para as mesmas resistências e percentagem de rotura pela madeira mas utilizando a velocidade e a onda no domínio do tempo. Para finalizar, no Quadro 4.6, apresentam-se os coeficientes de correlação máximos de cada viga obtidos utilizando a velocidade e os parâmetros ultrassónicos.

Quadro 4.4 – PLSR para a resistência ao corte e percentagem de rotura pela madeira utilizando a onda no domínio do tempo*, em vigas de madeira lamelada colada de Espruce.

Viga	Gama de frequências (kHz)	Resistência	Duração da onda (μ s)	Direção considerada	Número de juntas	r_{cv}^2	RMSECV (MPa)	N.º de PCs
M4	20 - 250	SG	25	1-2	24	0,212	2,2637	14
		SW	10	2-1	23	0,323	11,3141	1
		WFP	20	2-1	23	0,219	70,5662	5
M6	20 - 250	SG	25	2-1	21	0,242	5,8776	7
		SW	20	Média	20	0,415	1,8189	14
		WFP	900	2-1	21	0,120	22,6585	3
M8	20 - 250	SG	20	Média	21	0,317	2,0856	20
		SW	1000	2-1	22	0,355	0,3577	1
		WFP	50	2-1	22	0,184	46,7580	5
M9	20 - 250	SG	5	2-1	24	0,372	7,2346	1
		SW	15	1-2	25	0,273	11,8117	1
		WFP	40	2-1	25	0,496	20,8909	17
M10	20 - 250	SG	15	2-1	25	0,146	6,0886	8
		SW	1500	Média	24	0,189	3,0252	2
		WFP	50	Média	24	0,264	28,7427	19
P2.3	20 - 250	SG	10	2-1	14	0,246	5,8966	7
		SW	15	2-1	14	0,243	7,3151	5
		WFP	15	2-1	14	0,349	48,8804	5
P4.3	20 - 250	SG	15	Média	10	0,418	5,2430	3
		SW	50	Média	10	0,396	7,3828	3
		WFP	2000	1-2	10	0,518	11,9594	6
P5.1	20 - 250	SG	1500	Média	14	0,414	2,7849	11
		SW	5	2-1	14	0,531	4,7050	3
		WFP	25	Média	14	0,426	17,5064	7
P6.1	20 - 250	SG	45	2-1	25	0,380	2,3234	18
		SW	25	Média	24	0,506	1,1826	16
		WFP	10	1-2	26	0,165	65,8134	7
P7.1	20 - 250	SG	20	2-1	28	0,207	1,9446	1
		SW	5	1-2	28	0,197	7,5364	3
		WFP	50	2-1	28	0,159	29,0386	2

* – AR = 140%

r_{cv}^2 – Coeficiente de determinação da validação cruzada

RMSECV – *Root-mean-square error of cross-validation*

PCs – Componentes principais

Quadro 4.5 – PLSR para a resistência ao corte e percentagem de rotura pela madeira utilizando a velocidade e a onda no domínio do tempo*, em vigas de madeira lamelada colada de Espruce.

Viga	Gama de frequências (kHz)	Resistência	Duração da onda (µs)	Direção considerada	Número de juntas	r_{cv}^2	RMSECV (MPa)	N.º de PCs
M4	20 - 250	SG	5	1-2	24	0,163	1,4047	4
		SW	5	2-1	23	0,127	1,3904	4
		WFP	15	2-1	23	0,061	9,2133	7
M6	20 - 250	SG	2000	2-1	21	0,112	0,8343	3
		SW	45 a 300	2-1	21	0,114	1,3010	1
		WFP	2000	2-1	21	0,104	5,8947	5
M8	20 - 250	SG	200	1-2	24	0,645	0,7958	8
		SW	40	Média	21	0,421	0,3748	3
		WFP	50	Média	21	0,100	4,8281	4
M9	20 - 250	SG	10	2-1	24	0,228	1,0200	2
		SW	800	Média	25	0,389	0,6762	4
		WFP	25	2-1	25	0,140	9,8634	2
M10	20 - 250	SG	600	Média	24	0,340	1,3074	8
		SW	1000	2-1	25	0,319	0,9007	6
		WFP	900	2-1	25	0,148	11,5892	2
P2.3	20 - 250	SG	40	1-2	14	0,484	0,4883	6
		SW	10 a 2000	2-1	14	0,188	0,8390	1
		WFP	15 a 2000	2-1	14	0,171	17,6805	1
P4.3	20 - 250	SG	25	Média	10	0,457	1,5503	1
		SW	35	Média	10	0,695	0,4313	6
		WFP	10 a 25	1-2	10	0,457	24,6515	1
P5.1	20 - 250	SG	35	Média	14	0,606	0,7338	6
		SW	200	1-2	14	0,812	0,7830	7
		WFP	35	2-1	14	0,323	12,5919	6
P6.1	20 - 250	SG	5	1-2	26	0,444	1,2400	3
		SW	40	2-1	25	0,431	1,4199	8
		WFP	25	2-1	25	0,148	13,0259	9
P7.1	20 - 250	SG	45	1-2	28	0,090	1,5411	3
		SW	700	1-2	28	0,155	1,2074	7
		WFP	30	2-1	28	0,080	9,0996	4

* – AR = 140%

r_{cv}^2 – Coeficiente de determinação da validação cruzada

RMSECV – *Root-mean-square error of cross-validation*

PCs – Componentes principais

Quadro 4.6 – PLSR para a resistência ao corte e percentagem de rotura pela madeira utilizando a velocidade e os parâmetros ultrassônicos*, em vigas de madeira lamelada colada de Espruce.

Viga	Gama de frequências (kHz)	Resistência	Duração da onda (µs)	Direção considerada	Número de juntas	r_{cv}^2	RMSECV (MPa)	N.º de PCs
M4	20 - 250	SG	800	2-1	23	0,079	1,3742	2
		SW	400	Média	23	0,019	1,6587	2
		WFP	700	2-1	23	0,062	9,7348	3
M6	20 - 250	SG	100	1-2	24	0,063	1,4119	2
		SW	100 a 2000	2-1	21	0,114	1,3010	1
		WFP	400 a 800	1-2	24	0,042	8,3716	1
M8	20 - 250	SG	800	2-1	22	0,208	1,1526	3
		SW	100 a 2000	Média	21	0,208	0,4360	1
		WFP	2000	Média	21	0,073	5,4487	2
M9	20 - 250	SG	900	2-1	24	0,134	1,1489	3
		SW	100	Média	25	0,233	0,6534	3
		WFP	900	2-1	25	0,127	9,8887	2
M10	20 - 250	SG	100	2-1	25	0,195	1,3645	2
		SW	100	2-1	25	0,143	1,0926	2
		WFP	100 a 2000	2-1	25	0,135	11,6066	1
P2.3	20 - 250	SG	600	2-1	14	0,444	1,4460	2
		SW	100	2-1	14	0,248	0,6861	2
		WFP	200	1-2	14	0,201	12,2064	3
P4.3	20 - 250	SG	100 a 2000	Média	10	0,475	1,5503	1
		SW	100	Média	10	0,375	0,5557	2
		WFP	100 a 1500	1-2	14	0,457	24,6515	1
P5.1	20 - 250	SG	100 a 2000	1-2	14	0,469	0,8559	1
		SW	100 a 2000	1-2	14	0,377	1,3293	1
		WFP	100	1-2	14	0,191	13,8730	3
P6.1	20 - 250	SG	100	Média	24	0,453	1,3029	3
		SW	100	2-1	25	0,045	1,5921	2
		WFP	100 a 2000	Média	24	0,032	13,5347	1
P7.1	20 - 250	SG	100 a 2000	1-2	28	0,001	1,6116	1
		SW	900	1-2	28	0,239	1,1199	3
		WFP	100	Média	28	0,019	8,8091	2

* – AR = 140%

r_{cv}^2 – Coeficiente de determinação da validação cruzada

RMSECV – *Root-mean-square error of cross-validation*

PCs – Componentes principais

No Quadro 4.4 e 4.5 é possível observar que foram obtidos coeficientes de correlação bastante significativos, o que demonstra existir alguma afinidade entre os resultados da resistência ao corte e a utilização dos ultra-sons. Já para a resistência ao corte e percentagem de rotura pela madeira utilizando a velocidade e os parâmetros ultrassônicos o mesmo parece não acontecer, nomeadamente no caso das vigas de madeira lamelada colada de Espruce com cola MUF. No caso das vigas onde foi utilizada cola PRF existem ainda assim alguns casos com coeficientes de correlação apreciáveis.

É também evidente que as melhores correlações são obtidas para durações de onda entre 5 μ s e 35 μ s e, num patamar secundário, até durações de onda na casa dos 50 μ s. De facto, no Quadro 4.4, 63% dos casos observados enquadram-se entre durações de onda até 35 μ s, aumentando a percentagem para 83% se considerarmos o conjunto de ondas com duração até 50 μ s. Já no Quadro 4.5, esta incidência é ligeiramente inferior, ainda assim na casa dos 50% para durações de onda até 35 μ s e 70% para durações de onda até 50 μ s. Nos gráficos seguintes podemos observar, a título de exemplo, os resultados obtidos para os primeiros 100 μ s de onda para as vigas de madeira lamelada colada de Espruce com cola MUF e para as vigas de madeira lamelada colada de Espruce com cola PRF.

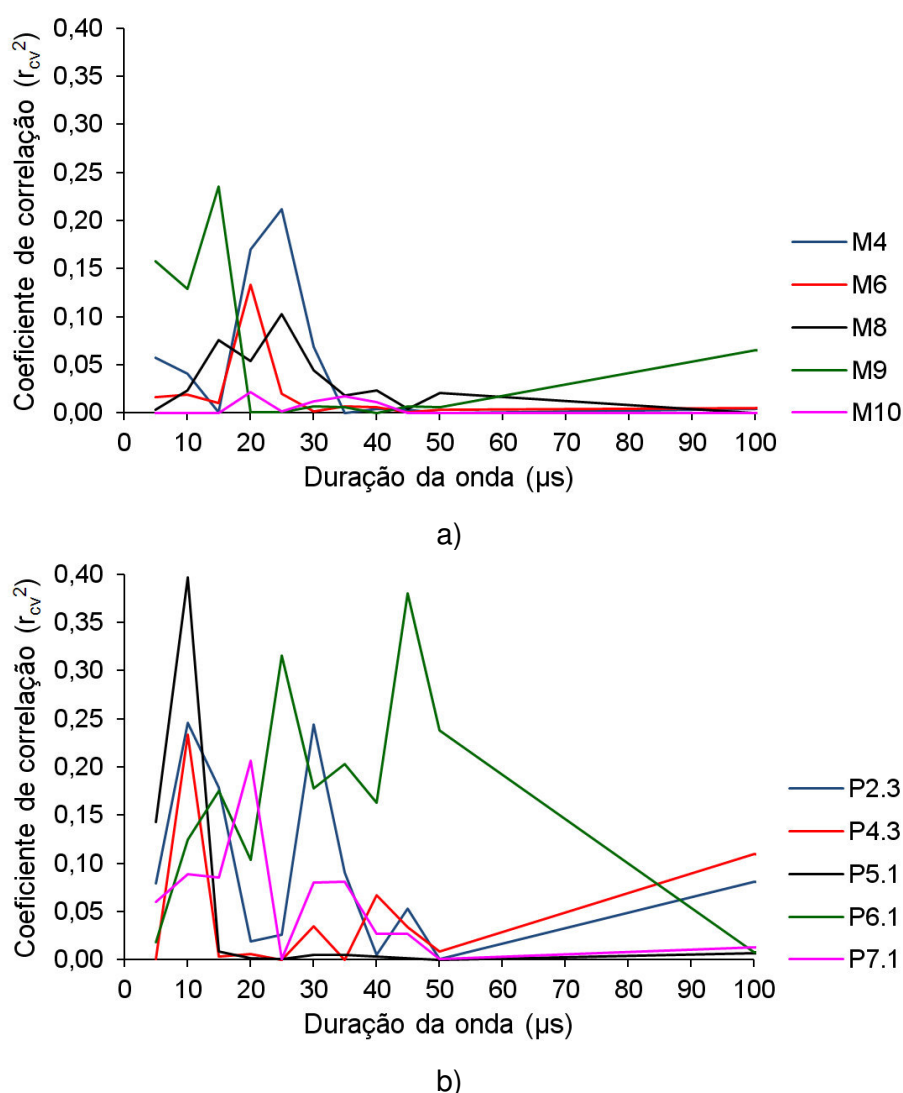
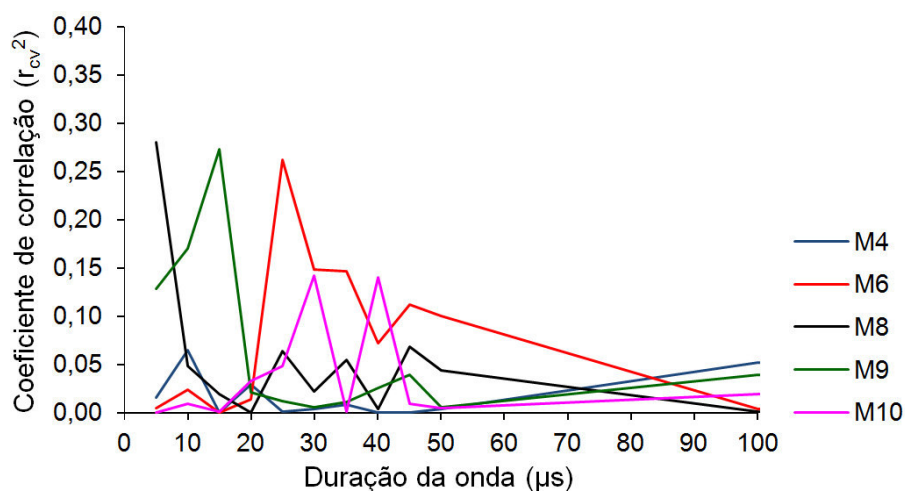
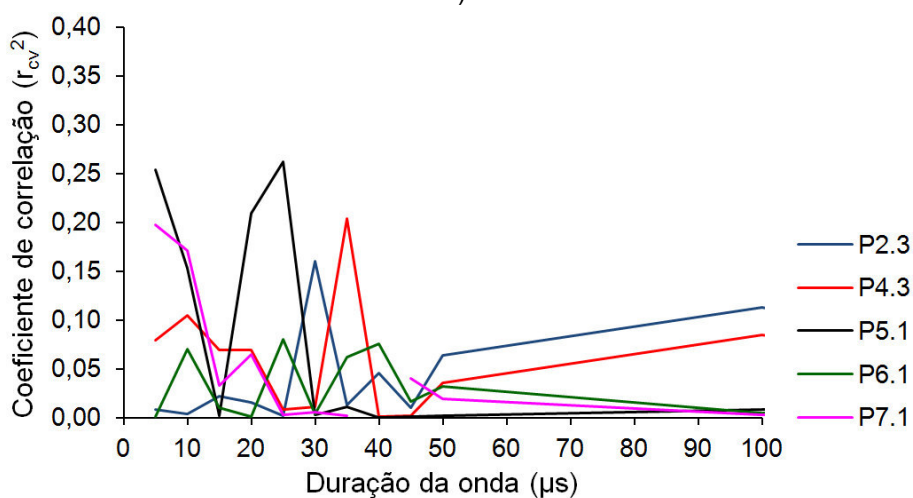


Figura 60: Coeficiente de correlação durante os primeiros 100 μ s da onda para vigas de madeira lamelada colada de Espruce, utilizando a onda no domínio do tempo. Resultados em termos de resistência ao corte pela junta colada (SG): a) Vigas com cola MUF e na direção 1-2, b) Vigas com cola PRF e na direção 2-1.



a)



b)

Figura 61: Coeficiente de correlação durante os primeiros 100 μs da onda para vigas de madeira lamelada colada de Espruce, utilizando a onda no domínio do tempo. Resultados em termos de resistência ao corte pela madeira (SW): a) Vigas com cola MUF e na direção 1-2, b) Vigas com cola PRF e na direção 1-2.

De facto, pode constatar-se que existe uma tendência clara para os coeficientes de correlação serem melhores nos primeiros 5 a 50 μs de onda ultrassónica. Aliás, em trabalhos anteriores, alguns autores (Bell e Biernacki 1992; Machado 2003) apontaram a utilização da parte inicial da onda como sendo um procedimento vantajoso, uma vez que permite obter leituras que caracterizam melhor a zona da amostra submetida a ensaio. Na parte inicial, a onda ultrassónica agrupa menos informação devida a reflexões da onda ocorrida em zonas vizinhas.

Resultados no domínio da frequência

A análise de resultados no domínio do frequência foi efetuada da mesma forma que a análise no domínio do tempo, ou seja, de acordo com cada uma das direções de medição (direção 1-2 ou direção 2-1) ou tomando a média de ambos os espectros. Foram ainda consideradas as mesmas durações de onda.

No Quadro 4.7 apresentam-se os coeficientes de correlação máximos de cada viga obtidos para a resistência a corte, da junta colada e da madeira, e da percentagem de rotura pela madeira, utilizando a onda no domínio da frequência. Já no Quadro 4.8, apresentam-se os coeficientes de correlação máximos de cada viga obtidos para as mesmas resistências e percentagem de rotura pela madeira mas utilizando a velocidade e a onda no domínio da frequência.

Quadro 4.7 – PLSR para a resistência ao corte e percentagem de rotura pela madeira utilizando a onda no domínio da frequência*, em vigas de madeira lamelada colada de Espruce.

Viga	Gama de frequências (kHz)	Resistência	Duração da onda (μ s)	Direção considerada	Número de juntas	r_{cv}^2	RMSECV (MPa)	N.º de PCs
M4	20 - 250	SG	600	Média	23	0,343	1,1495	9
		SW	35	1-2	24	0,249	2,5854	3
		WFP	100	1-2	24	0,262	19,3918	5
M6	20 - 250	SG	45	Média	20	0,500	1,2393	11
		SW	40	2-1	21	0,277	4,0941	2
		WFP	100	1-2	24	0,133	28,0299	2
M8	20 - 250	SG	100	Média	21	0,443	1,4644	20
		SW	30	2-1	22	0,424	3,8425	2
		WFP	45	Média	21	0,210	19,6175	3
M9	20 - 250	SG	50	1-2	24	0,196	3,3839	4
		SW	35	2-1	25	0,286	3,8283	5
		WFP	900	2-1	25	0,076	13,5185	5
M10	20 - 250	SG	25	Média	24	0,093	3,7978	6
		SW	700	Média	24	0,132	2,5959	2
		WFP	45	Média	24	0,119	26,3128	11
P2.3	20 - 250	SG	10	Média	14	0,413	5,3363	3
		SW	20	2-1	14	0,311	2,8355	5
		WFP	100	1-2	14	0,261	15,4049	7
P4.3	20 - 250	SG	50	Média	10	0,420	3,7291	3
		SW	50	Média	10	0,636	3,5958	3
		WFP	45	Média	10	0,725	8,8258	9
P5.1	20 - 250	SG	100	2-1	14	0,248	2,3325	9
		SW	100	2-1	14	0,478	1,9448	6
		WFP	45	2-1	14	0,406	16,2537	8
P6.1	20 - 250	SG	35	Média	24	0,216	2,0696	5
		SW	800	1-2	26	0,240	1,6099	4
		WFP	100	Média	24	0,213	20,0158	4
P7.1	20 - 250	SG	20	2-1	28	0,319	4,1167	1
		SW	200	2-1	28	0,230	1,6820	14
		WFP	100	1-2	28	0,638	6,6072	20

* – AR = 140%

r_{cv}^2 – Coeficiente de determinação da validação cruzada

RMSECV – *Root-mean-square error of cross-validation*

PCs – Componentes principais

Quadro 4.8 – PLSR para a resistência ao corte e percentagem de rotura pela madeira utilizando a velocidade e a onda no domínio da frequência*, em vigas de madeira lamelada colada de Espruce.

Viga	Gama de frequências (kHz)	Resistência	Duração da onda (μ s)	Direção considerada	Número de juntas	r_{cv}^2	RMSECV (MPa)	N.º de PCs
M4	20 - 250	SG	5	2-1	23	0,257	1,2373	2
		SW	50	2-1	23	0,198	1,3165	4
		WFP	2000	2-1	23	0,156	9,0542	3
M6	20 - 250	SG	50	2-1	21	0,349	0,6920	5
		SW	50	1-2	24	0,323	0,9376	12
		WFP	200	Média	20	0,256	2,7779	10
M8	20 - 250	SG	200	1-2	24	0,211	1,1089	2
		SW	45	Média	21	0,550	0,3416	6
		WFP	200	2-1	22	0,202	4,3201	6
M9	20 - 250	SG	5	2-1	24	0,183	1,0400	2
		SW	10	Média	25	0,320	0,6746	3
		WFP	45	2-1	25	0,195	9,8795	3
M10	20 - 250	SG	50	Média	24	0,408	1,1642	3
		SW	50	Média	24	0,475	0,8072	10
		WFP	2000	2-1	25	0,193	11,4295	2
P2.3	20 - 250	SG	40	1-2	14	0,693	0,4349	8
		SW	45	2-1	14	0,272	0,6280	2
		WFP	700	1-2	14	0,526	9,0574	11
P4.3	20 - 250	SG	5 a 2000	Média	10	0,457	1,5503	1
		SW	50	Média	10	0,800	0,3245	6
		WFP	5 a 35	1-2	10	0,457	24,6515	1
P5.1	20 - 250	SG	100	Média	14	0,825	0,4801	6
		SW	400	1-2	14	0,786	0,7788	5
		WFP	45	2-1	14	0,337	12,6130	7
P6.1	20 - 250	SG	30	1-2	26	0,520	1,1654	3
		SW	800	1-2	26	0,384	1,0692	9
		WFP	2000	2-1	25	0,044	11,3664	18
P7.1	20 - 250	SG	30	Média	28	0,286	1,3513	5
		SW	35	2-1	28	0,218	1,0672	2
		WFP	10	Média	28	0,119	7,7933	2

* – AR = 140%

r_{cv}^2 – Coeficiente de determinação da validação cruzada

RMSECV – *Root-mean-square error of cross-validation*

PCs – Componentes principais

Em termos de resistência ao corte e percentagem de rotura pela madeira utilizando a onda no domínio da frequência e a velocidade e a onda no domínio da frequência é possível observar coeficientes de correlação bastante significativos, seguindo a mesma coerência obtida nos resultados no domínio do tempo.

No mesmo seguimento dos resultados obtidos no domínio do tempo, parece também evidente que as melhores correlações são obtidas para durações de onda entre 5 e 50 μ s. Ainda que, neste caso, não exista uma clara distinção entre os dois patamares observados no domínio do

tempo (5 μs a 35 μs e 35 μs a 50 μs) é evidente que as melhores correlações são encontradas até aos primeiros 50 μs de onda ultrassónica. No Quadro 4.7, 26,67% dos casos observados enquadram-se entre durações de onda até 35 μs , aumentando a percentagem para 56,67% se considerarmos o conjunto de ondas com duração até 50 μs . Já no Quadro 4.8, esta incidência é ligeiramente superior, na casa dos 26,67% para durações de onda até 35 μs e 63,33% para durações de onda até 50 μs .

Nos gráficos seguintes podemos observar, a título de exemplo, os resultados obtidos para os primeiros 100 μs de onda para as vigas de madeira lamelada colada de Espruce com cola MUF e para as vigas de madeira lamelada colada de Espruce com cola PRF onde se pode constatar que, de facto, existe uma tendência clara para os coeficientes de correlação serem melhores nos primeiros 5 μs a 50 μs de onda ultrassónica.

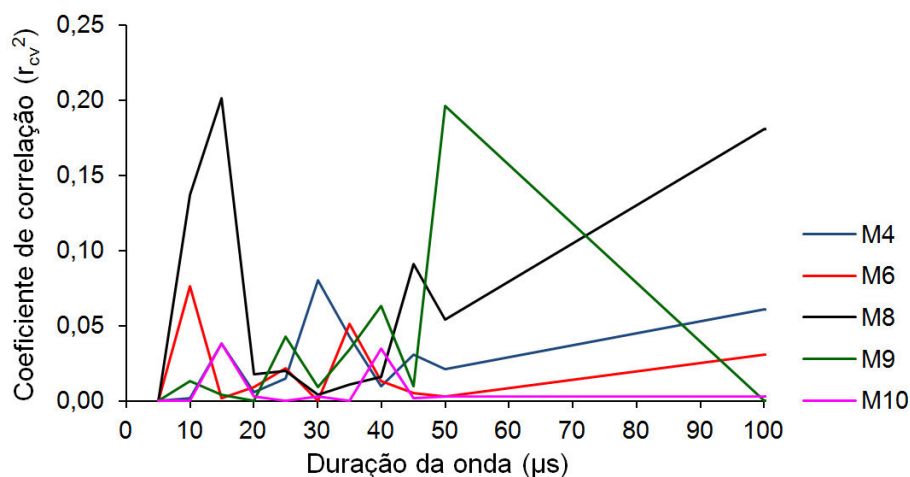


Figura 62: Coeficiente de correlação durante os primeiros 100 μs da onda para vigas de madeira lamelada colada de Espruce, utilizando a onda no domínio da frequência. Resultados em termos de resistência ao corte pela junta colada (SG): Vigas com cola MUF e na direção 1-2.

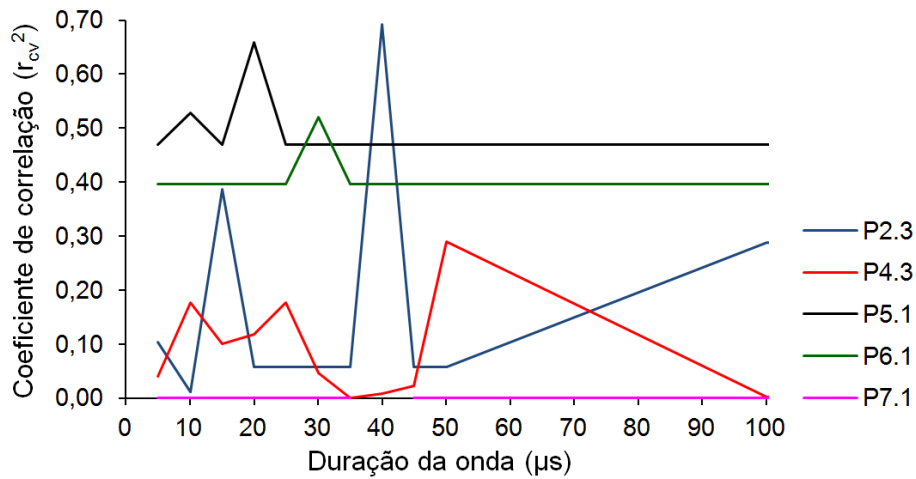
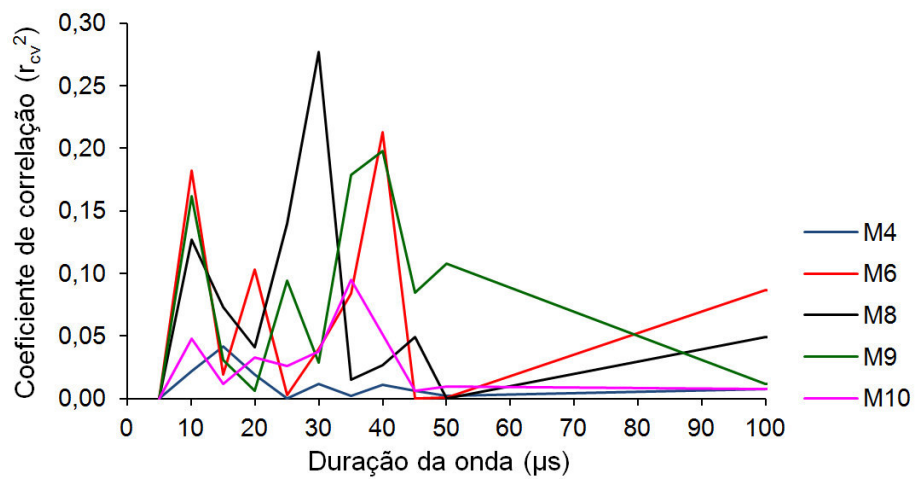
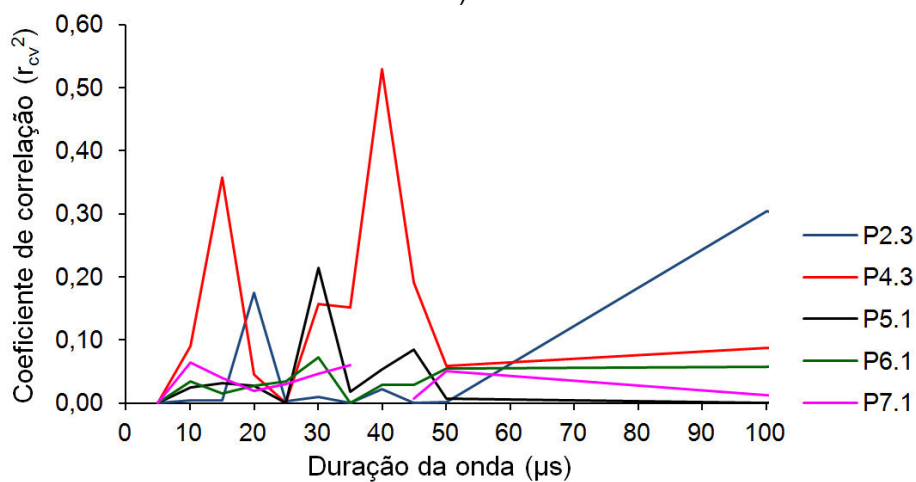


Figura 63: Coeficiente de correlação durante os primeiros 100 μs da onda para vigas de madeira lamelada colada de Espruce, utilizando a velocidade e a onda no domínio da frequência. Resultados em termos de resistência ao corte pela junta colada (SG): Vigas com cola PRF e na direção 1-2.



a)



b)

Figura 64: Coeficiente de correlação durante os primeiros 100 μs da onda para vigas de madeira lamelada colada de Espruce, utilizando a onda no domínio da frequência. Resultados em termos de resistência ao corte pela madeira (SW): a) Vigas com cola MUF e na direção média, b) Vigas com cola PRF e na direção 1-2.

Tal como os resultados apresentados no domínio do tempo, também aqui se pode constatar a mesma tendência para os coeficientes de correlação serem melhores nos primeiros 5 a 50 μ s de onda ultrassónica.

Estes resultados são consistentes com os apresentados por Gaspar (2010), onde refere que em muitos casos verificou-se que com a parte inicial da onda (10 μ s a 35 μ s) se obtêm coeficientes de determinação mais elevados. Além disso, refere ainda que a consideração de toda a gama de frequências (20 kHz a 250 kHz) é, em grande parte dos casos, aquela que conduz à obtenção de maiores coeficientes de determinação. Nesse sentido, a gama de frequências utilizada neste trabalho situa-se entre 20 kHz e 250 kHz.

Conclusões e desenvolvimentos futuros

5.1 Considerações finais

O desempenho de uma estrutura em madeira lamelada colada em estado de serviço está bastante dependente da resistência e do desempenho da junta colada. Esta, é tanto mais resistente quanto mais resistente é a espécie de madeira utilizada nas lamelas do elemento estrutural. No entanto, o seu desempenho depende não só da madeira utilizada mas ainda de outros aspetos não menos importantes, como a qualidade da colagem e outros relacionados essencialmente com a aplicação dos elementos estruturais em obra, relacionados com a adequada utilização dos elementos de madeira lamela colada face ao tipo de ambiente ou condições a que serão expostos.

É sabido que a degradação das juntas coladas em elementos de madeira lamelada colada está muito associada às condições de exposição em fase de serviço. A degradação da própria madeira enquanto material estrutural acelera também o processo de degradação da junta colada, sendo que existem vários princípios e agentes de degradação da madeira. Sob o ponto de vista de durabilidade das obras de madeira, a noção de risco de biodegradação, é relacionada com o conceito da classe de serviço da estrutura.

5.2 Principais conclusões

Ensaio ao corte

Em termos médios, as resistências obtidas durante os ensaios ao corte, quer para a madeira quer para a junta colada, situam-se dentro do esperado. Existe uma evidência clara de que as vigas de madeira lamelada colada com cola MUF apresentam melhores resultados face às vigas com cola PRF com maior secção transversal, seguindo a tendência apresentada por Gaspar (2010). Aliás, os próprios resultados em termos de resistência são bastante

consistentes com os apresentados pelo mesmo autor. Seguindo a mesma lógica, também a percentagem de rotura pela madeira se verificou maior para as vigas com cola MUF, uma vez que existe maior tendência para a rotura se dar pela madeira e não pela junta.

Em termos da influência do envelhecimento, comparando a resistência entre amostras retiradas de vigas sem envelhecimento e amostras retiradas das mesmas vigas após terem sido sujeitas a um processo de envelhecimento natural, os resultados parecem indicar que nalguns casos existe uma diminuição das resistências pela madeira e pela junta colada. Verificou-se ainda que o efeito do envelhecimento é mais gravoso para a madeira do que para a junta colada. Ambas as resistências são afetadas, mas no caso da madeira este efeito é mais ostensivo.

Ainda assim, verificou-se que no que concerne às vigas de madeira lamelada colada de Espruce com cola MUF, o tempo de envelhecimento parece não afetar negativamente as resistências obtidas, isto é, não existiu uma clara tendência decrescente da resistência pela madeira e pela junta colada com o aumento do tempo de envelhecimento. Algumas vigas com mais tempo de envelhecimento obtiveram resultados melhores que outras com menos tempo de envelhecimento.

Uma viga com mais tempo de envelhecimento não quer dizer que reaja da mesma forma às condições atmosféricas que uma viga com menos tempo de envelhecimento, sendo que esta poderá apresentar maiores vestígios de delaminação e com isso os resultados serem inferiores a outras com mais tempo de envelhecimento.

Ensaios com ultrassons

Observou-se uma clara diferença entre a localização das gamas de frequência com maiores amplitudes, devido essencialmente às alterações que a onda ultrassónica sofre no trajeto entre a sonda emissora e recetora. No entanto, foi possível observar algumas semelhanças entre ambos espectros em termos de picos de amplitude.

Foi realizada uma análise da afinidade dos resultados obtidos com os ultra-sons com as resistências obtidas nos ensaios ao corte, estudando vários domínios. No domínio do tempo foram obtidos coeficientes de correlação bastante significativos, sobretudo para durações de onda entre os 5 μ s e 35 μ s e, num patamar secundário, até durações de onda na casa dos 50 μ s.

Os resultados utilizando a onda no domínio da frequência e utilizando a velocidade e a onda no domínio da frequência foram igualmente positivos, seguindo a mesma coerência obtida nos resultados no domínio do tempo. No entanto, os resultados utilizando a velocidade e os parâmetros ultrassônicos não foram tão positivos, sobretudo no que concerne às vigas de madeira lamelada colada de Espruce com cola MUF.

De um modo geral, foram obtidas boas correlações em termos médios para qualquer uma das análises efetuadas. Ficou também evidente, que os resultados foram sempre melhores nos primeiros 50 μ s de duração de onda ultrassônica. De facto, é nesta zona inicial que se pode obter melhor informação ultrassônica. A partir daqui os resultados parecem dispersar bastante, não se encontrando compatibilidade com os resultados obtidos através dos ensaios ao corte.

5.3 Desenvolvimentos futuros

Até hoje, a maioria dos estudos efetuados acerca da integridade das juntas coladas de madeira lamelada colada assentam sobretudo na análise de amostras onde foram introduzidos defeitos de colagem propositadamente, de modo a averiguar se com recurso aos ultra-sons seria possível detetar esses defeitos.

No entanto, ainda que nos últimos anos este tipo de material se tenha generalizado na aplicação em estruturas podendo em muitas situações colocar em causa os parâmetros de qualidade em fase de fabrico, atualmente, os padrões de qualidade são bastante mais apertados e a regularização por normas europeias e permite afirmar que a qualidade com que hoje se fabricam os elementos de madeira lamelada colada demonstra que a existência de defeitos de fabrico nas juntas coladas não tem de ser um dado adquirido, pelo que importa também, avaliar a integridade de estruturas em serviço onde as juntas sofram fenómenos de degradação não relacionados com defeitos de execução mas sim devidos a fatores eventualmente alheios à qualidade da colagem, e nesse caso, fora do âmbito dos ensaios de juntas onde foram artificialmente introduzidos defeitos.

Este trabalho teve como grande objetivo estudar essa mesma possibilidade, estudando amostras apenas sujeitas a um processo de envelhecimento natural, que acarreta várias

consequências na perda de resistência dos elementos, em estruturas em serviço. Dessa forma, seria possível avaliar *in situ* a resistência residual dos elementos e prever fenómenos de rotura da estrutura, com vista à sua reparação e/ou reforço.

Futuramente seria de grande interesse alargar esta campanha de ensaios de forma a obter o maior número de resultados possíveis. Só com resultados se podem estudar hipóteses e métodos não destrutivos de ensaio sobre vigas de madeira lamelada colada. Julga-se que seria interessante avaliar vigas com tempos de envelhecimento menos espaçados no tempo, uma vez que ficou comprovado que existe uma grande variação de resultados para vigas com tempos de envelhecimento muito distantes. Pensa-se que existe também bastante interesse em continuar a fazer uma avaliação focada nos dois tipos de cola MUF e PRF porque, de facto, existiu uma diferença nos coeficientes de correlação obtidos, no entanto, será muito importante que este tipo de trabalho seja alargado a outros tipos de cola, nomeadamente abrangendo as colas de poliuretano.

A continuidade de estudos neste âmbito poderá ser a chave na comprovação do método de ensaios com ultra-sons como um método válido na avaliação da integridade das juntas coladas de madeira lamelada colada em estado de serviço, o que seria um grande avanço técnico nesta área estrutural.

Bibliografia

ASTM D905 (1994). Standard Test Method for Strength Properties of Adhesive Bonds in Shear by Compression Loading, American Society for Testing and Materials. Annual book of ASTM standards, vol. 15.06.

ASTM E1316 (2008). Standard Terminology for Nondestructive Examinations, American Society for Testing and Materials. Annual book of ASTM standards, vol. 03.03.

Beall, F. C (2002a). Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties, *Wood Science and Technology* 36: 197-212.

Beall, F. C. e J. Biernacki (1992). An approach to the evaluation of glulam beams through acousto-ultrasonics, 8th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Vancouver, WA.

Biernacki, J. M. e F. C. Beall (1993a). Development of an acousto-ultrasonic scanning system for nondestructive evaluation of wood and wood laminates, *Wood and Fiber Sci.*, 25(3): 289-297.

Biernacki, J. M. e F. C. Beall (1993b). Evaluation of the quality of adhesive bonding in parallel wood laminates, Second International Conference on Acousto-Ultrasonics, Atlanta, The American Society for Nondestructive Testing, Inc.

Bucur, V. (1995). Wood Acoustic Characterization by Ultrasound, IEEE Ultrasonics Symposium.

Bucur, V. (2006). *Acoustic of Wood*, Springer, ISBN: 3-540-26123-0, 315-332.

Carvalho, A. (1996). *Madeiras Portuguesas – Estrutura Anatómica, Propriedades, Utilizações*, Vol. II, Direção Geral de Florestas, Lisboa.

Cruz, H. (2007). Estruturas de madeira lamelada colada em Portugal, Instrumentos para a garantia da qualidade, *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, Série II, n.º1, LNEC, Lisboa.

Dibuz, J. J. e F. J. Shelton (1967). Glueline identification. *Forest Prod J* 17(10): 20-22.

Dill-Langer, G., S. Aicher e W. Bernauer (2005a). Reflection measurements at timber glue-lines by means of ultrasound shear waves. *Otto-Graf-Journal* 16: 273-284.

- Dill-Langer, G., W. Bernauer e S. Aicher (2005b). Inspection of glue-lines of glued-laminated timber by means of ultrasonic testing, 14th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, University of Applied Sciences, Germany, Eberswalde.
- Duke, J. J. (1988). Acousto-ultrasonics. Theory and application. New York, Plenum Press.
- EN 301 (1992). Adhesives of phenolic and aminoplastic nature, for wood structures: classification and performance requirements. Brussels,
- EN 385 (2001). Finger jointed structural timber – Performance requirements and minimum production requirements. Brussels, European Committee for Standardization.
- EN 391 (2001). Glued laminated timber. Delamination test of glue lines. European Committee for Standardization, European Committee for Standardization: 9.
- EN 392 (1995). Glued laminated timber. Shear test of glue lines, European Committee for Standardization: 12.
- EN 408 (2003). Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties, European Committee for Standardization.
- EN 1995-1-1 (2004). Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings, European Committee for Standardization.
- Fitting, D. W. e L. Adler (1981). Ultrasonic Spectral Analysis for Nondestructive Evaluation. New York Plenum Press.
- FPL (1999). Wood Handbook – Wood as an engineering material, Forest Products Laboratory, Madison.
- Gaspar, F., H. Cruz, L. Nunes e A. Gomes (2005). Fabrico de estruturas lameladas-coladas com madeira de pinho bravo tratada em autoclave, 5^o Congr. Florestal Nacional, Viseu.
- Gaspar, F. (2006a). Estruturas de Madeira lamelada-colada – Viabilidade da utilização da madeira de pinho bravo tratada com produto preservador, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Construção, Instituto Superior Técnico, Lisboa, p. 359.
- Gaspar, F. (2010). Avaliação da integridade de estruturas de madeira lamelada colada em serviço, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, p. 344.
- Gibson, M. D. e R. L. Krahmer (1980). Staining to make urea-formaldehyde resin visible on glued wood surfaces. Forest Prod J 30(1): 46-48.
- Govic, C. L. (2008). Le bois lamellé collé, Chronique Scientifique et Technique, Revue Experts, n.º 79, Paris.
- Grunwald, D. (2002). COST Action E1 – State-of-the-art report, Volume 1, Wood adhesion and glued products, working group 1: wood adhesives, European Commission, Directorate-General for Research, Luxembourg, ISBN: 92-894-4891-1, 191 p.
- Hasegawa, M. (2010). Effect of wood properties on within-tree variations in ultrasonic wave velocity in softwood.

Kawamoto, S. e R. S. Williams (2002). Acoustic Emission and Acousto-Ultrasonic Techniques for Wood and Wood-Based Composites – A Review, Madison, Wisconsin, Forest Products Laboratory.

Kočiš, Š. e Z. Figura 1996. Ultrasonic Measurements and Technologies, London, Chapman & Hall, ISBN: 0-412-63850-9, 5-28.

Künniger, T. (2008). A semi-automatic method to determine the wood failure percentage on shear test specimens. Holz Roh Werkst 66: 229-232.

Machado, J. Saporiti, H. Cruz, L. Nunes e G. Monteiro (1997). Madeira para construção – M1 – Especificação de madeiras para estruturas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Machado, J. (2003). Avaliação da variação das propriedades mecânicas de pinho bravo (*Pinus pinaster* Ait.) por meio de ultrassons, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, p. 288.

Marchand, G. E., Brühlhart, N., Rätz, C., Dill, E., Eichmüller, R. e Madörin, R. (1989). Bois lamellé-collé, Office fédérale des questions conjoncturelles, Berne, 153 p.

Mateus, T. J. (1961). Bases para o dimensionamento de estruturas de madeira, Memória n.º 179. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Moody, R. C., Hernandez, R. e Liu, J. Y. (1999). Glued structural member. In: Wood handbook. Wood as an engineering material, Forest Products Laboratory, General Technical Report, FPL-GTR – 113. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Chap. 11, 463 p.

Negrão, J., e Faria, A. (2009). Projeto de Estruturas de Madeira, Publindústria, ISBN: 978-972-8953-36-2.

NP 3672 (1990). Colas, Terminologia, Definições, Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

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

Reis, H. L. (1989). Nondestructive evaluation of adhesive bond strength in laminated wood beams, British Journal of NDT 31(12): 675-679.

Reis, H. L., F. C. Beall, J. V. Carnahan, M. L. Chica, K. A. Miller e V. M. Klick (1990a). Nondestructive evaluation/characterization of adhesive bonded connections in wood structures. Nondestructive Testing and Evaluation for Manufacturing and Construction, Urbana, IL.

Sandoz, J. L. (1993). Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading, Wood Sci. Technology, 27: 373-380.

Vary, A. (1979). Ultrasonic measurement of material properties. In: Research techniques in nondestructive testing. R. S. Sharpe e (eds). London, Academic Press, 4: 159-204.

Vary, A. e R. F. Lark (1979). Correlation of fiber composite tensile strength with the ultrasonic stress wave factor, J. Test Eval 7: 185-191.

Sítios da internet

<http://www.glulam.org>, SNCCBLC - Syndicat National des Constructeurs et Fournisseurs de Charpentes en Bois Lamellé Collé (acedido em 31 de Outubro, 2012).

<http://www.glulam.co.uk>, GLTA - Glued Laminated Timber Association (acedido em 31 de Outubro, 2012).

<http://www.lilleheden.dk>, Lilleheden Limtræ – dit stærke valg (acedido em 31 de Outubro, 2012).

<http://fr.structurae.de>, Base de données international du patrimoine du génie civil (acedido em 31 de Outubro, 2012).

http://en.wikipedia.org/wiki/Centre_Pompidou-Metz, Wikipedia, The Free Encyclopedia (acedido em 31 de Outubro, 2012).

<http://philippe.berger2.free.fr/Bois/Cours/BLC/BLC.htm>, Génie Mécanique (acedido em 7 de Novembro, 2012).

Anexos

Anexo I – Resultados dos ensaios ao corte

Anexo II – Gráficos dos resultados da calibração

ANEXO I

Resultados dos ensaios ao corte

Designação da viga: M4 – Madeira lamelada colada com cola MUF
Tempo de envelhecimento: 12 meses

Proвете				Velocidade aplicação carga (kN/s)		Madeira				Junta				Pesos									
Viga	Tipo	Zona	Nº proveite	Nº lamela ou junta		Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _m (N)	Tempo (s)	F _m /A (N/mm ²)	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _j (N)	Tempo (s)	F _j /A (N/mm ²)	WFP (%)	Antes ensaio (g)	Após ensaio (g)	mV _{m3} kg/m ³	Após secagem (g)	Teor de água ensaio (%)		
M4	bg	1	a	1	0,5	50,5	50,5	21630	42	8,5	50,5	50,5	24270	48	9,5	95							
M4	bg	1	a	2	0,5	50,5	50,5	31770	63	12,5	50,5	50,5	27550	54	10,8	95		299,17	299,04	489	265,19	12,8	
M4	bg	1	a	3	0,5	50,5	50,5	34440	68	13,5	50,5	50,5	28680	56	11,2	75							
M4	bg	1	a	4	0,5	50,5	50,5	31190	61	12,2	50,5	50,5	30640	60	12,0	85							
M4	bg	1	a	5	0,5	50,5	50,5	29500	58	11,6	50,5	50,5	25930	51	10,2	100							
M4	bg	1	a	6	0,5	50,5	50,5	35550	70	13,9													
M4	bg	2	a	1	0,5	50,5	50,5	21470	42	8,4	50,5	50,5	22710	44	8,9	92,5							
M4	bg	2	a	2	0,5	50,5	50,5	37280	74	14,6	50,5	50,5	34730	68	13,6	90							
M4	bg	2	a	3	0,5	50,5	50,5	35350	70	13,9	50,5	50,5	24560	48	9,6	100		293,77	293,59	480	260,30	12,8	
M4	bg	2	a	4	0,5	50,5	50,5	26690	52	10,5	50,5	50,5	28520	56	11,2	95							
M4	bg	2	a	5	0,5	50,5	50,5	28870	57	11,3	50,5	50,5	22870	45	9,0	92,5							
M4	bg	2	a	6	0,5	50,5	50,5	30550	60	12,0													
M4	bg	3	a	1	0,5	50,5	50,5	25360	50	9,9	50,5	50,5	19890	39	7,8	82,5							
M4	bg	3	a	2	0,5	50,5	50,5	28690	56	11,2	50,5	50,5	23720	46	9,3	95							
M4	bg	3	a	3	0,5	50,5	50,5	34970	69	13,7	50,5	50,5	28320	56	11,1	95		293,77	293,63	480	260,12	12,9	
M4	bg	3	a	4	0,5	50,5	50,5	28330	56	11,1	50,5	50,5	28770	57	11,3	100							
M4	bg	3	a	5	0,5	50,5	50,5	30140	59	11,8	50,5	50,5	25080	49	9,8	97,5							
M4	bg	3	a	6	0,5	50,5	50,5	30270	60	11,9													
M4	bg	4	a	1	0,5	50,5	50,5	25310	50	9,9	50,5	50,5	24260	48	9,5	90							
M4	bg	4	a	2	0,5	50,5	50,5	31360	62	12,3	50,5	50,5	30640	60	12,0	92							
M4	bg	4	a	3	0,5	50,5	50,5	35580	70	14,0	50,5	50,5	29470	58	11,6	85							
M4	bg	4	a	4	0,5	50,5	50,5	25770	51	10,1	50,5	50,5	29710	58	11,6	95		292,15	292,00	477	258,95	12,8	
M4	bg	4	a	5	0,5	50,5	50,5	25840	51	10,1	50,5	50,5	22590	44	8,9	95							
M4	bg	4	a	6	0,5	50,5	50,5	29240	57	11,5													
M4	bg	5	a	1	0,5	50,5	50,5	19060	37	7,5	50,5	50,5	31000	61	12,2	100							
M4	bg	5	a	2	0,5	50,5	50,5	30230	59	11,9	50,5	50,5	27840	55	10,9	92,5							
M4	bg	5	a	3	0,5	50,5	50,5	36320	72	14,2	50,5	50,5	29790	59	11,7	90							
M4	bg	5	a	4	0,5	50,5	50,5	17790	35	7,0	50,5	50,5	23290	46	9,1	95		300,27	300,10	491	266,42	12,6	
M4	bg	5	a	5	0,5	50,5	50,5	28660	56	11,2	50,5	50,5	17920	35	7,0	95							
M4	bg	5	a	6	0,5	50,5	50,5	29950	59	11,7													

Viga	Provete			Velocidade aplicação carga (kN/s)	Madeira					Junta					Pesos					
	Tipo	Zona	Nº provete		Nº lamela ou junta	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _m (N)	Tempo (s)	F _m /A (N/mm ²)	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _i (N)	Tempo (s)	F _i /A (N/mm ²)	WFP (%)	Antes ensaio (g)	Após ensaio (g)	mV _m kg/m ³	Após secagem (g)
M4	bg	1	b	1	0,5	50,5	20870	41	-	50,5	50,5	22970	45	9,0	90					
M4	bg	1	b	2	0,5	50,5	35840	71	14,1	50,5	50,5	24590	48	9,6	80					
M4	bg	1	b	3	0,5	50,5	31000	61	12,2	50,5	50,5	20220	39	7,9	99					
M4	bg	1	b	4	0,5	50,5	26430	52	10,4	50,5	50,5	26160	51	10,3	98					12,7
M4	bg	1	b	5	0,5	50,5	26100	51	10,2	50,5	50,5	19140	37	7,5	85					
M4	bg	1	b	6	0,5	50,5	35790	71	14,0	50,5	50,5	22060	43	8,7	92					
M4	bg	2	b	1	0,5	50,5	22730	44	8,9	50,5	50,5	34010	67	13,3	100					
M4	bg	2	b	2	0,5	50,5	35030	69	13,7	50,5	50,5	18200	35	7,1	100					
M4	bg	2	b	3	0,5	50,5	35250	70	13,8	50,5	50,5	23360	46	9,2	70					12,7
M4	bg	2	b	4	0,5	50,5	25720	50	10,1	50,5	50,5	28210	55	11,1	90					
M4	bg	2	b	5	0,5	50,5	26400	52	10,4	50,5	50,5	25090	49	9,8	82,5					
M4	bg	2	b	6	0,5	50,5	25160	49	9,9	50,5	50,5	31990	63	12,5	100					
M4	bg	3	b	1	0,5	50,5	21150	41	8,3	50,5	50,5	23910	47	9,4	95					
M4	bg	3	b	2	0,5	50,5	30120	59	11,8	50,5	50,5	25760	51	10,1	75					12,8
M4	bg	3	b	3	0,5	50,5	36170	71	14,2	50,5	50,5	23340	46	9,2	90					
M4	bg	3	b	4	0,5	50,5	26400	52	10,4	50,5	50,5	26700	52	10,7	82,5					
M4	bg	3	b	5	0,5	50,5	27100	53	10,6	50,5	50,5	30140	59	12,1	85					
M4	bg	3	b	6	0,5	50,5	25310	50	9,9	50,5	50,5	19230	37	7,7	92,5					
M4	bg	4	b	1	0,5	50	23730	46	9,5	50	50	26700	52	10,7	82,5					
M4	bg	4	b	2	0,5	50	33130	65	13,3	50	50	30140	59	12,1	85					
M4	bg	4	b	3	0,5	50	41000	81	16,4	50	50	19230	37	7,7	92,5					
M4	bg	4	b	4	0,5	50	23570	46	9,4	50	50	27620	54	11,0	98					12,8
M4	bg	4	b	5	0,5	50	16330	32	-	50	50	22760	45	9,1	100					
M4	bg	4	b	6	0,5	50	25780	51	10,3	50	50	24730	48	9,7	95					
M4	bg	5	b	1	0,5	50,5	22650	44	8,9	50,5	50,5	27420	54	10,8	98					
M4	bg	5	b	2	0,5	50,5	27860	55	10,9	50,5	50,5	22400	44	8,8	90					
M4	bg	5	b	3	0,5	50,5	31990	63	12,5	50,5	50,5	18790	37	-	80					12,6
M4	bg	5	b	4	0,5	50,5	27040	53	10,6	50,5	50,5	19420	38	7,6	100					
M4	bg	5	b	5	0,5	50,5	24070	47	9,4	50,5	50,5	285,89	285,73							
M4	bg	5	b	6	0,5	50,5	26630	52	10,4	50,5	50,5	253,66	253,75							

Designação da viga: M6 – Madeira lamelada colada com cola MUF
Tempo de envelhecimento: 18 meses

Viga	Proвете			Velocidade aplicação carga (kN/s)	Madeira			Junta						Pesos				Teor de água ensaio (%)						
	Tipo	Zona	Nº proveite		Nº lamela ou junta	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _m (N)	Tempo (s)	F _m /A (N/mm ²)	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _j (N)	Tempo (s)	F _j /A (N/mm ²)	WFP (%)	Antes ensaio (g)		Após ensaio (g)	mV _{m3} kg/m ³	Após secagem (g)			
M6	bg	1	a	1	50,5	50,5	29740	58	11,7	50,5	50,5	32750	65	12,8	95									
M6	bg	1	a	2	50,5	50,5	28590	56	11,2	50,5	50,5	24620	48	9,7	97,5									
M6	bg	1	a	3	50,5	50,5	26140	51	10,2	50,5	50,5	25280	50	9,9	100									
M6	bg	1	a	4	50,5	50,5	28260	56	11,1	50,5	50,5	26050	51	10,2	100						12,9			
M6	bg	1	a	5	50,5	50,5	27610	54	10,8	50,5	50,5	24780	49	9,7	100									
M6	bg	1	a	6	50,5	50,5	26740	52	10,5															
M6	bg	2	a	1	50,5	50,5	31080	61	12,2	50,5	50,5	30220	59	11,8	100									
M6	bg	2	a	2	50,5	50,5	30270	60	11,9	50,5	50,5	25500	50	10,0	97,5									
M6	bg	2	a	3	50,5	50,5	32400	64	12,7	50,5	50,5	27500	54	10,8	100									
M6	bg	2	a	4	50,5	50,5	24890	49	9,8	50,5	50,5	28090	55	11,0	97,5							13,0		
M6	bg	2	a	5	50,5	50,5	24950	49	9,8	50,5	50,5	23080	45	9,1	100									
M6	bg	2	a	6	50,5	50,5	24530	48	9,6															
M6	bg	3	a	1	50,5	50,5	36600	72	14,4	50,5	50,5	32080	63	12,6	97,5									
M6	bg	3	a	2	50,5	50,5	30340	60	11,9	50,5	50,5	27520	54	10,8	100									
M6	bg	3	a	3	50,5	50,5	26080	51	10,2	50,5	50,5	26880	53	10,5	100									
M6	bg	3	a	4	50,5	50,5	27500	54	10,8	50,5	50,5	28230	55	11,1	100								13,0	
M6	bg	3	a	5	50,5	50,5	28950	57	11,4	50,5	50,5	22190	43	8,7	100									
M6	bg	3	a	6	50,5	50,5	24140	47	9,5															
M6	bg	4	a	1	50,5	50,5	29310	58	11,5	50,5	50,5	24450	48	9,6	100									
M6	bg	4	a	2	50,5	50,5	33350	66	13,1	50,5	50,5	27230	53	10,7	87,5									
M6	bg	4	a	3	50,5	50,5	25200	49	9,9	50,5	50,5	23300	46	9,1	87,5									
M6	bg	4	a	4	50,5	50,5	25370	50	9,9	50,5	50,5	25210	49	9,9	100								13,0	
M6	bg	4	a	5	50,5	50,5	27130	53	10,6	50,5	50,5	24610	48	9,7	100									
M6	bg	4	a	6	50,5	50,5	25900	51	10,2															
M6	bg	5	a	1	50,5	50,5	34150	67	13,4	50,5	50,5	27010	53	10,6	100									
M6	bg	5	a	2	50,5	50,5	32990	65	12,9	50,5	50,5	28560	56	11,2	97,5									
M6	bg	5	a	3	50,5	50,5	32980	65	12,9	50,5	50,5	28310	56	11,1	95									
M6	bg	5	a	4	50,5	50,5	32900	65	12,9	50,5	50,5	32690	64	12,8	100									12,9
M6	bg	5	a	5	50,5	50,5	29780	59	11,7	50,5	50,5	23710	46	9,3	97,5									
M6	bg	5	a	6	50,5	50,5	29270	58	11,5															

Viga	Provete				Velocidade aplicação carga (kN/s)	Madeira				Junta						Pesos				
	Tipo	Zona	Nº provete	Nº lamela ou junta		Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _m (N)	Tempo (s)	F _m /A (N/mm ²)	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _j (N)	Tempo (s)	F _j /A (N/mm ²)	WFP (%)	Antes ensaio (g)	Após ensaio (g)	mV _m kg/m ³	Após secagem (g)
M6	bg	1	b	1	0,5	50,5	28770	57	11,3	50,5	50,5	18580	36	7,3	97,5					
M6	bg	1	b	2	0,5	50,5	28810	57	11,3	50,5	50,5	21020	41	8,2	97,5					
M6	bg	1	b	3	0,5	50,5	25260	50	9,9	50,5	50,5	27400	54	10,7	95				254,96	12,9
M6	bg	1	b	4	0,5	50,5	28910	57	11,3	50,5	50,5	24700	48	9,7	97,5		287,75	287,75	470	
M6	bg	1	b	5	0,5	50,5	25500	50	10,0	50,5	50,5	22260	44	8,7	100					
M6	bg	1	b	6	0,5	50,5	24890	49	9,8	50,5	50,5									
M6	bg	2	b	1	0,5	50,5	26550	52	10,4	50,5	50,5	27680	54	10,9	90					
M6	bg	2	b	2	0,5	50,5	26680	52	10,5	50,5	50,5	19240	37	7,5	100					
M6	bg	2	b	3	0,5	50,5	29600	58	11,6	50,5	50,5	26520	52	10,4	100					
M6	bg	2	b	4	0,5	50,5	27070	53	10,6	50,5	50,5	26380	52	10,3	95				256,19	13,0
M6	bg	2	b	5	0,5	50,5	26390	52	10,3	50,5	50,5	23480	46	9,2	97,5					
M6	bg	2	b	6	0,5	50,5	27780	55	10,9	50,5	50,5									
M6	bg	3	b	1	0,5	50,5	32810	65	12,9	50,5	50,5	28910	57	11,3	87,5					
M6	bg	3	b	2	0,5	50,5	28330	56	11,1	50,5	50,5	18350	36	7,2	100					
M6	bg	3	b	3	0,5	50,5	25500	50	10,0	50,5	50,5	27100	53	10,6	100					
M6	bg	3	b	4	0,5	50,5	27870	55	10,9	50,5	50,5	28120	55	11,0	100				265,00	12,9
M6	bg	3	b	5	0,5	50,5	26420	52	10,4	50,5	50,5	20620	40	8,1	100					
M6	bg	3	b	6	0,5	50,5	24830	49	9,7	50,5	50,5									
M6	bg	4	b	1	0,5	50,5	28330	56	11,2	50,5	50	23580	46	9,3	90					
M6	bg	4	b	2	0,5	50,5	21370	42	-	50,5	50	21010	41	-	100					
M6	bg	4	b	3	0,5	50,5	26210	51	10,4	50,5	50	22250	44	8,8	100					
M6	bg	4	b	4	0,5	50,5	28040	55	11,1	50,5	50	27770	55	11,0	100				267,80	13,0
M6	bg	4	b	5	0,5	50,5	22420	44	8,9	50,5	50	21600	42	8,6	97,5					
M6	bg	4	b	6	0,5	50,5	21700	42	8,6	50,5	50									
M6	bg	5	b	1	0,5	50,5	26850	53	10,6	50,5	50	22090	43	8,7	100					
M6	bg	5	b	2	0,5	50,5	27990	55	11,1	50,5	50	24040	47	9,5	97,5					
M6	bg	5	b	3	0,5	50,5	28120	55	11,1	50,5	50	24250	48	9,6	87,5					
M6	bg	5	b	4	0,5	50,5	29870	59	11,8	50,5	50	26000	51	10,3	95				261,16	12,9
M6	bg	5	b	5	0,5	50,5	30190	59	12,0	50,5	50	23600	46	9,3	90					
M6	bg	5	b	6	0,5	50,5	24650	48	9,8	50,5	50									

Designação da viga: M8 – Madeira lamelada colada com cola MUF
Tempo de envelhecimento: 24 meses

Viga	Proвете			Velocidade aplicação carga (kN/s)	Madeira			Junta				Pesos				Teor de água ensaio (%)						
	Tipo	Zona	Nº provete		Nº lamela ou junta	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _m (N)	Tempo (s)	F _m /A (N/mm ²)	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _j (N)	Tempo (s)	F _j /A (N/mm ²)		WFP (%)	Antes ensaio (g)	Após ensaio (g)	mV _m kg/m ³	Após secagem (g)	
M8	bg	1	a	1	50,5	50,5	31480	62	12,3	50,5	50,5	20580	40	8,1	99							
M8	bg	1	a	2	50,5	50,5	27810	55	10,9	50,5	50,5	23500	46	9,2	100							
M8	bg	1	a	3	50,5	50,5	27610	54	10,8	50,5	50,5	19710	38	7,7	97,5		284,73	284,77	465	253,13	12,5	
M8	bg	1	a	4	50,5	50,5	29060	57	11,4	50,5	50,5	24730	48	9,7	90							
M8	bg	1	a	5	50,5	50,5	27560	54	10,8	50,5	50,5	25520	50	10,0	95							
M8	bg	1	a	6	50,5	50,5	26930	53	10,6													
M8	bg	2	a	1	50,5	50,5	30370	60	11,9	50,5	50,5	28740	56	11,3	100							
M8	bg	2	a	2	50,5	50,5	26720	52	10,5	50,5	50,5	25190	49	9,9	98							
M8	bg	2	a	3	50,5	50,5	24580	48	9,6	50,5	50,5	28470	56	11,2	97,5		293,48	293,51	479	260,90	12,5	
M8	bg	2	a	4	50,5	50,5	32340	64	12,7	50,5	50,5	29750	59	11,7	90							
M8	bg	2	a	5	50,5	50,5	31020	61	12,2	50,5	50,5	29560	58	11,6	95							
M8	bg	2	a	6	50,5	50,5	31740	62	12,4													
M8	bg	3	a	1	50,5	50,5	31650	62	12,4	50,5	50,5	22020	43	8,6	97,5							
M8	bg	3	a	2	50,5	50,5	24900	49	9,8	50,5	50,5	21460	42	8,4	99							
M8	bg	3	a	3	50,5	50,5	31290	62	12,3	50,5	50,5	29100	57	11,4	85							
M8	bg	3	a	4	50,5	50,5	28010	55	11,0	50,5	50,5	20600	40	8,1	100		289,99	290,01	474	257,30	12,7	
M8	bg	3	a	5	50,5	50,5	29390	58	11,5	50,5	50,5	28080	55	11,0	92,5							
M8	bg	3	a	6	50,5	50,5	28920	57	11,3													
M8	bg	4	a	1	50,5	50,5	27860	55	10,9	50,5	50,5	28930	57	11,3	97,5							
M8	bg	4	a	2	50,5	50,5	26070	51	10,2	50,5	50,5	17190	33	-	85							
M8	bg	4	a	3	50,5	50,5	29720	58	11,7	50,5	50,5	26330	52	10,3	97,5							
M8	bg	4	a	4	50,5	50,5	25260	50	9,9	50,5	50,5	20490	40	8,0	90		288,41	288,40	471	255,75	12,8	
M8	bg	4	a	5	50,5	50,5	28230	55	11,1	50,5	50,5	28490	56	11,2	100							
M8	bg	4	a	6	50,5	50,5	24940	49	9,8													
M8	bg	5	a	1	50,5	50,5	29660	58	11,6	50,5	50,5	24490	48	9,6	97,5							
M8	bg	5	a	2	50,5	50,5	26750	53	10,5	50,5	50,5	28010	55	11,0	90							
M8	bg	5	a	3	50,5	50,5	28110	55	11,0	50,5	50,5	27730	54	10,9	100							
M8	bg	5	a	4	50,5	50,5	27870	55	10,9	50,5	50,5	23400	46	9,2	80		305,72	305,70	499	271,48	12,6	
M8	bg	5	a	5	50,5	50,5	28720	56	11,3	50,5	50,5	18020	35	-	85							
M8	bg	5	a	6	50,5	50,5	26000	51	10,2													

Viga	Provete			Velocidade aplicação carga (kN/s)	Madeira				Junta				Pesos								
	Tipo	Zona	Nº provete		Nº lamela ou junta	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _m (N)	Tempo (s)	F _m /A (N/mm ²)	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _j (N)	Tempo (s)	F _j /A (N/mm ²)	WFP (%)	Antes ensaio (g)	Após ensaio (g)	mV _m kg/m ³	Após secagem (g)	Teor de água ensaio (%)
M8	bg	1	b	1	50,5	50,5	30010	59	11,8	50,5	50,5	16780	33	6,6	98						
M8	bg	1	b	2	50,5	50,5	18610	36	7,3	50,5	50,5	24190	47	9,5	97,5						
M8	bg	1	b	3	50,5	50,5	25470	50	10,0	50,5	50,5	20790	41	8,2	100		282,67	282,69	462	250,98	12,6
M8	bg	1	b	4	50,5	50,5	22920	45	9,0	50,5	50,5	22910	45	9,0	97,5						
M8	bg	1	b	5	50,5	50,5	22910	45	9,0	50,5	50,5	23450	46	9,2	95						
M8	bg	1	b	6	50,5	50,5	22930	45	9,0	50,5	50,5	23450	46	9,2	95						
M8	bg	2	b	1	50,5	50,5	27450	54	10,8	50,5	50,5	23830	47	9,3	100						
M8	bg	2	b	2	50,5	50,5	23740	46	9,3	50,5	50,5	17910	35	7,0	99						
M8	bg	2	b	3	50,5	50,5	25080	49	9,8	50,5	50,5	22850	45	9,0	97,5						
M8	bg	2	b	4	50,5	50,5	26980	53	10,6	50,5	50,5	19820	39	-	90		293,03	293,00	479	259,86	12,8
M8	bg	2	b	5	50,5	50,5	23330	46	9,1	50,5	50,5	23930	47	9,4	85						
M8	bg	2	b	6	50,5	50,5	26080	51	10,2	50,5	50,5	23930	47	9,4	85						
M8	bg	3	b	1	50,5	50,5	30840	61	12,1	50,5	50,5	21980	43	8,6	100						
M8	bg	3	b	2	50,5	50,5	23600	46	9,3	50,5	50,5	18490	36	7,3	100						
M8	bg	3	b	3	50,5	50,5	23150	45	9,1	50,5	50,5	24650	48	9,7	99						
M8	bg	3	b	4	50,5	50,5	16300	32	6,4	50,5	50,5	22010	43	8,6	97,5		287,72	287,71	470	254,95	12,8
M8	bg	3	b	5	50,5	50,5	25380	50	10,0	50,5	50,5	24740	48	9,7	85						
M8	bg	3	b	6	50,5	50,5	15270	30	-	50,5	50,5	24740	48	9,7	85						
M8	bg	4	b	1	51	50,5	29650	58	11,5	51	50,5	26100	51	10,1	95						
M8	bg	4	b	2	51	50,5	21320	42	8,3	51	50,5	16900	33	6,6	100						
M8	bg	4	b	3	51	50,5	23930	47	9,3	51	50,5	22870	45	8,9	100						
M8	bg	4	b	4	51	50,5	23840	47	9,3	51	50,5	19910	39	7,7	92,5		285,56	285,52	462	253,12	12,8
M8	bg	4	b	5	51	50,5	25400	50	9,9	51	50,5	27730	54	10,8	97,5						
M8	bg	4	b	6	51	50,5	22600	44	8,8	51	50,5	27730	54	10,8	97,5						
M8	bg	5	b	1	50,5	50,5	27020	53	10,6	50,5	50,5	23190	45	9,1	97,5						
M8	bg	5	b	2	50,5	50,5	25230	49	9,9	50,5	50,5	19390	38	7,6	100						
M8	bg	5	b	3	50,5	50,5	24720	48	9,7	50,5	50,5	19440	38	7,6	100						
M8	bg	5	b	4	50,5	50,5	23300	46	9,1	50,5	50,5	20720	40	8,1	95		301,58	301,57	493	267,26	12,8
M8	bg	5	b	5	50,5	50,5	26630	52	10,4	50,5	50,5	22770	45	8,9	90						
M8	bg	5	b	6	50,5	50,5	20050	39	-	50,5	50,5	22770	45	8,9	90						

Designação da viga: M9 – Madeira lamelada colada com cola MUF
Tempo de envelhecimento: 26 meses

Viga	Proвете			Velocidade aplicação carga (kN/s)	Madeira			Junta			Pesos									
	Tipo	Zona	Nº provete		Nº lamela ou junta	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _m (N)	Tempo (s)	F _m /A (N/mm ²)	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _j (N)	Tempo (s)	F _j /A (N/mm ²)	WFP (%)	Antes ensaio (g)	Após ensaio (g)	m _{V_m} kg/m ³	Após secagem (g)
M9	bg	1	a	1	50,5	50,5	26760	53	10,5	50,5	50,5	27060	53	10,6	90					
M9	bg	1	a	2	50,5	50,5	32620	64	12,8	50,5	50,5	25040	49	9,8	95					
M9	bg	1	a	3	50,5	50,5	30060	59	11,8	50,5	50,5	27510	54	10,8	92,5					
M9	bg	1	a	4	50,5	50,5	30920	61	12,1	50,5	50,5	27320	54	10,7	80					
M9	bg	1	a	5	50,5	50,5	29060	57	11,4	50,5	50,5	20080	39	-	98,5					
M9	bg	1	a	6	50,5	50,5	19870	39	7,8											
M9	bg	2	a	1	50,5	50	28790	57	11,4	50,5	50,5	18030	35	-	97,5					
M9	bg	2	a	2	50,5	50	28880	57	11,4	50,5	50,5	25910	51	10,3	85					
M9	bg	2	a	3	50,5	50	30490	60	12,1	50,5	50,5	10380	20	-	90					
M9	bg	2	a	4	50,5	50	29610	58	11,7	50,5	50,5	30730	60	12,2	97,5					
M9	bg	2	a	5	50,5	50	29380	58	11,6	50,5	50,5	21180	41	8,4	95					
M9	bg	2	a	6	50,5	50	18640	36	7,4											
M9	bg	3	a	1	50,5	50,5	27740	54	10,9	50,5	50,5	20670	40	8,1	100					
M9	bg	3	a	2	50,5	50,5	24770	49	9,7	50,5	50,5	25950	51	10,2	97,5					
M9	bg	3	a	3	50,5	50,5	30410	60	11,9	50,5	50,5	-	-	-	100					
M9	bg	3	a	4	50,5	50,5	26450	52	10,4	50,5	50,5	27920	55	10,9	98,5					
M9	bg	3	a	5	50,5	50,5	28150	55	11,0	50,5	50,5	-	-	-	100					
M9	bg	3	a	6	50,5	50,5	20120	39	7,9											
M9	bg	4	a	1	50,5	50,5	25550	50	10,0	50,5	50,5	25040	49	9,8	97,5					
M9	bg	4	a	2	50,5	50,5	27840	55	10,9	50,5	50,5	22600	44	8,9	96					
M9	bg	4	a	3	50,5	50,5	34130	67	13,4	50,5	50,5	20910	41	8,2	97,5					
M9	bg	4	a	4	50,5	50,5	24380	48	9,6	50,5	50,5	26730	52	10,5	100					
M9	bg	4	a	5	50,5	50,5	28670	56	11,2	50,5	50,5	15960	31	6,3	92,5					
M9	bg	4	a	6	50,5	50,5	21040	41	8,3											
M9	bg	5	a	1	50,5	50,5	24770	49	9,7	50,5	50,5	22880	45	9,0	100					
M9	bg	5	a	2	50,5	50,5	24170	47	9,5	50,5	50,5	19420	38	7,6	100					
M9	bg	5	a	3	50,5	50,5	36120	71	14,2	50,5	50,5	30090	59	11,8	97,5					
M9	bg	5	a	4	50,5	50,5	28440	56	11,2	50,5	50,5	22460	44	8,8	90					
M9	bg	5	a	5	50,5	50,5	29310	58	11,5	50,5	50,5	27760	55	10,9	95					
M9	bg	5	a	6	50,5	50,5	24700	48	9,7											

Viga	Provete			Velocidade aplicação carga (kN/s)	Madeira				Junta				Pesos								
	Tipo	Zona	Nº provete		Nº lamela ou junta	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _m (N)	Tempo (s)	F _m /A (N/mm ²)	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _j (N)	Tempo (s)	F _j /A (N/mm ²)	WFP (%)	Antes ensaio (g)	Após ensaio (g)	mV _m kg/m ³	Após secagem (g)	Teor de água ensaio (%)
M9	bg	1	b	1	0,5	50,5	26310	52	10,3	50,5	50,5	23450	46	9,2	85						
M9	bg	1	b	2	0,5	50,5	22360	44	8,8	50,5	50,5	24310	48	9,5	95						
M9	bg	1	b	3	0,5	50,5	31250	62	12,3	50,5	50,5	25950	51	10,2	95		306,25	306,05	500	271,43	12,8
M9	bg	1	b	4	0,5	50,5	24650	48	-	50,5	50,5	-	-	-	90						
M9	bg	1	b	5	0,5	50,5	34000	67	13,3	50,5	50,5	21130	41	8,3	100						
M9	bg	1	b	6	0,5	50,5	31450	62	12,3	50,5	50,5	21130	41	8,3	100						
M9	bg	2	b	1	0,5	50,5	29650	58	11,6	50,5	50,5	15380	30	0,0	100						
M9	bg	2	b	2	0,5	50,5	23660	46	9,3	50,5	50,5	24530	48	9,6	80						
M9	bg	2	b	3	0,5	50,5	32130	63	12,6	50,5	50,5	29540	58	11,6	90						
M9	bg	2	b	4	0,5	50,5	30250	60	11,9	50,5	50,5	30120	59	11,8	97,5						
M9	bg	2	b	5	0,5	50,5	30940	61	12,1	50,5	50,5	25910	51	10,2	80						
M9	bg	2	b	6	0,5	50,5	28980	57	11,4	50,5	50,5	25910	51	10,2	80						
M9	bg	3	b	1	0,5	50,5	28000	55	11,0	50,5	50,5	23330	46	9,1	60						
M9	bg	3	b	2	0,5	50,5	19750	39	-	50,5	50,5	26540	52	10,4	85						
M9	bg	3	b	3	0,5	50,5	31230	61	12,2	50,5	50,5	24840	49	9,7	100						
M9	bg	3	b	4	0,5	50,5	11860	23	-	50,5	50,5	27150	53	10,6	80						
M9	bg	3	b	5	0,5	50,5	28640	56	11,2	50,5	50,5	23220	45	9,1	90						
M9	bg	3	b	6	0,5	50,5	23420	46	9,2	50,5	50,5	23220	45	9,1	90						
M9	bg	4	b	1	0,5	50,5	33850	67	13,3	50,5	50,5	25230	49	9,9	85						
M9	bg	4	b	2	0,5	50,5	24580	48	9,6	50,5	50,5	21570	42	-	75						
M9	bg	4	b	3	0,5	50,5	27060	53	10,6	50,5	50,5	29510	58	11,6	90						
M9	bg	4	b	4	0,5	50,5	26320	52	10,3	50,5	50,5	26050	51	10,2	97,5						
M9	bg	4	b	5	0,5	50,5	30760	61	12,1	50,5	50,5	23250	46	9,1	95						
M9	bg	4	b	6	0,5	50,5	24260	48	9,5	50,5	50,5	23250	46	9,1	95						
M9	bg	5	b	1	0,5	50,5	22850	45	-	50,5	50,5	21850	43	-	100						
M9	bg	5	b	2	0,5	50,5	28700	56	11,3	50,5	50,5	24640	48	9,7	100						
M9	bg	5	b	3	0,5	50,5	32920	65	12,9	50,5	50,5	21090	41	8,3	87,5						
M9	bg	5	b	4	0,5	50,5	23000	45	9,0	50,5	50,5	24680	48	9,7	95						
M9	bg	5	b	5	0,5	50,5	26960	53	10,6	50,5	50,5	27350	54	10,7	97,5						
M9	bg	5	b	6	0,5	50,5	24620	48	9,7	50,5	50,5	27350	54	10,7	97,5						
M9	bg	5	b	1	0,5	50,5	22850	45	-	50,5	50,5	21850	43	-	100						
M9	bg	5	b	2	0,5	50,5	28700	56	11,3	50,5	50,5	24640	48	9,7	100						
M9	bg	5	b	3	0,5	50,5	32920	65	12,9	50,5	50,5	21090	41	8,3	87,5						
M9	bg	5	b	4	0,5	50,5	23000	45	9,0	50,5	50,5	24680	48	9,7	95						
M9	bg	5	b	5	0,5	50,5	26960	53	10,6	50,5	50,5	27350	54	10,7	97,5						
M9	bg	5	b	6	0,5	50,5	24620	48	9,7	50,5	50,5	27350	54	10,7	97,5						
M9	bg	5	b	1	0,5	50,5	22850	45	-	50,5	50,5	21850	43	-	100						
M9	bg	5	b	2	0,5	50,5	28700	56	11,3	50,5	50,5	24640	48	9,7	100						
M9	bg	5	b	3	0,5	50,5	32920	65	12,9	50,5	50,5	21090	41	8,3	87,5						
M9	bg	5	b	4	0,5	50,5	23000	45	9,0	50,5	50,5	24680	48	9,7	95						
M9	bg	5	b	5	0,5	50,5	26960	53	10,6	50,5	50,5	27350	54	10,7	97,5						
M9	bg	5	b	6	0,5	50,5	24620	48	9,7	50,5	50,5	27350	54	10,7	97,5						
M9	bg	5	b	1	0,5	50,5	22850	45	-	50,5	50,5	21850	43	-	100						
M9	bg	5	b	2	0,5	50,5	28700	56	11,3	50,5	50,5	24640	48	9,7	100						
M9	bg	5	b	3	0,5	50,5	32920	65	12,9	50,5	50,5	21090	41	8,3	87,5						
M9	bg	5	b	4	0,5	50,5	23000	45	9,0	50,5	50,5	24680	48	9,7	95						
M9	bg	5	b	5	0,5	50,5	26960	53	10,6	50,5	50,5	27350	54	10,7	97,5						
M9	bg	5	b	6	0,5	50,5	24620	48	9,7	50,5	50,5	27350	54	10,7	97,5						
M9	bg	5	b	1	0,5	50,5	22850	45	-	50,5	50,5	21850	43	-	100						
M9	bg	5	b	2	0,5	50,5	28700	56	11,3	50,5	50,5	24640	48	9,7	100						
M9	bg	5	b	3	0,5	50,5	32920	65	12,9	50,5	50,5	21090	41	8,3	87,5						
M9	bg	5	b	4	0,5	50,5	23000	45	9,0	50,5	50,5	24680	48	9,7	95						
M9	bg	5	b	5	0,5	50,5	26960	53	10,6	50,5	50,5	27350	54	10,7	97,5						
M9	bg	5	b	6	0,5	50,5	24620	48	9,7	50,5	50,5	27350	54	10,7	97,5						
M9	bg	5	b	1	0,5	50,5	22850	45	-	50,5	50,5	21850	43	-	100						
M9	bg	5	b	2	0,5	50,5	28700	56	11,3	50,5	50,5	24640	48	9,7	100						
M9	bg	5	b	3	0,5	50,5	32920	65	12,9	50,5	50,5	21090	41	8,3	87,5						
M9	bg	5	b	4	0,5	50,5	23000	45	9,0	50,5	50,5	24680	48	9,7	95						
M9	bg	5	b	5	0,5	50,5	26960	53	10,6	50,5	50,5	27350	54	10,7	97,5						
M9	bg	5	b	6	0,5	50,5	24620	48	9,7	50,5	50,5	27350	54	10,7	97,5						
M9	bg	5	b	1	0,5	50,5	22850	45	-	50,5	50,5	21850	43	-	100						
M9	bg	5	b	2	0,5	50,5	28700	56	11,3	50,5	50,5	24640	48	9,7	100						
M9	bg	5	b	3	0,5	50,5	32920	65	12,9	50,5	50,5	21090	41	8,3	87,5						
M9	bg	5	b	4	0,5	50,5	23000	45	9,0	50,5	50,5	24680	48	9,7	95						
M9	bg	5	b	5	0,5	50,5	26960	53	10,6	50,5	50,5	27350	54	10,7	97,5						
M9	bg	5	b	6	0,5	50,5	24620	48	9,7	50,5	50,5	27350	54	10,7	97,5						
M9	bg	5	b	1	0,5	50,5	22850	45	-	50,5	50,5	21850	43	-	100						
M9	bg	5	b	2	0,5	50,5	28700	56	11,3	50,5	50,5	24640	48	9,7	100						
M9	bg	5	b	3	0,5	50,5	32920	65	12,9	50,5	50,5	21090	41	8,3	87,5						
M9	bg	5	b	4	0,5	50,5	23000	45	9,0	50,5	50,5	24680	48	9,7	95						
M9	bg	5	b	5	0,5	50,5	26960	53	10,6	50,5	50,5	27350	54	10,7	97,5						
M9	bg	5	b	6	0,5	50,5	24620	48	9,7	50,5	50,5	27350	54	10,7	97,5						
M9	bg	5	b	1	0,5	50,5	22850	45	-	50,5	50,5	21850	43	-	100						
M9	bg	5	b	2	0,5	50,5	28700	56	11,3	50,5	50,5	24640	48	9,7	100						
M9	bg	5	b	3	0,5	50,5	32920	65	12,9	50,5	50,5	21090	41	8,3	87,5						
M9	bg	5	b	4	0,5	50,5	23000	45	9,0	50,5	50,5	24680	48	9,7	95						
M9	bg	5	b	5	0,5	50,5	26960	53	10,6	50,5	50,5	27350	54	10,7	97,5						
M9	bg	5	b	6	0,5	50,5	24620	48	9,7	50,5	50,5	27350	54	10,7	97,5						
M9	bg	5	b	1	0,5	50,5	22850	45	-	50,5	50,5	21850	43	-	100						
M9	bg	5	b	2	0,5	50,5	28700</														

Designação da viga: M10 – Madeira lamelada colada com cola MUF
Tempo de envelhecimento: 30 meses

Viga	Proвете			Velocidade aplicação carga (kN/s)	Madeira			Junta			Pesos												
	Tipo	Zona	Nº provete		Nº lamela ou junta	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _m (N)	Tempo (s)	F _m /A (N/mm ²)	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _j (N)	Tempo (s)	F _j /A (N/mm ²)	WFP (%)	Antes ensaio (g)	Após ensaio (g)	mV _m kg/m ³	Após secagem (g)	Teor de água ensaio (%)		
M10	bg	1	a	1	50,5	50,5	33750	67	13,2	50,5	50,5	29230	57	11,5	80								
M10	bg	1	a	2	50,5	50,5	28360	56	11,1	50,5	50,5	26760	53	10,5	100								
M10	bg	1	a	3	50,5	50,5	31660	62	12,4	50,5	50,5	29030	57	11,4	75								
M10	bg	1	a	4	50,5	50,5	37580	74	14,7	50,5	50,5	32780	65	12,9	80							12,8	
M10	bg	1	a	5	50,5	50,5	28990	57	11,4	50,5	50,5	23480	46	9,2	100								
M10	bg	1	a	6	50,5	50,5	27040	53	10,6														
M10	bg	2	a	1	50,5	50,5	28600	56	11,2	50,5	50,5	25130	49	9,9	90								
M10	bg	2	a	2	50,5	50,5	21560	42	8,5	50,5	50,5	27950	55	11,0	85								
M10	bg	2	a	3	50,5	50,5	32520	64	12,8	50,5	50,5	31800	63	12,5	70								
M10	bg	2	a	4	50,5	50,5	35740	70	14,0	50,5	50,5	29100	57	11,4	100								
M10	bg	2	a	5	50,5	50,5	29320	58	11,5	50,5	50,5	15790	-	-	95								
M10	bg	2	a	6	50,5	50,5	22270	44	8,7														
M10	bg	3	a	1	50,5	50,5	28660	56	11,2	50,5	50,5	24760	49	9,7	100								
M10	bg	3	a	2	50,5	50,5	23310	46	9,1	50,5	50,5	17880	35	7,0	95								
M10	bg	3	a	3	50,5	50,5	34390	68	13,5	50,5	50,5	27770	55	10,9	70								
M10	bg	3	a	4	50,5	50,5	35300	70	13,8	50,5	50,5	28190	55	11,1	75								
M10	bg	3	a	5	50,5	50,5	32090	63	12,6	50,5	50,5	22400	44	8,8	80								
M10	bg	3	a	6	50,5	50,5	20820	41	-														
M10	bg	4	a	1	50,5	50,5	26860	53	10,5	50,5	50,5	27660	54	10,8	85								
M10	bg	4	a	2	50,5	50,5	25450	50	10,0	50,5	50,5	14860	29	5,8	70								
M10	bg	4	a	3	50,5	50,5	25160	49	9,9	50,5	50,5	22760	45	8,9	85								
M10	bg	4	a	4	50,5	50,5	38800	77	15,2	50,5	50,5	31710	62	12,4	95								
M10	bg	4	a	5	50,5	50,5	24600	48	9,6	50,5	50,5	22910	45	9,0	95								
M10	bg	4	a	6	50,5	50,5	31680	62	12,4														
M10	bg	5	a	1	50,5	50,5	32850	65	12,9	50,5	50,5	26230	51	10,3	85								
M10	bg	5	a	2	50,5	50,5	23200	45	9,1	50,5	50,5	25180	49	9,9	95								
M10	bg	5	a	3	50,5	50,5	26400	52	10,4	50,5	50,5	25140	49	9,9	60								
M10	bg	5	a	4	50,5	50,5	32820	65	12,9	50,5	50,5	29480	58	11,6	90								
M10	bg	5	a	5	50,5	50,5	25870	51	10,1	50,5	50,5	19720	38	7,7	100								
M10	bg	5	a	6	50,5	50,5	23090	45	9,1														
M10	bg	5	a	6	50,5	50,5	23090	45	9,1														

Viga	Provete			Velocidade aplicação carga (kN/s)	Madeira					Junta					Pesos						
	Tipo	Zona	Nº provete		Nº lamela ou junta	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _m (N)	Tempo (s)	F _m /A (N/mm ²)	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _j (N)	Tempo (s)	F _j /A (N/mm ²)	WFP (%)	Antes ensaio (g)	Após ensaio (g)	mV _m kg/m ³	Após secagem (g)	Teor de água ensaio (%)
M10	bg	1	b	1	50,5	50,5	33520	66	13,1	50,5	50,5	26660	52	10,5	97,5						
M10	bg	1	b	2	50,5	50,5	31550	62	12,4	50,5	50,5	22600	44	8,9	100						
M10	bg	1	b	3	50,5	50,5	26920	53	10,6	50,5	50,5	28890	57	11,3	97,5		295,45	295,32	483	262,47	12,5
M10	bg	1	b	4	50,5	50,5	34860	69	13,7	50,5	50,5	29970	59	11,8	85						
M10	bg	1	b	5	50,5	50,5	29900	59	11,7	50,5	50,5	16660	32	-	95						
M10	bg	1	b	6	50,5	50,5	27350	54	10,7	50,5	50,5										
M10	bg	2	b	1	50,5	50,5	30340	60	11,9	50,5	50,5	23270	46	9,1	100						
M10	bg	2	b	2	50,5	50,5	26440	52	10,4	50,5	50,5	20940	41	8,2	90						
M10	bg	2	b	3	50,5	50,5	27650	54	10,8	50,5	50,5	28830	57	11,3	100						
M10	bg	2	b	4	50,5	50,5	29890	59	11,7	50,5	50,5	25880	51	10,1	98,5		293,40	293,26	479	260,18	12,7
M10	bg	2	b	5	50,5	50,5	26370	52	10,3	50,5	50,5	16000	31	6,3	97,5						
M10	bg	2	b	6	50,5	50,5	24150	47	9,5	50,5	50,5										
M10	bg	3	b	1	50,5	50,5	27690	54	10,9	50,5	50,5	22670	44	8,9	100						
M10	bg	3	b	2	50,5	50,5	34000	67	13,3	50,5	50,5	29250	58	11,5	95						
M10	bg	3	b	3	50,5	50,5	29690	58	11,6	50,5	50,5	22840	45	9,0	100						
M10	bg	3	b	4	50,5	50,5	30870	61	12,1	50,5	50,5	24550	48	9,6	92,5		282,88	282,77	462	250,81	12,7
M10	bg	3	b	5	50,5	50,5	26450	52	10,4	50,5	50,5	15950	31	6,3	100						
M10	bg	3	b	6	50,5	50,5	23780	47	9,3	50,5	50,5										
M10	bg	4	b	1	50,5	50,5	26890	53	10,5	50,5	50,5	26100	51	10,2	92,5						
M10	bg	4	b	2	50,5	50,5	31990	63	12,5	50,5	50,5	25540	50	10,0	97,5						
M10	bg	4	b	3	50,5	50,5	25990	51	10,2	50,5	50,5	28600	56	11,2	100						
M10	bg	4	b	4	50,5	50,5	34470	68	13,5	50,5	50,5	25710	50	10,1	100		290,63	290,47	475	257,98	12,6
M10	bg	4	b	5	50,5	50,5	25300	50	9,9	50,5	50,5	21600	42	8,5	100						
M10	bg	4	b	6	50,5	50,5	24520	48	9,6	50,5	50,5										
M10	bg	5	b	1	50,5	50,5	30870	61	12,1	50,5	50,5	22900	45	9,0	92,5						
M10	bg	5	b	2	50,5	50,5	27580	54	10,8	50,5	50,5	20140	39	7,9	98,5						
M10	bg	5	b	3	50,5	50,5	25110	49	9,8	50,5	50,5	28600	56	11,2	100						
M10	bg	5	b	4	50,5	50,5	32980	65	12,9	50,5	50,5	24750	49	9,7	92,5		289,37	289,25	473	256,96	12,6
M10	bg	5	b	5	50,5	50,5	24290	48	9,5	50,5	50,5	14420	28	5,7	100						
M10	bg	5	b	6	50,5	50,5	17900	35	-	50,5	50,5										

Designação da viga: M4_ini – Madeira lamelada colada com cola MUF
Tempo de envelhecimento: Sem envelhecimento

Viga	Proвете			Velocidade aplicação carga (kN/s)	Madeira			Junta				Pesos				Teor de água ensaio (%)				
	Tipo	Zona	Nº provete		Nº lamela ou junta	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _m (N)	Tempo (s)	F _m /A (N/mm ²)	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _j (N)	Tempo (s)	F _j /A (N/mm ²)		WFP (%)	Antes ensaio (g)	Após ensaio (g)	mv _{m3} kg/m ³
M4	bg_ini	e	1	1	50	50	29130	57	11,7	50	50	22190	43	8,9	95					
M4	bg_ini	e	1	2	50	50	27890	55	11,2	50	50	18250	36	7,3	92,5					
M4	bg_ini	e	1	3	50	50	32810	65	13,1	50	50	34330	68	13,7	92,5					
M4	bg_ini	e	1	4	50	50	34020	67	13,6	50	50	26440	52	10,6	100					
M4	bg_ini	e	1	5	50	50	34910	69	14,0	50	50	14920	29	6,0	98					
M4	bg_ini	e	1	6	50	50	30820	61	12,3											
M4	bg_ini	e	2	1	50	50	36150	71	14,5	50	50	24040	47	9,6	60					
M4	bg_ini	e	2	2	50	50	29400	58	11,8	50	50	18660	36	7,5	60					
M4	bg_ini	e	2	3	50	50	33530	66	13,4	50	50	20410	40	8,2	85					
M4	bg_ini	e	2	4	50	50	36620	72	14,6	50	50	27010	53	10,8	80					
M4	bg_ini	e	2	5	50	50	30500	60	12,2	50	50	28800	57	11,5	75					
M4	bg_ini	e	2	6	50	50	22450	44	9,0											
M4	bg_ini	d	1	1	50,5	49,5	21530	42	8,6	50,5	50,5	22690	44	9,1	95					
M4	bg_ini	d	1	2	50,5	49,5	33400	66	13,4	50,5	50,5	23810	47	9,5	92,5					
M4	bg_ini	d	1	3	50,5	49,5	33100	65	13,2	50,5	50,5	25430	50	10,2	99					
M4	bg_ini	d	1	4	50,5	49,5	32300	64	12,9	50,5	50,5	29450	58	11,8	87,5					
M4	bg_ini	d	1	5	50,5	49,5	30730	60	12,3	50,5	50,5	33150	65	13,3	100					
M4	bg_ini	d	1	6	50,5	49,5	39570	78	15,8											
M4	bg_ini	d	2	1	50	50	28640	56	11,5	50	50	20330	40	8,1	65					
M4	bg_ini	d	2	2	50	50	32820	65	13,1	50	50	31890	63	12,8	80					
M4	bg_ini	d	2	3	50	50	34310	68	13,7	50	50	26940	53	10,8	92,5					
M4	bg_ini	d	2	4	50	50	23310	46	9,3	50	50	26590	52	10,6	100					
M4	bg_ini	d	2	5	50	50	30420	60	12,2	50	50	30460	60	12,2	85					
M4	bg_ini	d	2	6	50	50	31400	62	12,6											
M4	bg_ini	d	2	1	50	50	28640	56	11,5	50	50	20330	40	8,1	65					
M4	bg_ini	d	2	2	50	50	32820	65	13,1	50	50	31890	63	12,8	80					
M4	bg_ini	d	2	3	50	50	34310	68	13,7	50	50	26940	53	10,8	92,5					
M4	bg_ini	d	2	4	50	50	23310	46	9,3	50	50	26590	52	10,6	100					
M4	bg_ini	d	2	5	50	50	30420	60	12,2	50	50	30460	60	12,2	85					
M4	bg_ini	d	2	6	50	50	31400	62	12,6											
M4	bg_ini	d	2	1	50	50	28640	56	11,5	50	50	20330	40	8,1	65					
M4	bg_ini	d	2	2	50	50	32820	65	13,1	50	50	31890	63	12,8	80					
M4	bg_ini	d	2	3	50	50	34310	68	13,7	50	50	26940	53	10,8	92,5					
M4	bg_ini	d	2	4	50	50	23310	46	9,3	50	50	26590	52	10,6	100					
M4	bg_ini	d	2	5	50	50	30420	60	12,2	50	50	30460	60	12,2	85					
M4	bg_ini	d	2	6	50	50	31400	62	12,6											
M4	bg_ini	d	2	1	50	50	28640	56	11,5	50	50	20330	40	8,1	65					
M4	bg_ini	d	2	2	50	50	32820	65	13,1	50	50	31890	63	12,8	80					
M4	bg_ini	d	2	3	50	50	34310	68	13,7	50	50	26940	53	10,8	92,5					
M4	bg_ini	d	2	4	50	50	23310	46	9,3	50	50	26590	52	10,6	100					
M4	bg_ini	d	2	5	50	50	30420	60	12,2	50	50	30460	60	12,2	85					
M4	bg_ini	d	2	6	50	50	31400	62	12,6											
M4	bg_ini	d	2	1	50	50	28640	56	11,5	50	50	20330	40	8,1	65					
M4	bg_ini	d	2	2	50	50	32820	65	13,1	50	50	31890	63	12,8	80					
M4	bg_ini	d	2	3	50	50	34310	68	13,7	50	50	26940	53	10,8	92,5					
M4	bg_ini	d	2	4	50	50	23310	46	9,3	50	50	26590	52	10,6	100					
M4	bg_ini	d	2	5	50	50	30420	60	12,2	50	50	30460	60	12,2	85					
M4	bg_ini	d	2	6	50	50	31400	62	12,6											
M4	bg_ini	d	2	1	50	50	28640	56	11,5	50	50	20330	40	8,1	65					
M4	bg_ini	d	2	2	50	50	32820	65	13,1	50	50	31890	63	12,8	80					
M4	bg_ini	d	2	3	50	50	34310	68	13,7	50	50	26940	53	10,8	92,5					
M4	bg_ini	d	2	4	50	50	23310	46	9,3	50	50	26590	52	10,6	100					
M4	bg_ini	d	2	5	50	50	30420	60	12,2	50	50	30460	60	12,2	85					
M4	bg_ini	d	2	6	50	50	31400	62	12,6											
M4	bg_ini	d	2	1	50	50	28640	56	11,5	50	50	20330	40	8,1	65					
M4	bg_ini	d	2	2	50	50	32820	65	13,1	50	50	31890	63	12,8	80					
M4	bg_ini	d	2	3	50	50	34310	68	13,7	50	50	26940	53	10,8	92,5					
M4	bg_ini	d	2	4	50	50	23310	46	9,3	50	50	26590	52	10,6	100					
M4	bg_ini	d	2	5	50	50	30420	60	12,2	50	50	30460	60	12,2	85					
M4	bg_ini	d	2	6	50	50	31400	62	12,6											
M4	bg_ini	d	2	1	50	50	28640	56	11,5	50	50	20330	40	8,1	65					
M4	bg_ini	d	2	2	50	50	32820	65	13,1	50	50	31890	63	12,8	80					
M4	bg_ini	d	2	3	50	50	34310	68	13,7	50	50	26940	53	10,8	92,5					
M4	bg_ini	d	2	4	50	50	23310	46	9,3	50	50	26590	52	10,6	100					
M4	bg_ini	d	2	5	50	50	30420	60	12,2	50	50	30460	60	12,2	85					
M4	bg_ini	d	2	6	50	50	31400	62	12,6											
M4	bg_ini	d	2	1	50	50	28640	56	11,5	50	50	20330	40	8,1	65					
M4	bg_ini	d	2	2	50	50	32820	65	13,1	50	50	31890	63	12,8	80					
M4	bg_ini	d	2	3	50	50	34310	68	13,7	50	50	26940	53	10,8	92,5					
M4	bg_ini	d	2	4	50	50	23310	46	9,3	50	50	26590	52	10,6	100					
M4	bg_ini	d	2	5	50	50	30420	60	12,2	50	50	30460	60	12,2	85					
M4	bg_ini	d	2	6	50	50	31400	62	12,6											
M4	bg_ini	d	2	1	50	50	28640	56	11,5	50	50	20330	40	8,1	65					
M4	bg_ini	d	2	2	50	50	32820	65	13,1	50	50	31890	63	12,8	80					
M4	bg_ini	d	2	3	50	50	34310	68	13,7	50	50	26940	53	10,8	92,5					
M4	bg_ini	d	2	4	50	50	23310	46	9,3	50	50	26590	52	10,6	100					
M4	bg_ini	d	2	5	50	50	30420	60	12,2	50	50	30460	60	12,2	85					
M4	bg_ini	d	2	6	50	50	31400	62	12,6											
M4	bg_ini	d	2	1	50	50	28640	56	11,5	50	50	20330	40	8,1	65					
M4	bg_ini	d	2	2	50	50	32820	65	13,1	50	50	31890	63	12,8	80					
M4	bg_ini	d	2	3	50	50	34310	68	13,7	50	50	26940	53	10,8	92,5					
M4	bg_ini	d	2	4	50	50	23310	46	9,3	50	50	26590	52	10,6	100					
M4	bg_ini	d	2	5	50	50	30420	60	12,2	50	50	30460	60	12,2	85					
M4	bg_ini	d	2	6	50	50	31400	62	12,6											
M4	bg_ini	d	2	1	50	50	28640	56	11,5	50	50	20330	40	8,1	65					
M4	bg_ini	d	2	2	50	50	32820	65	13,1	50	50	31890	63	12,8	80					

Designação da viga: M6_ini – Madeira lamelada colada com cola MUF
Tempo de envelhecimento: Sem envelhecimento

Viga	Provete			Velocidade aplicação carga (kN/s)	Madeira			Junta				Pesos				Teor de água ensaio (%)				
	Tipo	Zona	Nº provete		Nº lamela ou junta	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _m (N)	Tempo (s)	F _m /A (N/mm ²)	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _j (N)	Tempo (s)	F _j /A (N/mm ²)		WFP (%)	Antes ensaio (g)	Após ensaio (g)	mv _m kg/m ³
M6	bg_ini	e	1	1	50	50	27830	55	11,1	50	50	22720	44	9,1	98					
M6	bg_ini	e	1	2	50	50	27730	54	11,1	50	50	29200	57	11,7	92,5					
M6	bg_ini	e	1	3	50	50	22380	44	9,0	50	50	30920	61	12,4	80					
M6	bg_ini	e	1	4	50	50	33770	67	13,5	50	50	26530	52	10,6	97,5					
M6	bg_ini	e	1	5	50	50	29310	58	11,7	50	50	26120	51	10,4	97,5					
M6	bg_ini	e	1	6	50	50	27320	54	10,9											
M6	bg_ini	e	2	1	50,5	50	31000	61	12,3	50,5	50	27390	54	10,8	85					
M6	bg_ini	e	2	2	50,5	50	30610	60	12,1	50,5	50	23360	46	9,3	95					
M6	bg_ini	e	2	3	50,5	50	30770	61	12,2	50,5	50	29320	58	11,6	80					
M6	bg_ini	e	2	4	50,5	50	29720	58	11,8	50,5	50	21730	42	8,6	100					
M6	bg_ini	e	2	5	50,5	50	27370	54	10,8	50,5	50	25140	49	10,0	100					
M6	bg_ini	e	2	6	50,5	50	33980	67	13,5											
M6	bg_ini	d	1	1	50	50	30640	60	12,3	50	50	28510	56	11,4	100					
M6	bg_ini	d	1	2	50	50	32900	65	13,2	50	50	26140	51	10,5	100					
M6	bg_ini	d	1	3	50	50	26490	52	10,6	50	50	27720	54	11,1	98					
M6	bg_ini	d	1	4	50	50	33330	66	13,3	50	50	32520	64	13,0	100					
M6	bg_ini	d	1	5	50	50	31510	62	12,6	50	50	21890	43	8,8	100					
M6	bg_ini	d	1	6	50	50	24340	48	9,7											
M6	bg_ini	d	2	1	50	50	30670	60	12,3	50	50	27940	55	11,2	100					
M6	bg_ini	d	2	2	50	50	27830	55	11,1	50	50	25220	49	10,1	95					
M6	bg_ini	d	2	3	50	50	24280	48	9,7	50	50	23990	47	9,6	97,5					
M6	bg_ini	d	2	4	50	50	30770	61	12,3	50	50	24560	48	9,8	87,5					
M6	bg_ini	d	2	5	50	50	30910	61	12,4	50	50	26060	51	10,4	97,5					
M6	bg_ini	d	2	6	50	50	27250	54	10,9											
M6	bg_ini	d	2	1	50	50	30670	60	12,3	50	50	27940	55	11,2	100					
M6	bg_ini	d	2	2	50	50	27830	55	11,1	50	50	25220	49	10,1	95					
M6	bg_ini	d	2	3	50	50	24280	48	9,7	50	50	23990	47	9,6	97,5					
M6	bg_ini	d	2	4	50	50	30770	61	12,3	50	50	24560	48	9,8	87,5					
M6	bg_ini	d	2	5	50	50	30910	61	12,4	50	50	26060	51	10,4	97,5					
M6	bg_ini	d	2	6	50	50	27250	54	10,9											
M6	bg_ini	d	2	1	50	50	30670	60	12,3	50	50	27940	55	11,2	100					
M6	bg_ini	d	2	2	50	50	27830	55	11,1	50	50	25220	49	10,1	95					
M6	bg_ini	d	2	3	50	50	24280	48	9,7	50	50	23990	47	9,6	97,5					
M6	bg_ini	d	2	4	50	50	30770	61	12,3	50	50	24560	48	9,8	87,5					
M6	bg_ini	d	2	5	50	50	30910	61	12,4	50	50	26060	51	10,4	97,5					
M6	bg_ini	d	2	6	50	50	27250	54	10,9											
M6	bg_ini	d	2	1	50	50	30670	60	12,3	50	50	27940	55	11,2	100					
M6	bg_ini	d	2	2	50	50	27830	55	11,1	50	50	25220	49	10,1	95					
M6	bg_ini	d	2	3	50	50	24280	48	9,7	50	50	23990	47	9,6	97,5					
M6	bg_ini	d	2	4	50	50	30770	61	12,3	50	50	24560	48	9,8	87,5					
M6	bg_ini	d	2	5	50	50	30910	61	12,4	50	50	26060	51	10,4	97,5					
M6	bg_ini	d	2	6	50	50	27250	54	10,9											

**Designação da viga: M8_ini – Madeira lamelada colada com cola MUF
Tempo de envelhecimento: Sem envelhecimento**

Viga	Provette			Velocidade aplicação carga (kN/s)	Madeira			Junta			Pesos													
	Tipo	Zona	Nº provete		Nº lamela ou junta	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _m (N)	Tempo (s)	F _m /A (N/mm ²)	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _j (N)	Tempo (s)	F _j /A (N/mm ²)	WFP (%)	Antes ensaio (g)	Após ensaio (g)	mV _{m3} kg/m ³	Após secagem (g)	Teor de água ensaio (%)			
M8	bg_ini	e	1	1	50	50	32110	63	12,8	50	50	23560	46	9,4	92,5									
M8	bg_ini	e	1	2	50	50	30070	59	12,0	50	50	24080	47	9,6	90									
M8	bg_ini	e	1	3	50	50	26770	53	10,7	50	50	25560	50	10,2	92,5									
M8	bg_ini	e	1	4	50	50	27680	54	11,1	50	50	24540	48	9,8	98						13,5			
M8	bg_ini	e	1	5	50	50	28130	55	11,3	50	50	27320	54	10,9	90									
M8	bg_ini	e	1	6	50	50	28850	57	11,5															
M8	bg_ini	e	2	1	50	50	28000	55	11,2	50	50	23610	46	9,4	100									
M8	bg_ini	e	2	2	50	50	22130	43	8,9	50	50	19130	37	7,7	98									
M8	bg_ini	e	2	3	50	50	27210	53	10,9	50	50	22420	44	9,0	90									
M8	bg_ini	e	2	4	50	50	26070	51	10,4	50	50	17320	34	6,9	75							13,6		
M8	bg_ini	e	2	5	50	50	27470	54	11,0	50	50	27990	55	11,2	90									
M8	bg_ini	e	2	6	50	50	28840	57	11,5															
M8	bg_ini	d	1	1	50	50	27420	54	11,0	50	50	22330	44	8,9	75									
M8	bg_ini	d	1	2	50	50	24110	47	9,6	50	50	27090	53	10,8	97,5									
M8	bg_ini	d	1	3	50	50	29090	57	11,6	50	50	27090	53	10,8	100									
M8	bg_ini	d	1	4	50	50	29020	57	11,6	50	50	23480	46	9,4	85								13,6	
M8	bg_ini	d	1	5	50	50	27880	55	11,2	50	50	21020	41	8,4	97,5									
M8	bg_ini	d	1	6	50	50	27260	54	10,9															
M8	bg_ini	d	2	1	50	50	25780	51	10,3	50	50	21690	42	8,7	98									
M8	bg_ini	d	2	2	50	50	23910	47	9,6	50	50	25050	49	10,0	92,5									
M8	bg_ini	d	2	3	50	50	28270	56	11,3	50	50	24520	48	9,8	100									
M8	bg_ini	d	2	4	50	50	27340	54	10,9	50	50	21870	43	8,7	90									13,5
M8	bg_ini	d	2	5	50	50	26600	52	10,6	50	50	19920	39	8,0	100									
M8	bg_ini	d	2	6	50	50	27450	54	11,0															

**Designação da viga: M9_ini – Madeira lamelada colada com cola MUF
Tempo de envelhecimento: Sem envelhecimento**

Viga	Proвете			Velocidade aplicação carga (kN/s)	Madeira			Junta			Pesos												
	Tipo	Zona	Nº provete		Nº lamela ou junta	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _m (N)	Tempo (s)	F _m /A (N/mm ²)	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _j (N)	Tempo (s)	F _j /A (N/mm ²)	WFP (%)	Antes ensaio (g)	Após ensaio (g)	mV _{m3} kg/m ³	Após secagem (g)	Teor de água ensaio (%)		
M9	bg_ini	e	1	1	50,5	50,5	21940	43	8,6	50,5	50,5	17770	35	7,0	82,5								
M9	bg_ini	e	1	2	50,5	50,5	35750	71	14,0	50,5	50,5	25600	50	10,0	80								
M9	bg_ini	e	1	3	50,5	50,5	36300	72	14,2	50,5	50,5	33210	65	13,0	100						13,8		
M9	bg_ini	e	1	4	50,5	50,5	32120	63	12,6	50,5	50,5	25180	49	9,9	97,5								
M9	bg_ini	e	1	5	50,5	50,5	30280	60	11,9	50,5	50,5	21280	42	8,3	100								
M9	bg_ini	e	1	6	50,5	50,5	29890	59	11,7	50,5	50,5												
M9	bg_ini	e	2	1	50,5	50,5	30020	59	11,8	50,5	50,5	-	-	-	100								
M9	bg_ini	e	2	2	50,5	50,5	-	-	-	50,5	50,5	29680	58	11,6	87,5								
M9	bg_ini	e	2	3	50,5	50,5	38390	76	15,1	50,5	50,5	27020	53	10,6	100							13,8	
M9	bg_ini	e	2	4	50,5	50,5	-	-	-	50,5	50,5	24340	48	9,5	77,5								
M9	bg_ini	e	2	5	50,5	50,5	25750	51	10,1	50,5	50,5	22030	43	8,6	95								
M9	bg_ini	e	2	6	50,5	50,5	27790	55	10,9	50,5	50,5												
M9	bg_ini	d	1	1	50,5	50,5	27820	55	10,9	50,5	50,5	25090	-	-	95								
M9	bg_ini	d	1	2	50,5	50,5	30050	59	11,8	50,5	50,5	25170	49	9,9	90								
M9	bg_ini	d	1	3	50,5	50,5	32450	64	12,7	50,5	50,5	22040	43	8,6	95								
M9	bg_ini	d	1	4	50,5	50,5	-	-	-	50,5	50,5	24630	48	9,7	95								13,8
M9	bg_ini	d	1	5	50,5	50,5	28620	56	11,2	50,5	50,5	-	-	-	95								
M9	bg_ini	d	1	6	50,5	50,5	22460	44	8,8	50,5	50,5												
M9	bg_ini	d	2	1	50,5	50,5	27590	54	10,8	50,5	50,5	27250	54	10,7	100								
M9	bg_ini	d	2	2	50,5	50,5	29010	57	11,4	50,5	50,5	28940	57	11,3	100								
M9	bg_ini	d	2	3	50,5	50,5	32250	64	12,6	50,5	50,5	26730	52	10,5	75								
M9	bg_ini	d	2	4	50,5	50,5	27320	54	10,7	50,5	50,5	-	-	-	100								13,6
M9	bg_ini	d	2	5	50,5	50,5	34440	68	13,5	50,5	50,5	29950	59	11,7	87,5								
M9	bg_ini	d	2	6	50,5	50,5	26740	52	10,5	50,5	50,5												

**Designação da viga: P5.1 – Madeira lamelada colada com cola PRF
Tempo de envelhecimento: 12 meses**

Viga	Proвете			Velocidade aplicação carga (kN/s)	Madeira			Junta				Pesos								
	Tipo	Zona	Nº provete		Nº lamela ou junta	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _m (N)	Tempo (s)	F _m /A (N/mm ²)	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _j (N)	Tempo (s)	F _j /A (N/mm ²)	WFP (%)	Antes ensaio (g)	Após ensaio (g)	mV _m kg/m ³	Após secagem (g)
P5.1	bg	1	a	1	50,5	50	18170	35	7,2	50,5	50	21740	42	8,6	100	123,64	123,62	386	110,23	12,1
P5.1	bg	1	a	2	50,5	50	19390	38	7,7	50,5	50	22300	44	8,8	75	123,64	123,62	386	110,23	12,1
P5.1	bg	1	a	3	50,5	50	25970	51	10,3	50,5	50	22300	44	8,8	75	123,64	123,62	386	110,23	12,1
P5.1	bg	2	a	1	50,5	50,5	20110	39	7,9	50,5	50,5	20550	40	8,1	95	126,66	126,66	391	112,97	12,1
P5.1	bg	2	a	2	50,5	50,5	20560	40	8,1	50,5	50,5	22590	44	8,9	87,5	126,66	126,66	391	112,97	12,1
P5.1	bg	2	a	3	50,5	50,5	28140	55	11,0	50,5	50,5	22590	44	8,9	87,5	126,66	126,66	391	112,97	12,1
P5.1	bg	3	a	1	50,5	50,5	21060	41	8,3	50,5	50,5	23900	47	9,4	75	130,74	130,71	404	116,77	11,9
P5.1	bg	3	a	2	50,5	50,5	14340	28	-	50,5	50,5	25510	50	10,0	85	130,74	130,71	404	116,77	11,9
P5.1	bg	3	a	3	50,5	50,5	30090	59	11,8	50,5	50,5	25510	50	10,0	85	130,74	130,71	404	116,77	11,9
P5.1	bg	4	a	1	50,5	50,5	21900	43	8,6	50,5	50,5	22890	45	9,0	55	126,25	126,19	390	112,65	12,0
P5.1	bg	4	a	2	50,5	50,5	24640	48	9,7	50,5	50,5	26360	52	10,3	100	126,25	126,19	390	112,65	12,0
P5.1	bg	4	a	3	50,5	50,5	23630	46	9,3	50,5	50,5	26360	52	10,3	100	126,25	126,19	390	112,65	12,0
P5.1	bg	5	a	1	50,5	50	18080	35	7,2	50,5	50	21260	42	8,4	95	125,36	125,32	391	111,81	12,1
P5.1	bg	5	a	2	50,5	50	23730	46	9,4	50,5	50	24470	48	9,7	100	125,36	125,32	391	111,81	12,1
P5.1	bg	5	a	3	50,5	50	26500	52	10,5	50,5	50	24470	48	9,7	100	125,36	125,32	391	111,81	12,1
P5.1	bg	6	a	1	50,5	50,5	17600	34	6,9	50,5	50,5	19260	38	7,6	90	142,28	142,25	439	127,06	12,0
P5.1	bg	6	a	2	50,5	50,5	32630	64	12,8	50,5	50,5	29890	59	11,7	100	142,28	142,25	439	127,06	12,0
P5.1	bg	6	a	3	50,5	50,5	29540	58	11,6	50,5	50,5	29890	59	11,7	100	142,28	142,25	439	127,06	12,0
P5.1	bg	7	a	1	50,5	50,5	18330	36	7,2	50,5	50,5	24100	47	9,5	75	140,13	140,09	433	125,19	11,9
P5.1	bg	7	a	2	50,5	50,5	34110	67	13,4	50,5	50,5	27960	55	11,0	100	140,13	140,09	433	125,19	11,9
P5.1	bg	7	a	3	50,5	50,5	19180	37	-	50,5	50,5	27960	55	11,0	100	140,13	140,09	433	125,19	11,9

**Designação da viga: P2.3 – Madeira lamelada colada com cola PRF
Tempo de envelhecimento: 18 meses**

Viga	Proвете			Velocidade aplicação carga (kN/s)	Madeira			Junta			Pesos									
	Tipo	Zona	Nº provete		Nº lamela ou junta	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _m (N)	Tempo (s)	F _m /A (N/mm ²)	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _j (N)	Tempo (s)	F _j /A (N/mm ²)	WFP (%)	Antes ensaio (g)	Após ensaio (g)	mV _m kg/m ³	Após secagem (g)
P2.3	bg	1	a	1	50,5	50,5	28420	56	11,1	50,5	50,5	25430	50	10,0	80	144,44	144,44	446	128,33	12,6
P2.3	bg	1	a	2	50,5	50,5	25350	50	9,9	50,5	50,5	28650	56	11,2	100	144,44	144,44	446	128,33	12,6
P2.3	bg	1	a	3	50,5	50,5	15760	31	-	50,5	50,5	28650	56	11,2	100	144,44	144,44	446	128,33	12,6
P2.3	bg	2	a	1	50,5	50,5	28710	56	11,3	50,5	50,5	27290	54	10,7	97,5	147,26	147,26	455	131,12	12,3
P2.3	bg	2	a	2	50,5	50,5	20190	39	7,9	50,5	50,5	28460	56	11,2	82,5	147,26	147,26	455	131,12	12,3
P2.3	bg	2	a	3	50,5	50,5	27860	55	10,9	50,5	50,5	28460	56	11,2	82,5	147,26	147,26	455	131,12	12,3
P2.3	bg	3	a	1	50,5	50,5	29900	59	11,7	50,5	50,5	27360	54	10,7	80	148,55	148,55	459	132,13	12,4
P2.3	bg	3	a	2	50,5	50,5	25480	50	10,0	50,5	50,5	30560	60	12,0	97,5	148,55	148,55	459	132,13	12,4
P2.3	bg	3	a	3	50,5	50,5	19070	37	-	50,5	50,5	30560	60	12,0	97,5	148,55	148,55	459	132,13	12,4
P2.3	bg	4	a	1	50,5	50,5	28930	57	11,3	50,5	50,5	29920	59	11,7	100	148,81	148,81	459	132,40	12,4
P2.3	bg	4	a	2	50,5	50,5	14890	29	-	50,5	50,5	28020	55	11,0	87,5	148,81	148,81	459	132,40	12,4
P2.3	bg	4	a	3	50,5	50,5	28750	57	11,3	50,5	50,5	28020	55	11,0	87,5	148,81	148,81	459	132,40	12,4
P2.3	bg	5	a	1	50,5	50,5	29300	58	11,5	50,5	50,5	25950	51	10,2	65	156,15	159,09	482	139,00	14,5
P2.3	bg	5	a	2	50,5	50,5	23740	46	-	50,5	50,5	30800	61	12,1	87,5	156,15	159,09	482	139,00	14,5
P2.3	bg	5	a	3	50,5	50,5	23760	47	9,3	50,5	50,5	30800	61	12,1	87,5	156,15	159,09	482	139,00	14,5
P2.3	bg	6	a	1	50,5	50,5	29720	58	11,7	50,5	50	25940	51	10,4	60	145,84	145,85	450	129,60	12,5
P2.3	bg	6	a	2	50,5	50,5	24510	48	9,6	50,5	50	28490	56	11,4	100	145,84	145,85	450	129,60	12,5
P2.3	bg	6	a	3	50,5	50,5	28150	55	11,0	50,5	50	28490	56	11,4	100	145,84	145,85	450	129,60	12,5
P2.3	bg	7	a	1	51	50	30710	60	12,0	51	50	26660	52	10,5	100	166,98	166,98	516	149,00	12,1
P2.3	bg	7	a	2	51	50	24050	47	9,4	51	50	27070	53	10,6	99	166,98	166,98	516	149,00	12,1
P2.3	bg	7	a	3	51	50	27130	53	10,6	51	50	27070	53	10,6	99	166,98	166,98	516	149,00	12,1

**Designação da viga: P4.3 – Madeira lamelada colada com cola PRF
Tempo de envelhecimento: 24 meses**

Viga	Proвете			Velocidade aplicação carga (kN/s)	Madeira				Junta				Pesos								
	Tipo	Zona	Nº provete		Nº lamela ou junta	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _m (N)	Tempo (s)	F _m /A (N/mm ²)	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _j (N)	Tempo (s)	F _j /A (N/mm ²)	WFP (%)	Antes ensaio (g)	Após ensaio (g)	mV _m kg/m ³	Após secagem (g)	Teor de água ensaio (%)
P4.3	bg	1	a	1	50,5	50,5	22890	45	9,0	50,5	50,5	22130	43	8,7	85	143,82	143,86	444	127,60	12,7	
P4.3	bg	1	a	2	50,5	50,5	22560	44	8,8	50,5	50,5	26070	51	10,2	100						
P4.3	bg	1	a	3	50,5	50,5	25320	50	9,9												
P4.3	bg	2	a	1	50,5	50,5	23540	46	9,2	50,5	50,5	19130	37	7,5	82,5	149,86	149,89	463	133,07	12,6	
P4.3	bg	2	a	2	50,5	50,5	28880	57	11,3	50,5	50,5	22640	44	8,9	90						
P4.3	bg	2	a	3	50,5	50,5	22700	44	8,9												
P4.3	bg	3	a	1	50,5	50,5	22460	44	8,8	50,5	50,5	19760	39	7,7	60	145,42	145,45	449	128,93	12,8	
P4.3	bg	3	a	2	50,5	50,5	25360	50	9,9	50,5	50,5	23110	45	9,1	90						
P4.3	bg	3	a	3	50,5	50,5	12570	24	-												
P4.3	bg	4	a	1	50,5	50,5	27910	55	10,9	50,5	50,5	26480	52	10,4	100	145,92	146,04	451	129,28	13,0	
P4.3	bg	4	a	2	50,5	50,5	24330	48	9,5	50,5	50,5	26870	53	10,5	75						
P4.3	bg	4	a	3	50,5	50,5	13340	26	-												
P4.3	bg	5	a	1	50,5	50,5	28480	56	11,2	50,5	50,5	23330	46	9,1	70	146,37	146,45	452	129,85	12,8	
P4.3	bg	5	a	2	50,5	50,5	27060	53	10,6	50,5	50,5	26300	52	10,3	100						
P4.3	bg	5	a	3	50,5	50,5	20960	41	8,2												
P4.3	bg	6	a	1	50,5	50,5	28220	55	11,1	50,5	50,5	26060	51	10,2	80	146,49	146,63	452	130,05	12,7	
P4.3	bg	6	a	2	50,5	50,5	27210	53	10,7	50,5	50,5	24120	47	9,5	100						
P4.3	bg	6	a	3	50,5	50,5	25540	50	10,0												
P4.3	bg	7	a	1	50,5	50,5	23740	46	9,3	50,5	50,5	27530	54	10,8	70	149,34	149,49	461	132,85	12,5	
P4.3	bg	7	a	2	50,5	50,5	27030	53	10,6	50,5	50,5	26530	52	10,4	80						
P4.3	bg	7	a	3	50,5	50,5	28650	56	11,2												

**Designação da viga: P6.1 – Madeira lamelada colada com cola PRF
Tempo de envelhecimento: 12 meses**

Proвете					Velocidade aplicação carga (kN/s)			Madeira				Junta				Pesos								
Viga	Tipo	Zona	Nº proveite	Nº lamela ou junta	Velocidade aplicação carga (kN/s)			Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _m (N)	Tempo (s)	F _m /A (N/mm ²)	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _j (N)	Tempo (s)	F _j /A (N/mm ²)	WFP (%)	Antes ensaio (g)	Após ensaio (g)	mV _m kg/m ³	Após secagem (g)	Teor de água ensaio (%)	
P6.1	bg	1	a	1	0,5			50	50,5	24700	48	9,8	50	50,5	27100	53	10,7	100						
P6.1	bg	1	a	2	0,5			50	50,5	27100	53	10,7	50	50,5	13600	26	5,4	87,5		253,16	253,18	446	224,88	12,6
P6.1	bg	1	a	3	0,5			50	50,5	20800	41	8,2	50	50,5	23400	46	9,3	97,5						
P6.1	bg	1	a	4	0,5			50	50,5	24970	49	9,9	50	50,5	28630	56	11,3	95						
P6.1	bg	1	a	5	0,5			50	50,5	27380	54	10,8												
P6.1	bg	2	a	1	0,5			50,5	50,5	25580	50	10,0	50,5	50,5	26760	53	10,5	90						
P6.1	bg	2	a	2	0,5			50,5	50,5	22000	43	8,6	50,5	50,5	19860	39	7,8	100						
P6.1	bg	2	a	3	0,5			50,5	50,5	22200	43	8,7	50,5	50,5	24660	48	9,7	95		259,12	259,12	452	230,86	12,2
P6.1	bg	2	a	4	0,5			50,5	50,5	33740	66	13,2	50,5	50,5	31340	62	12,3	100						
P6.1	bg	2	a	5	0,5			50,5	50,5	10250	20	4,0												
P6.1	bg	3	a	1	0,5			50,5	50,5	20200	39	7,9	50,5	50,5	26910	53	10,6	87,5						
P6.1	bg	3	a	2	0,5			50,5	50,5	25310	50	9,9	50,5	50,5	19140	37	7,5	100						
P6.1	bg	3	a	3	0,5			50,5	50,5	21760	43	8,5	50,5	50,5	20090	39	7,9	100		248,62	248,65	433	221,25	12,4
P6.1	bg	3	a	4	0,5			50,5	50,5	30420	60	11,9	50,5	50,5	21760	43	8,5	87,5						
P6.1	bg	3	a	5	0,5			50,5	50,5	27760	55	10,9												
P6.1	bg	4	a	1	0,5			50,5	50,5	25310	50	9,9	50,5	50,5	20530	40	8,1	100						
P6.1	bg	4	a	2	0,5			50,5	50,5	32800	65	12,9	50,5	50,5	21810	43	8,6	95						
P6.1	bg	4	a	3	0,5			50,5	50,5	21430	42	8,4	50,5	50,5	21070	41	8,3	85		256,35	256,39	447	228,29	12,3
P6.1	bg	4	a	4	0,5			50,5	50,5	26780	53	10,5	50,5	50,5	27700	54	10,9	90						
P6.1	bg	4	a	5	0,5			50,5	50,5	25830	51	10,1												
P6.1	bg	5	a	1	0,5			50,5	50,5	23640	46	9,3	50,5	50,5	19870	39	7,8	85						
P6.1	bg	5	a	2	0,5			50,5	50,5	32830	65	12,9	50,5	50,5	22390	44	8,8	90						
P6.1	bg	5	a	3	0,5			50,5	50,5	29550	58	11,6	50,5	50,5	18820	37	7,4	97,5		288,51	288,53	503	256,81	12,4
P6.1	bg	5	a	4	0,5			50,5	50,5	31880	63	12,5	50,5	50,5	29820	59	11,7	75						
P6.1	bg	5	a	5	0,5			50,5	50,5	18860	37	-												
P6.1	bg	6	a	1	0,5			50,5	50,5	22310	44	8,7	50,5	50,5	22220	43	8,7	70						
P6.1	bg	6	a	2	0,5			50,5	50,5	30390	60	11,9	50,5	50,5	19780	39	7,8	87,5						
P6.1	bg	6	a	3	0,5			50,5	50,5	34090	67	13,4	50,5	50,5	24820	49	9,7	87,5		273,86	273,89	477	242,80	12,8
P6.1	bg	6	a	4	0,5			50,5	50,5	29550	58	11,6	50,5	50,5	29710	58	11,6	92,5						
P6.1	bg	6	a	5	0,5			50,5	50,5	26570	52	10,4												

Viga	Tipo	Zona	Provetete		Velocidade aplicação carga (kN/s)	Madeira				Junta				Pesos							
			Nº provete	Nº lamela ou junta		Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _m (N)	Tempo (s)	F _m /A (N/mm ²)	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _j (N)	Tempo (s)	F _j /A (N/mm ²)	WFP (%)	Antes ensaio (g)	Após ensaio (g)	mV _m kg/m ³	Após secagem (g)	Teor de água ensaio (%)
P6.1	bg	7	a	1	0,5	50,5	21390	42	8,4	50,5	19980	39	7,8	90							
P6.1	bg	7	a	2	0,5	50,5	34360	68	13,5	50,5	25270	50	9,9	95							
P6.1	bg	7	a	3	0,5	50,5	31090	61	12,2	50,5	21820	43	8,6	97,5	278,23	278,22	485	246,82		12,7	
P6.1	bg	7	a	4	0,5	50,5	29020	57	11,4	50,5	31880	63	12,5	100							
P6.1	bg	7	a	5	0,5	50,5	25500	50	-												

**Designação da viga: P7.1 – Madeira lamelada colada com cola PRF
Tempo de envelhecimento: 24 meses**

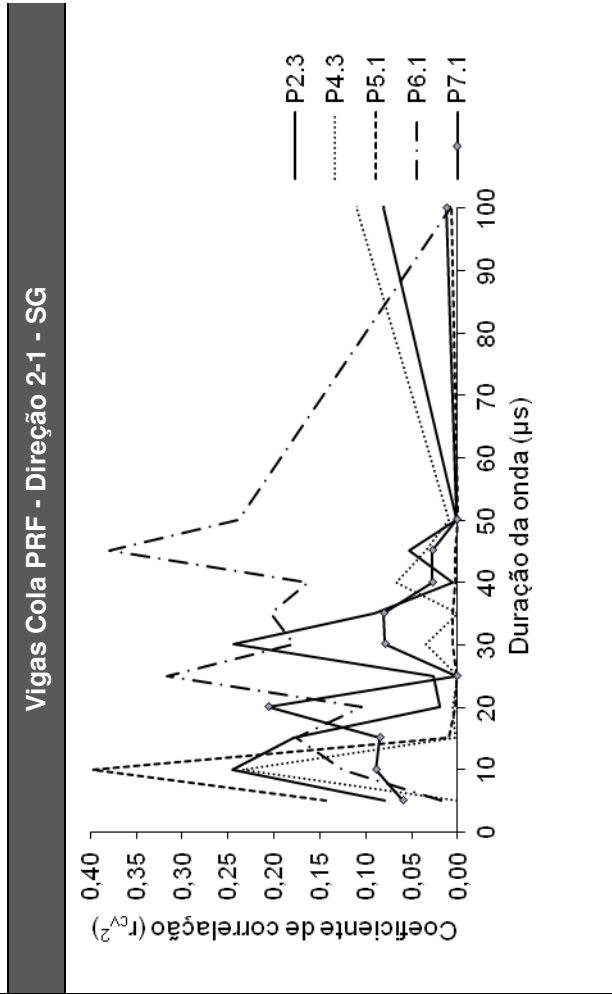
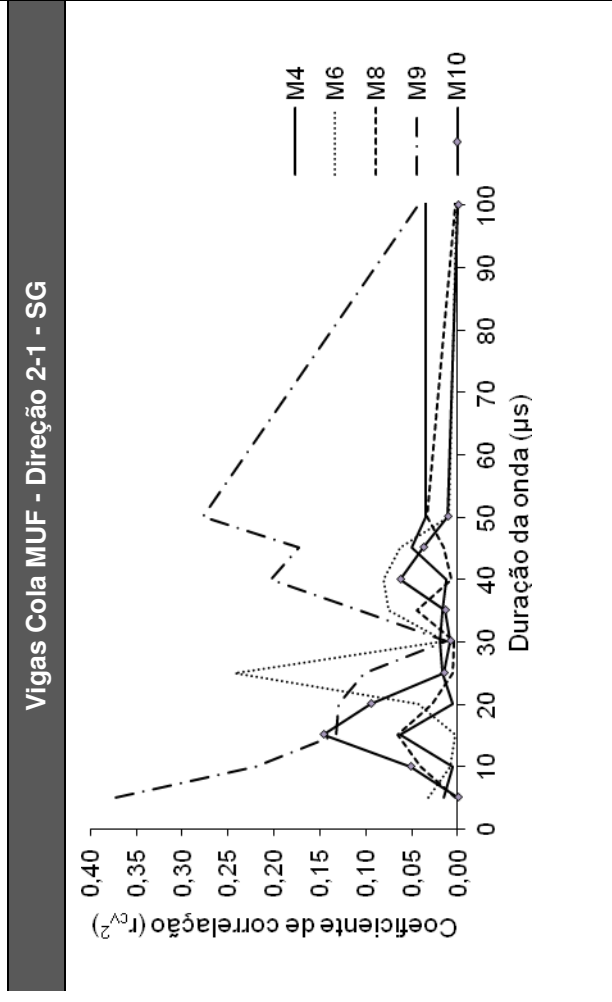
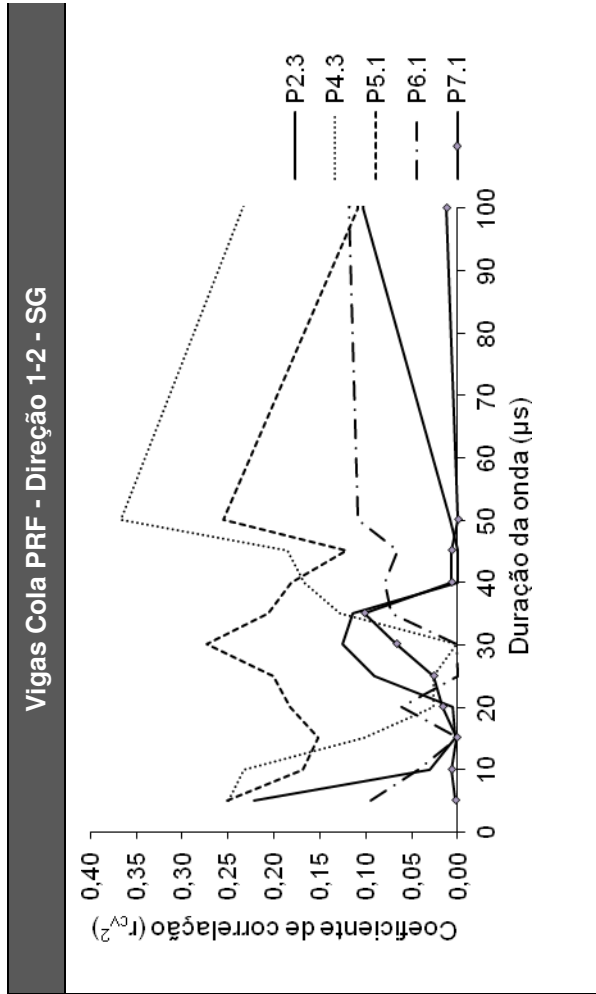
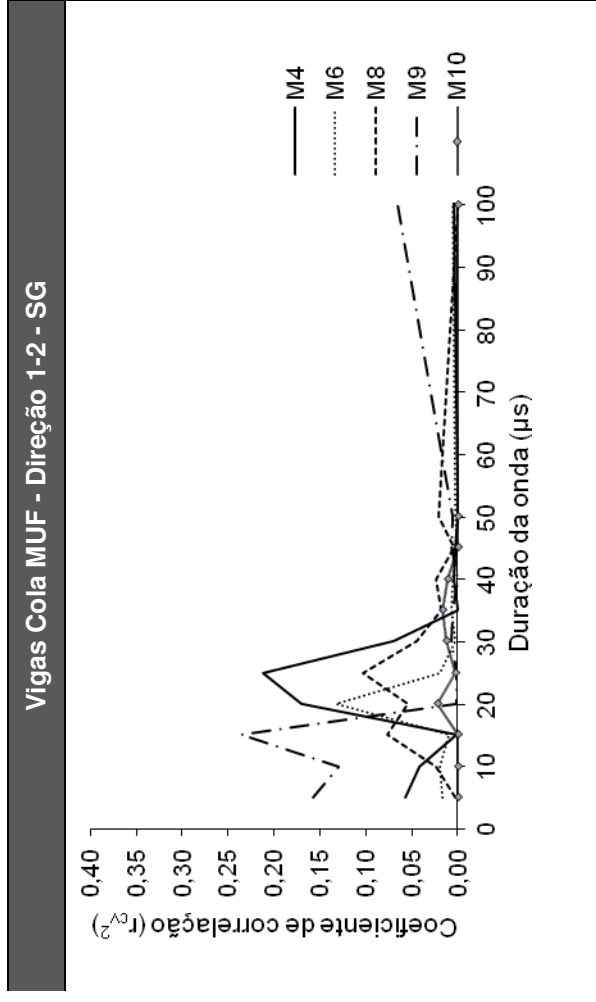
Viga	Proвете			Velocidade aplicação carga (kN/s)	Madeira			Junta				Pesos									
	Tipo	Zona	Nº provete		Nº lamela ou junta	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _m (N)	Tempo (s)	F _m /A (N/mm ²)	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _j (N)	Tempo (s)	F _j /A (N/mm ²)	WFP (%)	Antes ensaio (g)	Após ensaio (g)	m _v ,m ³ kg/m ³	Após secagem (g)	Teor de água ensaio (%)
P7.1	bg	1	a	1	50,5	50	28920	57	11,5	50,5	50	31690	62	12,6	85						
P7.1	bg	1	a	2	50,5	50	12720	24	5,0	50,5	50	24380	48	9,7	92,5		285,22	253,32	502	253,32	12,5
P7.2	bg	1	a	3	50,5	50	29410	58	11,6	50,5	50	30050	59	11,9	95						
P7.3	bg	1	a	4	50,5	50	33210	65	13,2	50,5	50	17780	35	7,0	100						
P7.4	bg	1	a	5	50,5	50	26580	52	10,5	50,5	50										
P7.1	bg	2	a	1	50,5	50	36400	72	14,4	50,5	50	27570	54	10,9	97,5						
P7.1	bg	2	a	2	50,5	50	24500	48	9,7	50,5	50	21850	43	8,7	92,5						
P7.2	bg	2	a	3	50,5	50	33460	66	13,3	50,5	50	21700	42	8,6	97,5		288,88	256,90	508	256,90	12,4
P7.3	bg	2	a	4	50,5	50	33190	65	13,1	50,5	50	21190	41	8,4	100						
P7.4	bg	2	a	5	50,5	50	26830	53	10,6	50,5	50										
P7.1	bg	3	a	1	50,5	50,5	33230	65	13,0	50,5	50,5	25340	50	9,9	80						
P7.1	bg	3	a	2	50,5	50,5	26950	53	10,6	50,5	50,5	23010	45	9,0	98						
P7.1	bg	3	a	3	50,5	50,5	30360	60	11,9	50,5	50,5	20830	41	8,2	85		292,38	259,99	510	259,99	12,4
P7.1	bg	3	a	4	50,5	50,5	31840	63	12,5	50,5	50,5	23800	47	9,3	97,5						
P7.1	bg	3	a	5	50,5	50,5	29080	57	11,4	50,5	50,5										
P7.1	bg	4	a	1	50,5	50	32590	64	12,9	50,5	50	28100	55	11,1	85						
P7.1	bg	4	a	2	50,5	50	24550	48	9,7	50,5	50	24460	48	9,7	97,5						
P7.1	bg	4	a	3	50,5	50	30940	61	12,3	50,5	50	23140	45	9,2	100		292,12	259,51	514	259,51	12,6
P7.1	bg	4	a	4	50,5	50	30750	61	12,2	50,5	50	21400	42	8,5	95						
P7.1	bg	4	a	5	50,5	50	27150	53	10,8	50,5	50										
P7.1	bg	5	a	1	50,5	50	37500	74	14,9	50,5	50	30030	59	11,9	80						
P7.1	bg	5	a	2	50,5	50	28490	56	11,3	50,5	50	27200	53	10,8	97,5						
P7.1	bg	5	a	3	50,5	50	31960	63	12,7	50,5	50	27800	55	11,0	90		296,27	263,55	521	263,55	12,4
P7.1	bg	5	a	4	50,5	50	31070	61	12,3	50,5	50	20750	41	8,2	98						
P7.1	bg	5	a	5	50,5	50	29190	57	11,6	50,5	50										
P7.1	bg	6	a	1	50,5	50	33800	67	13,4	50,5	50	29090	57	11,5	100						
P7.1	bg	6	a	2	50,5	50	24340	48	-	50,5	50	26220	51	10,4	85						
P7.1	bg	6	a	3	50,5	50	31060	61	12,3	50,5	50	22380	44	8,9	95		292,44	260,06	515	260,06	12,4
P7.1	bg	6	a	4	50,5	50	32100	63	12,7	50,5	50	20210	39	8,0	100						
P7.1	bg	6	a	5	50,5	50	29610	58	11,7	50,5	50										

Viga	Tipo	Zona	Provede		Velocidade aplicação carga (kN/s)	Madeira				Junta				Pesos							
			Nº provete	Nº lamela ou junta		Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _m (N)	Tempo (s)	F _m /A (N/mm ²)	Esp. (mm)	Larg. (mm)	F _j (N)	Tempo (s)	F _j /A (N/mm ²)	WFP (%)	Antes ensaio (g)	Após ensaio (g)	mV _m kg/m ³	Após secagem (g)	Teor de água ensaio (%)
P7.1	bg	7	a	1	0,5	50,5	50	37300	74	14,8	50,5	50	28920	57	11,5	75					
P7.1	bg	7	a	2	0,5	50,5	50	30530	60	12,1	50,5	50	15920	31	6,3	80					
P7.1	bg	7	a	3	0,5	50,5	50	30880	61	12,2	50,5	50	27480	54	10,9	85	301,98	301,93	532	269,13	12,2
P7.1	bg	7	a	4	0,5	50,5	50	26230	51	10,4	50,5	50	25110	49	9,9	98					
P7.1	bg	7	a	5	0,5	50,5	50	29210	57	11,6											

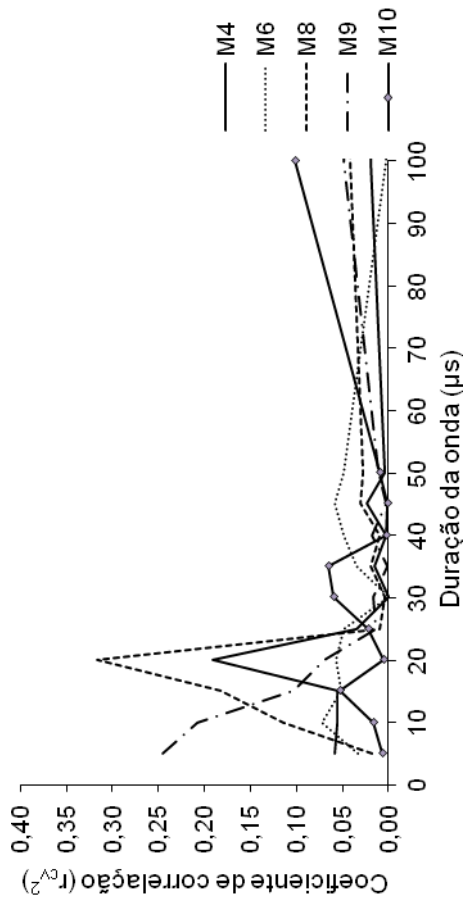
ANEXO II

Gráficos dos resultados da calibração

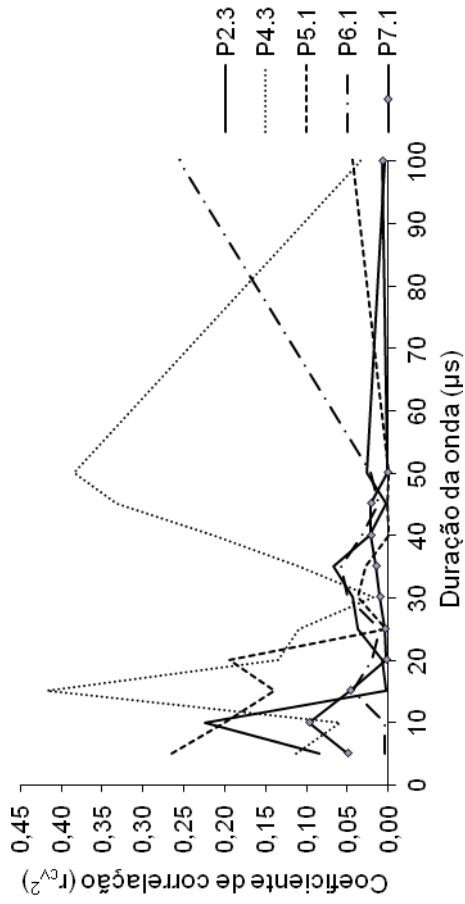
Calibração utilizando a onda no domínio do tempo
 SG – Resistência da junta colada



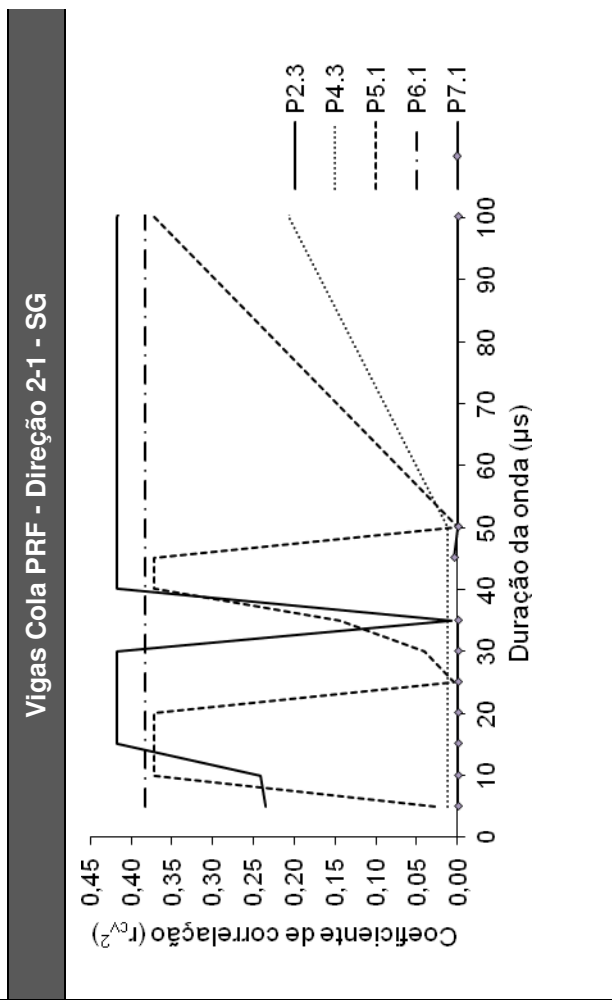
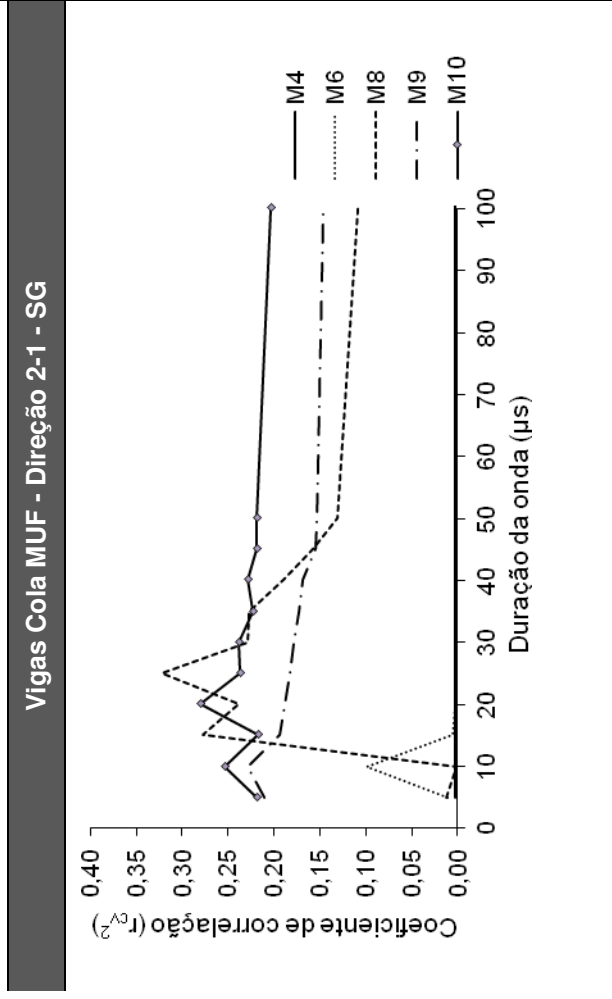
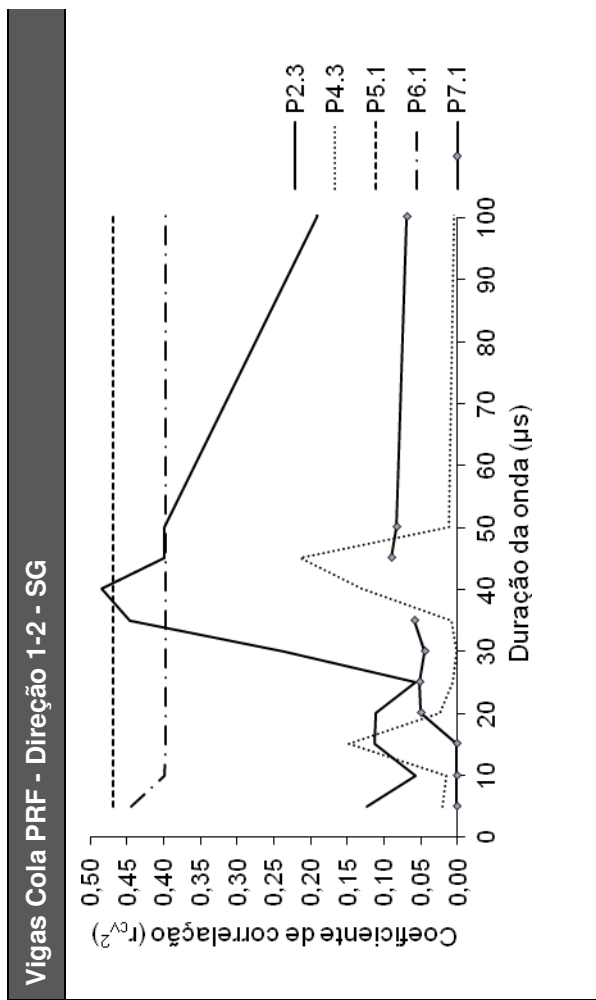
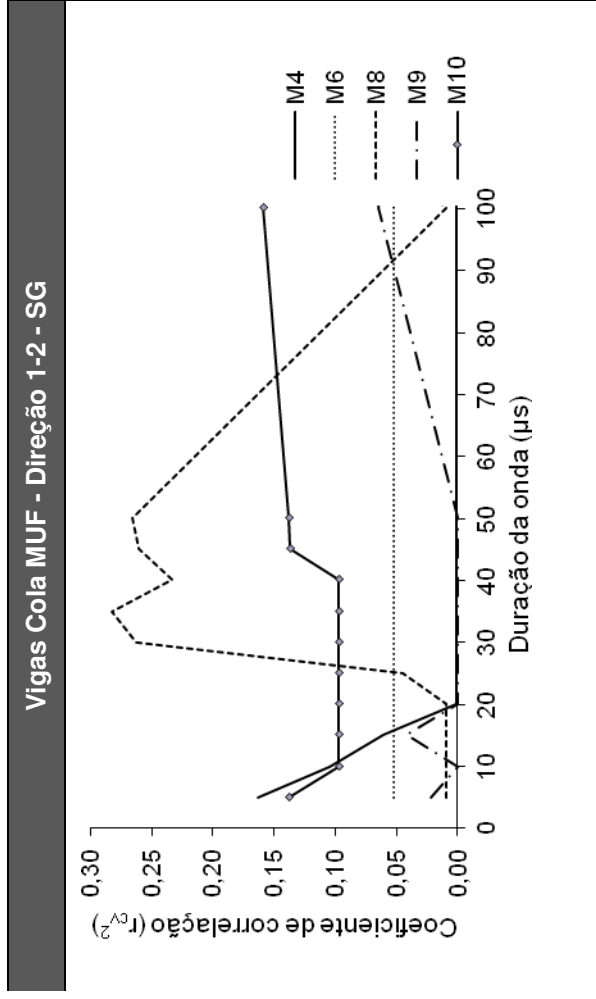
Vigas Cola MUF - Direção Média - SG



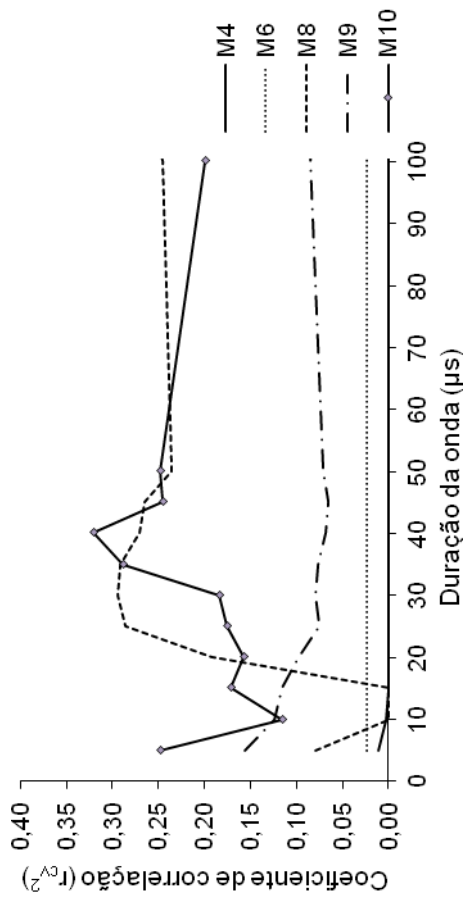
Vigas Cola PRF - Direção Média - SG



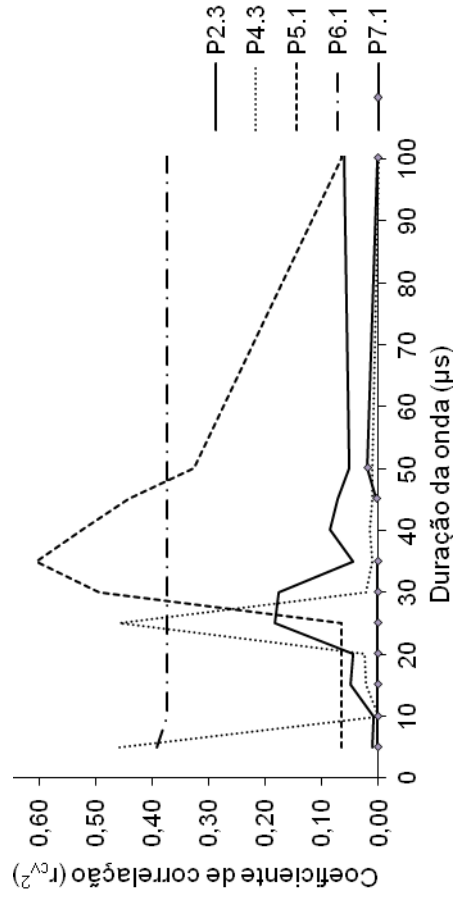
Calibração utilizando a velocidade e a onda no domínio do tempo
 SG – Resistência da junta colada



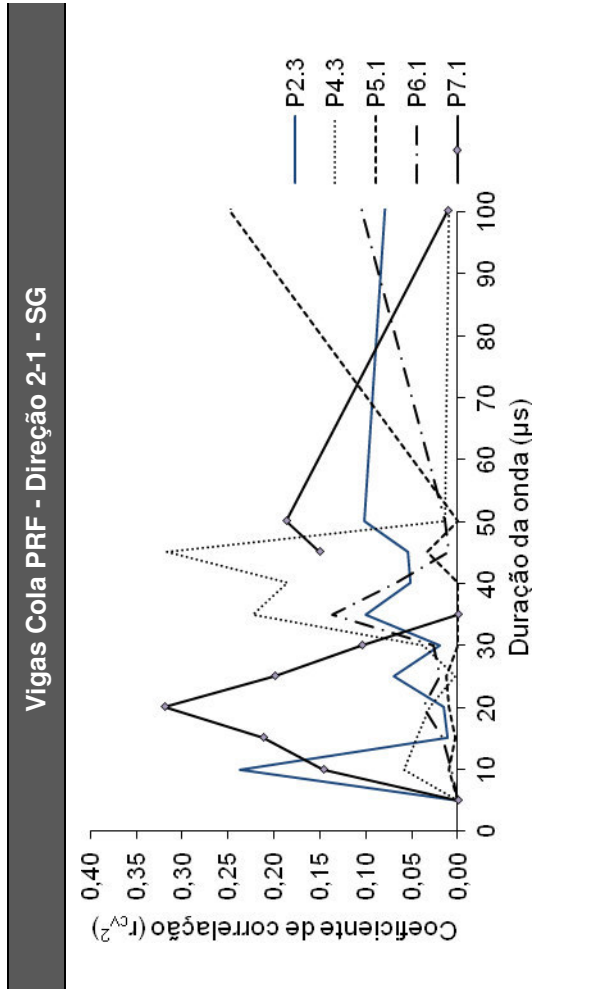
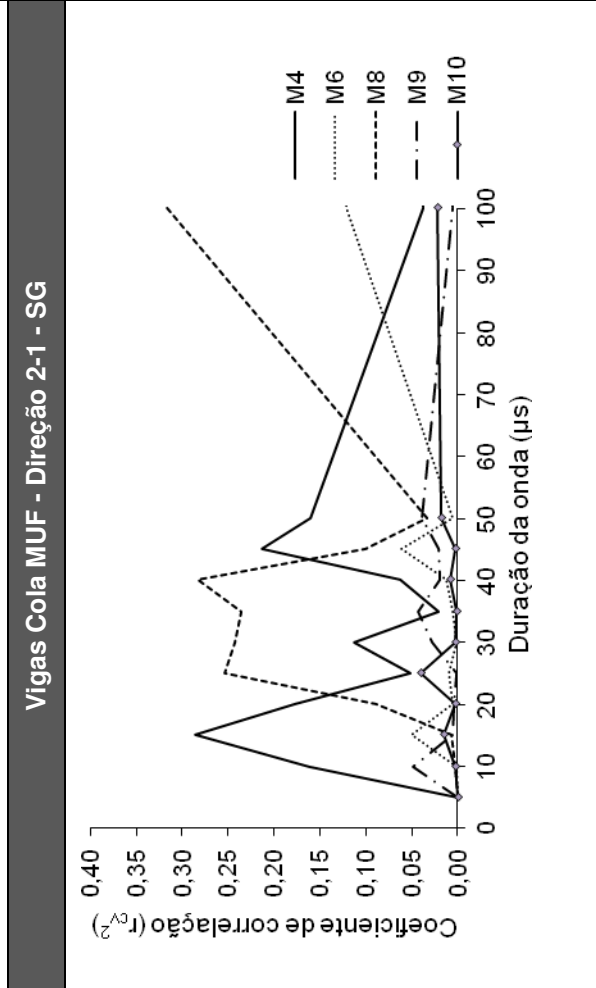
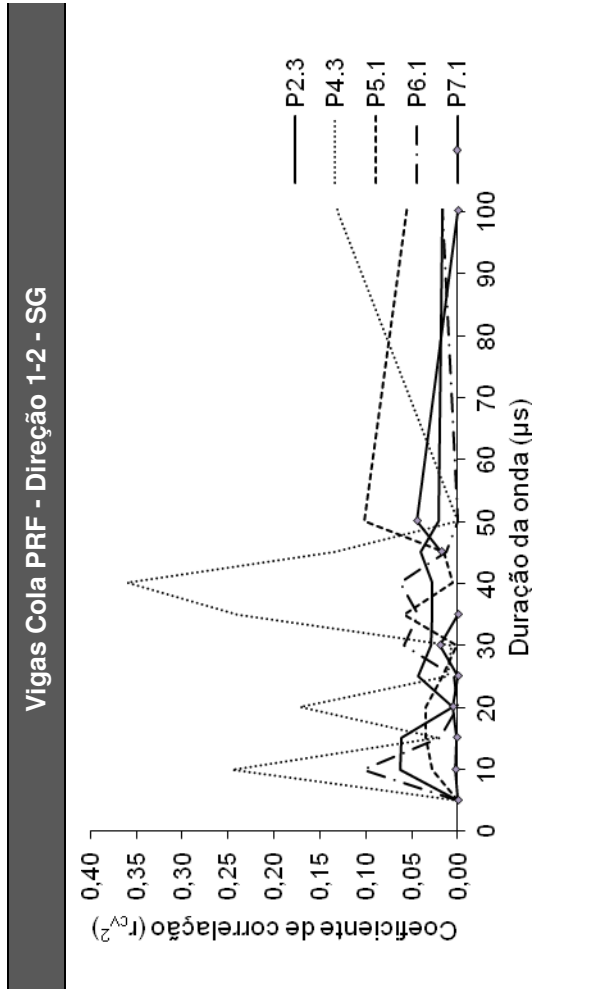
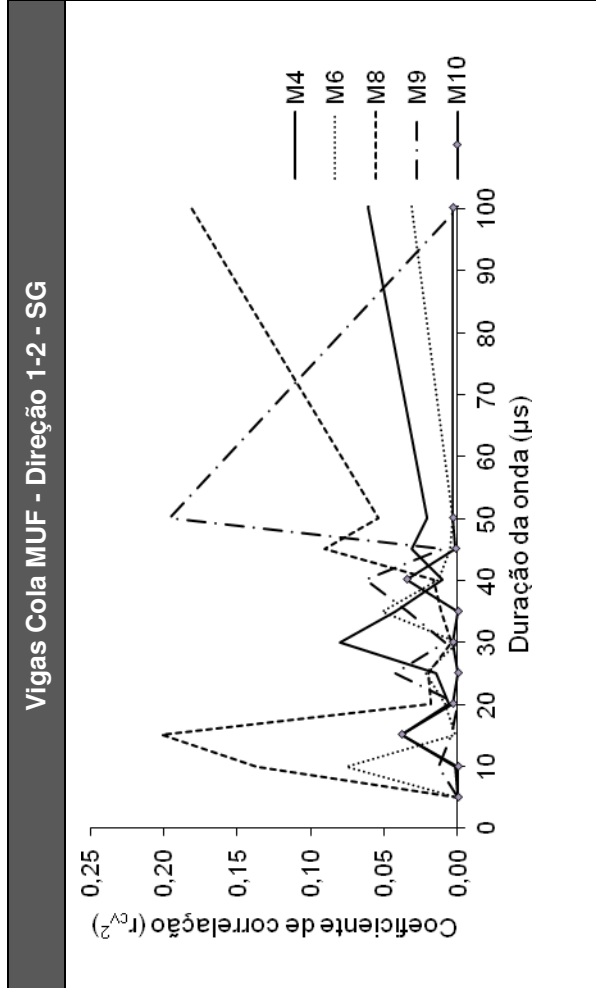
Vigas Cola MUF - Direção Média - SG



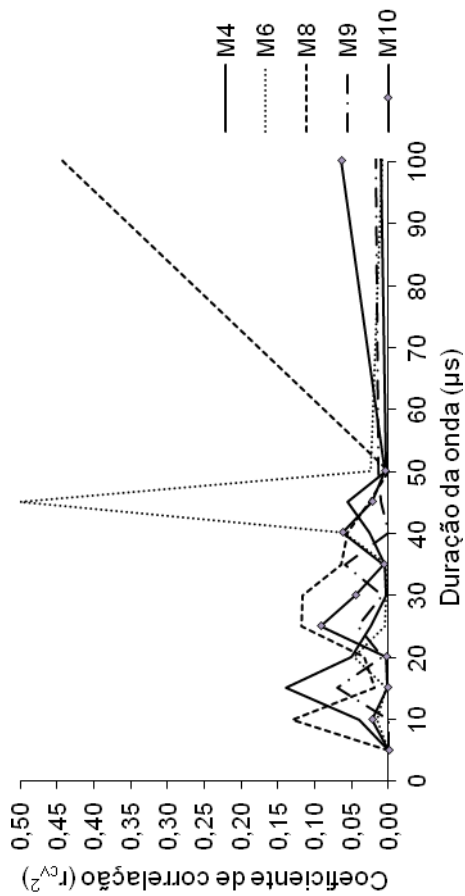
Vigas Cola PRF - Direção Média - SG



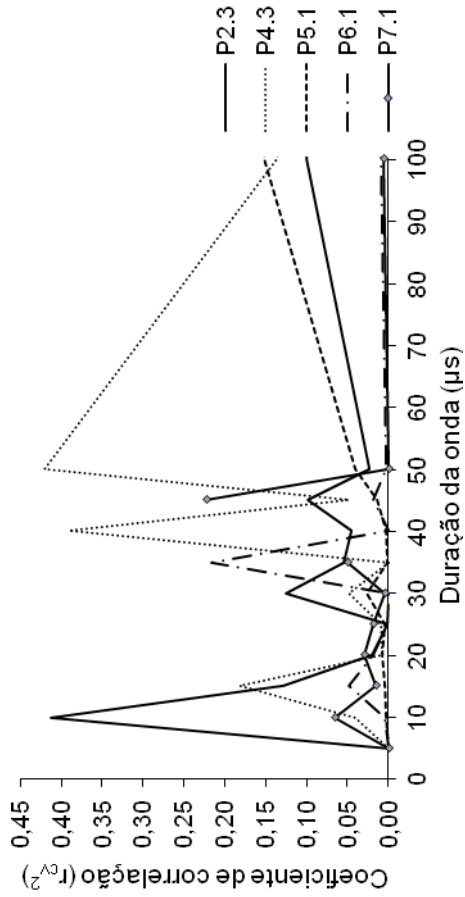
Calibração utilizando a onda no domínio da frequência
 SG – Resistência da junta colada



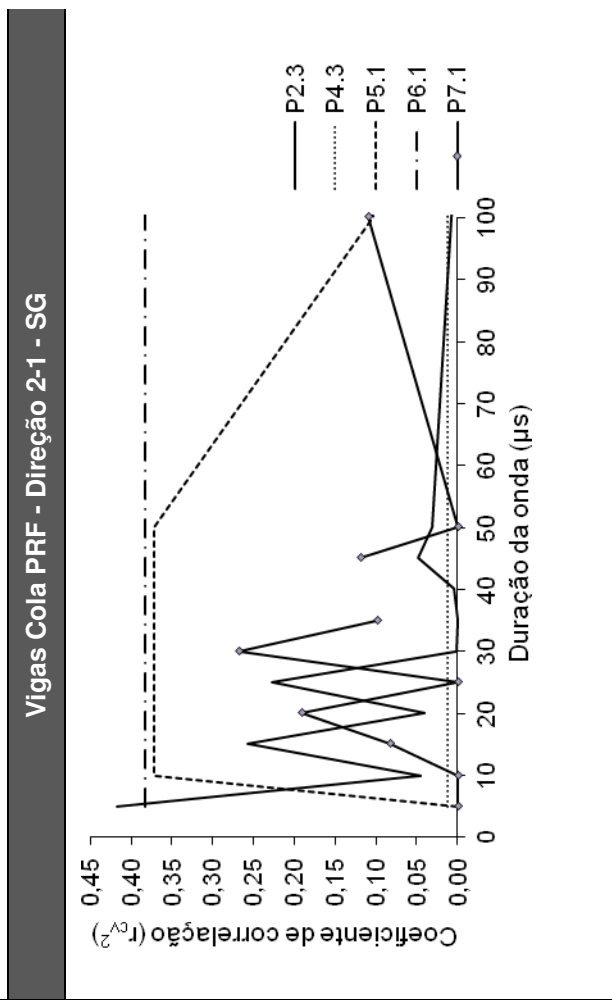
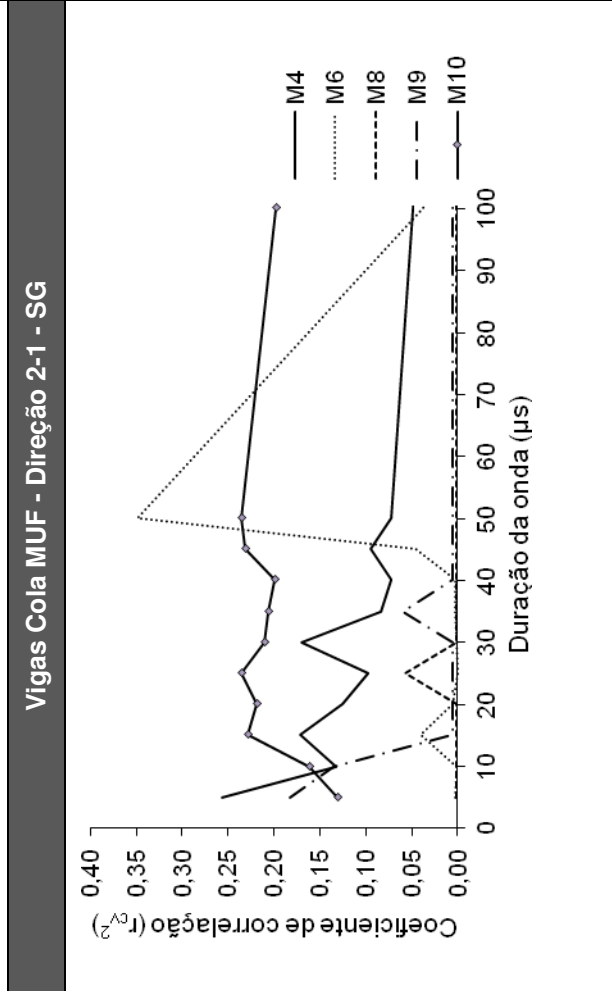
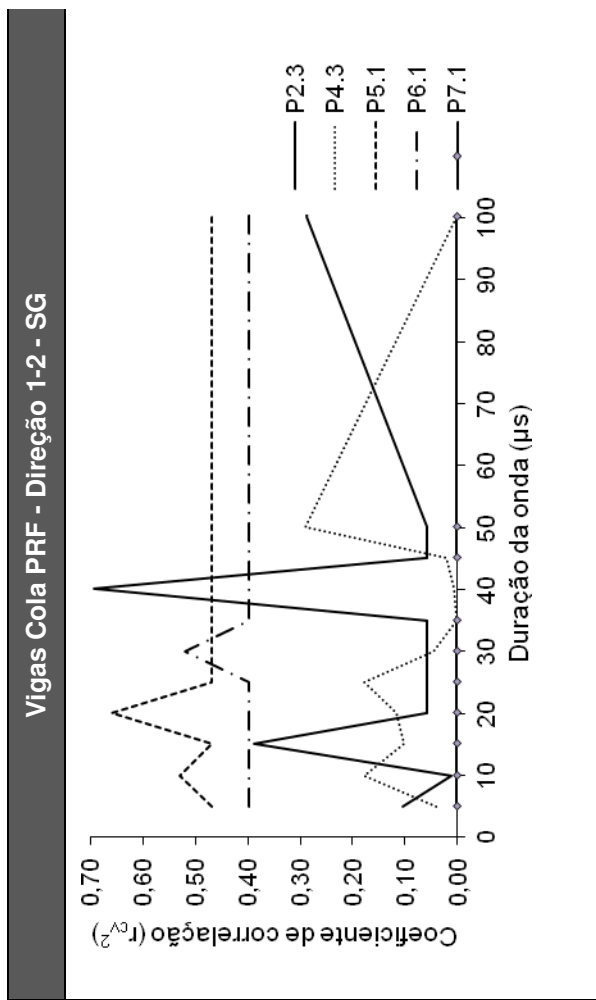
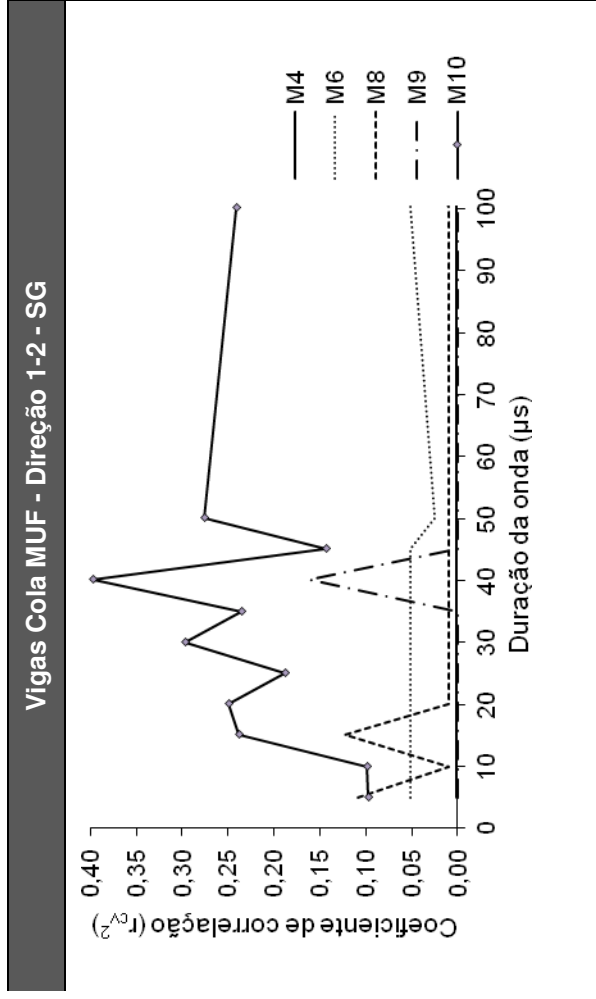
Vigas Cola MUF - Direção Média - SG



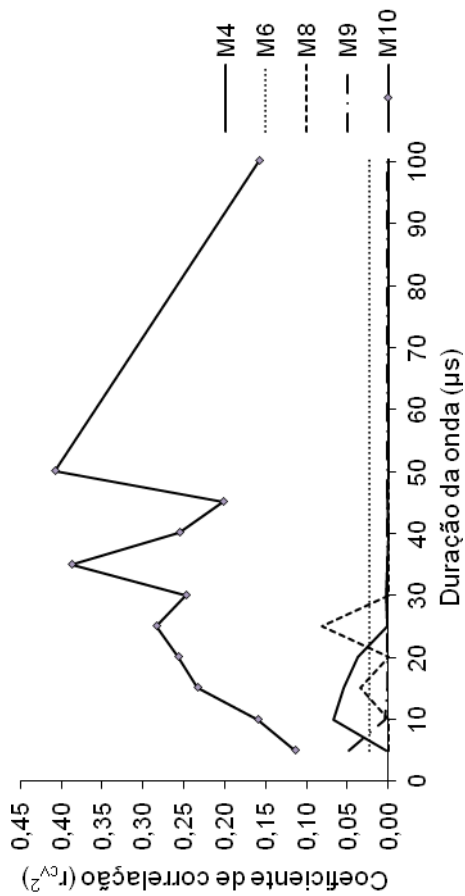
Vigas Cola PRF - Direção Média - SG



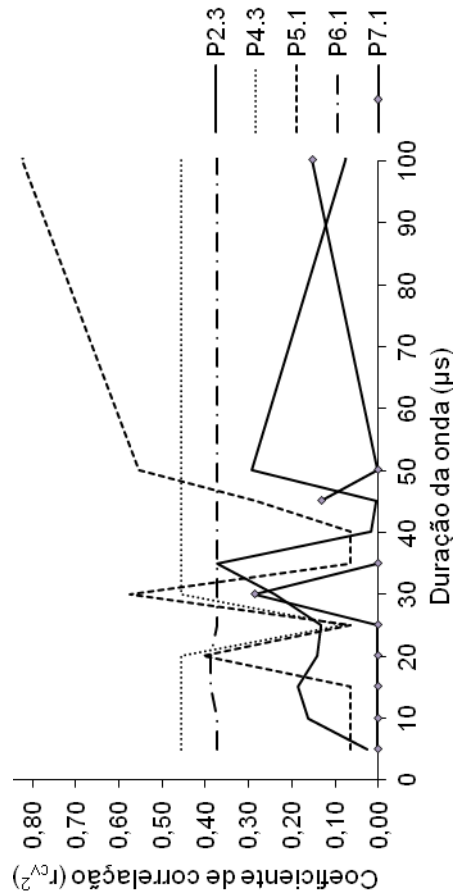
Calibração utilizando a velocidade e a onda no domínio da frequência
 SG – Resistência da junta colada



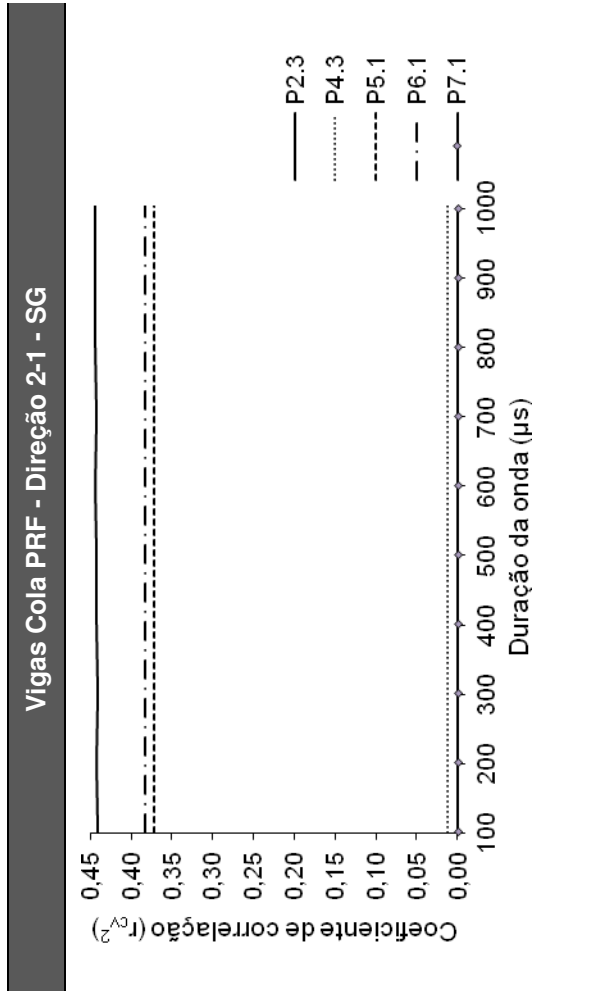
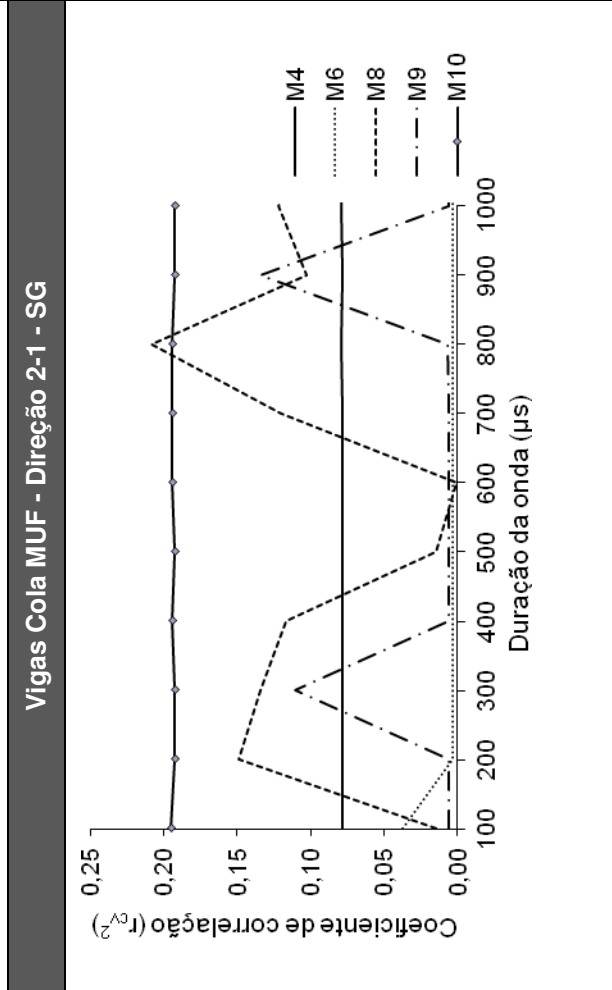
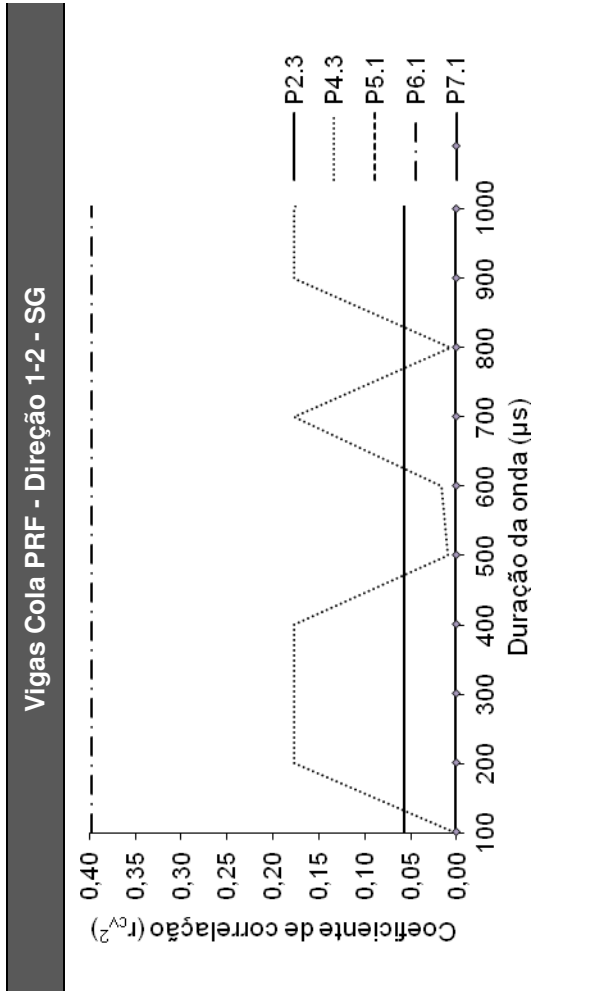
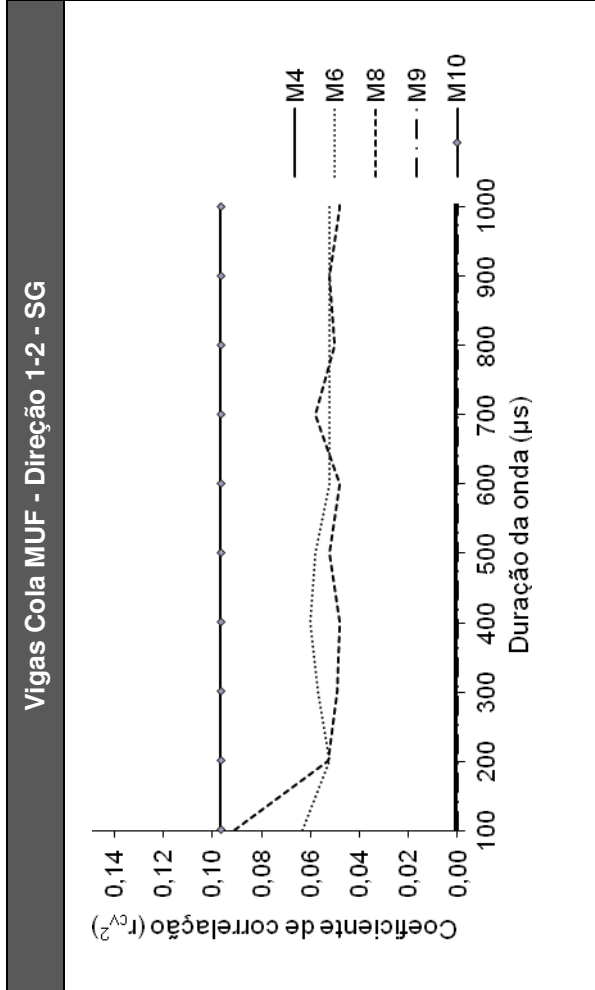
Vigas Cola MUF - Direção Média - SG

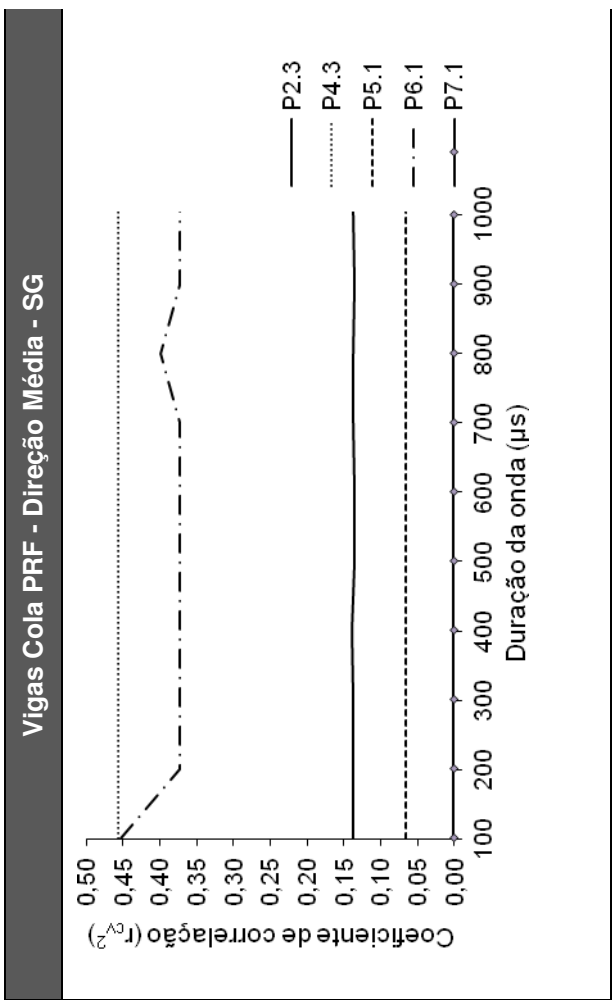
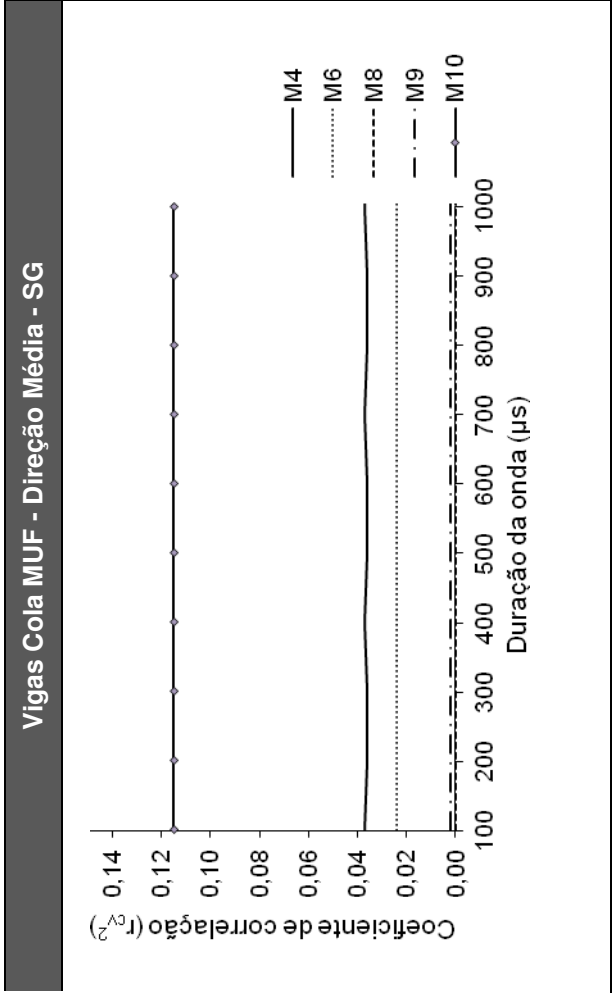


Vigas Cola PRF - Direção Média - SG



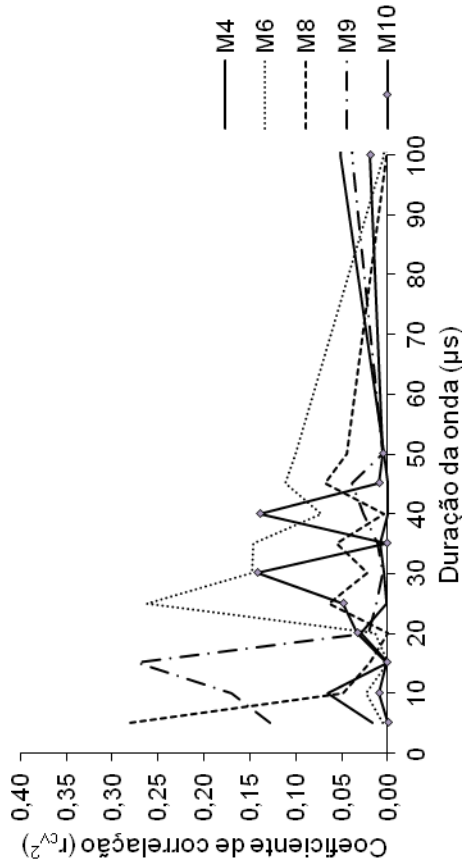
Calibração utilizando a velocidade e os parâmetros ultra-sónicos
 SG – Resistência da junta colada



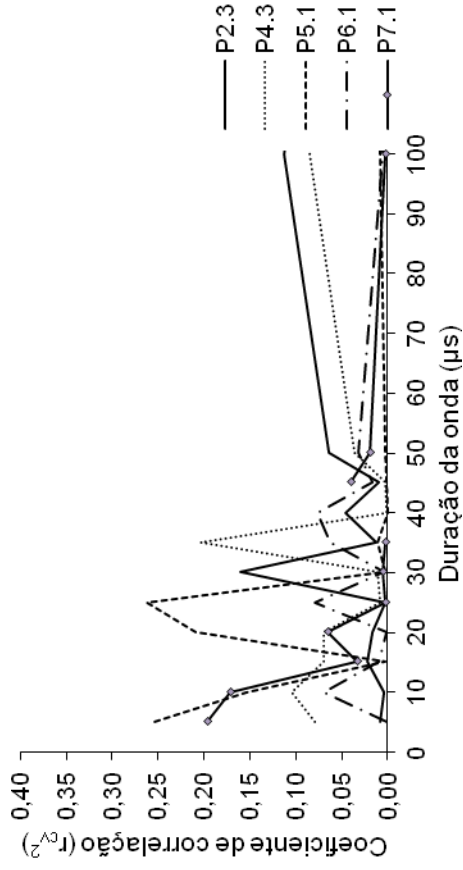


Calibração utilizando a onda no domínio do tempo
 SW – Resistência da madeira

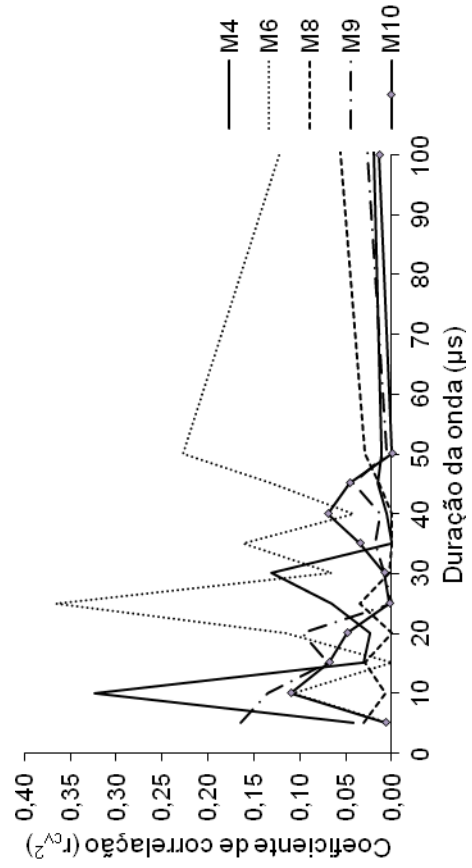
Vigas Cola MUF - Direção 1-2 - SW



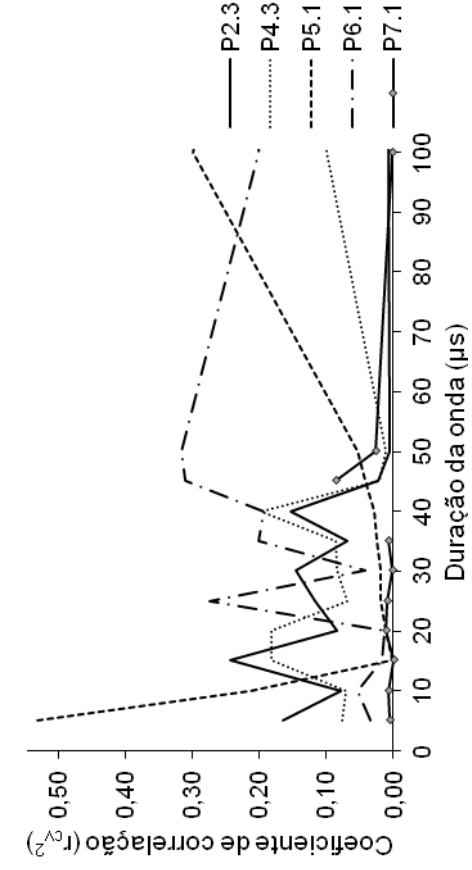
Vigas Cola PRF - Direção 1-2 - SW



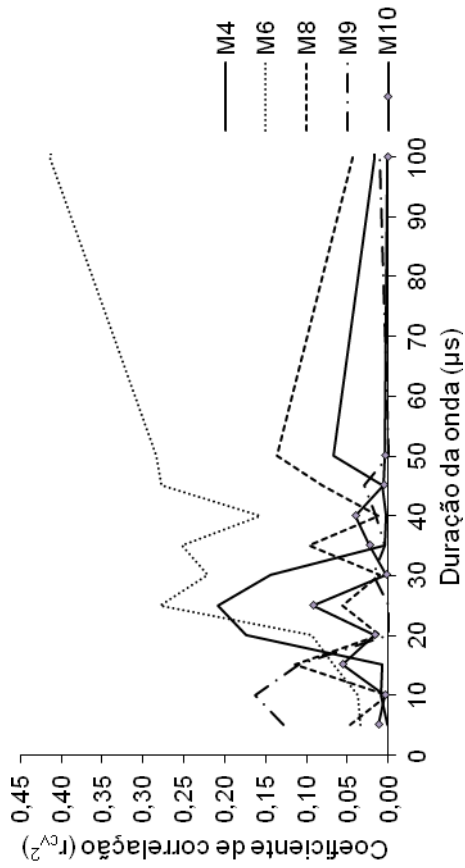
Vigas Cola MUF - Direção 2-1 - SW



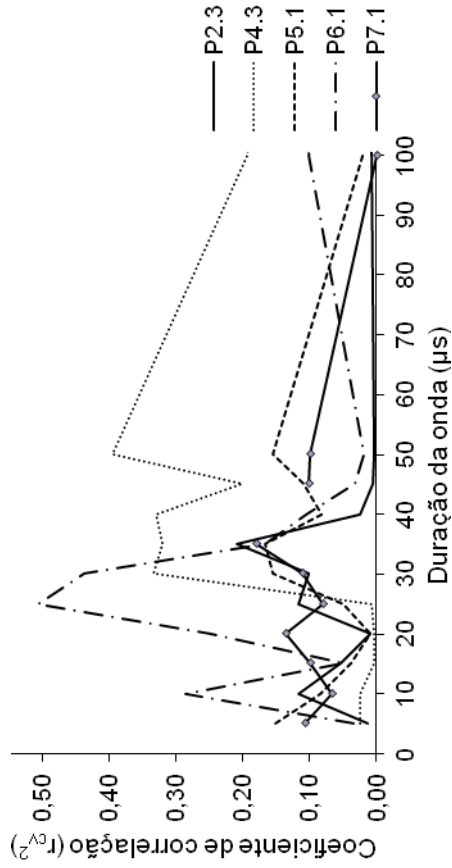
Vigas Cola PRF - Direção 2-1 - SW



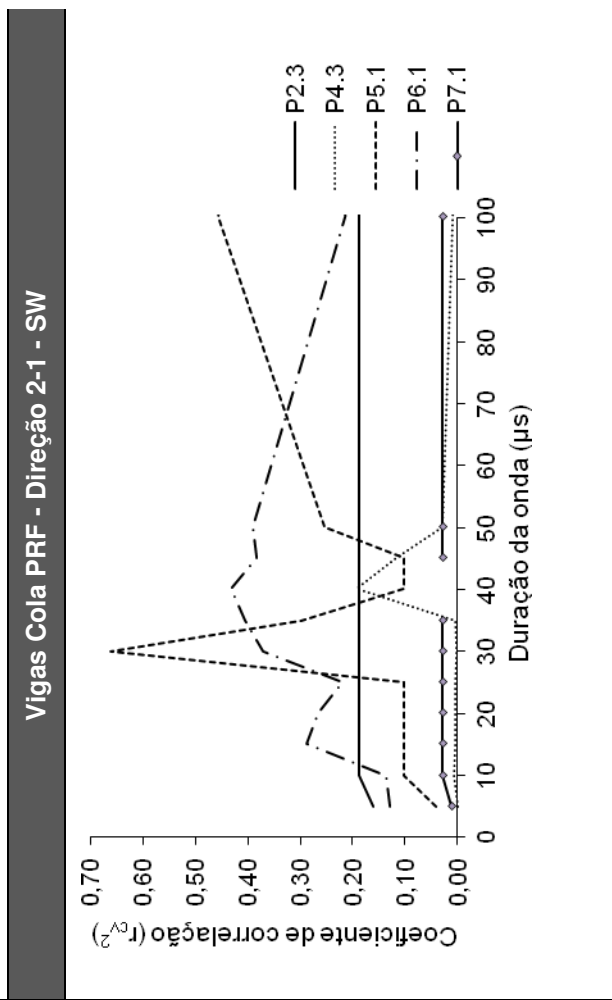
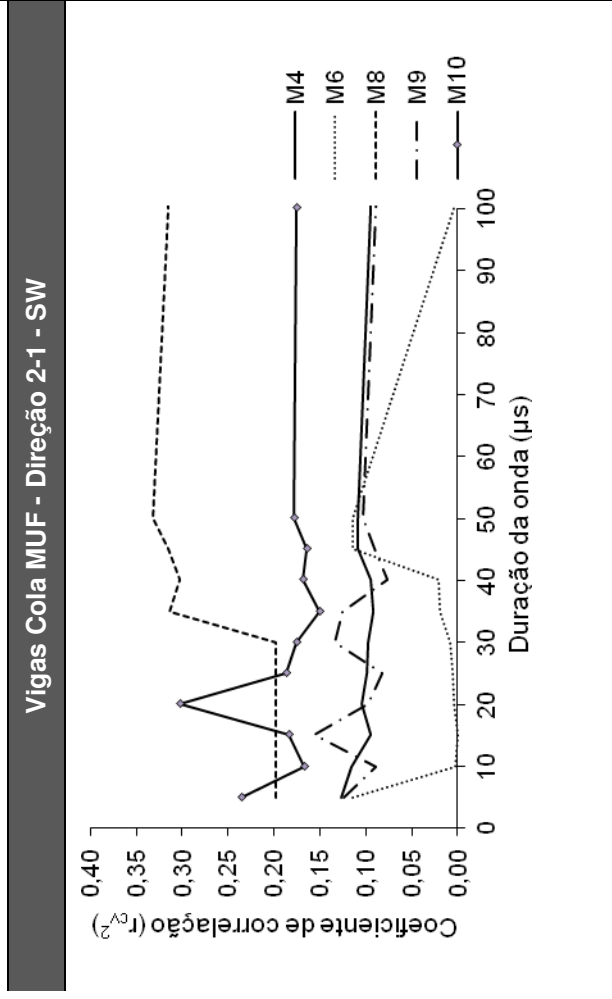
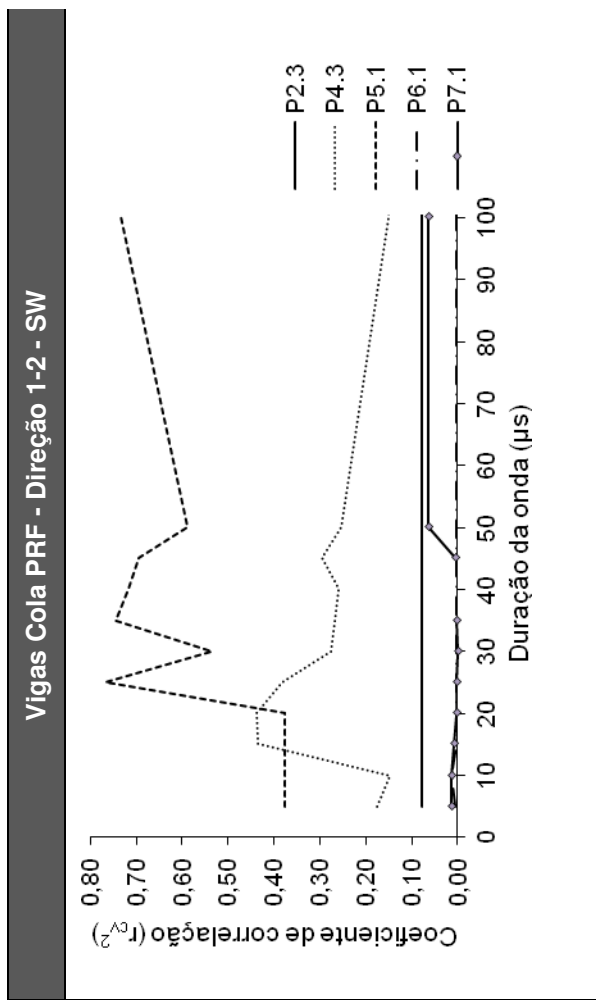
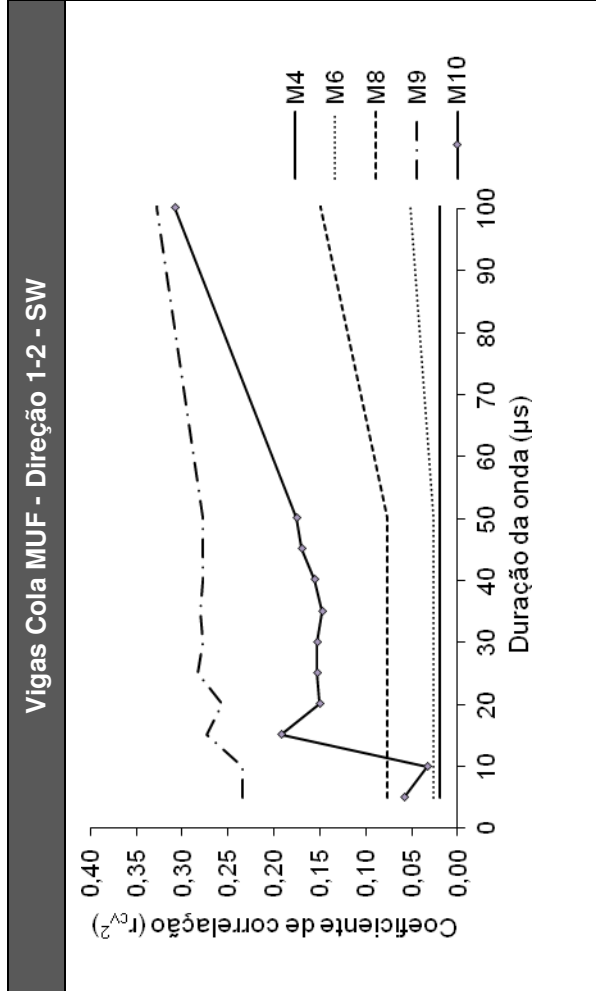
Vigas Cola MUF - Direção Média - SW



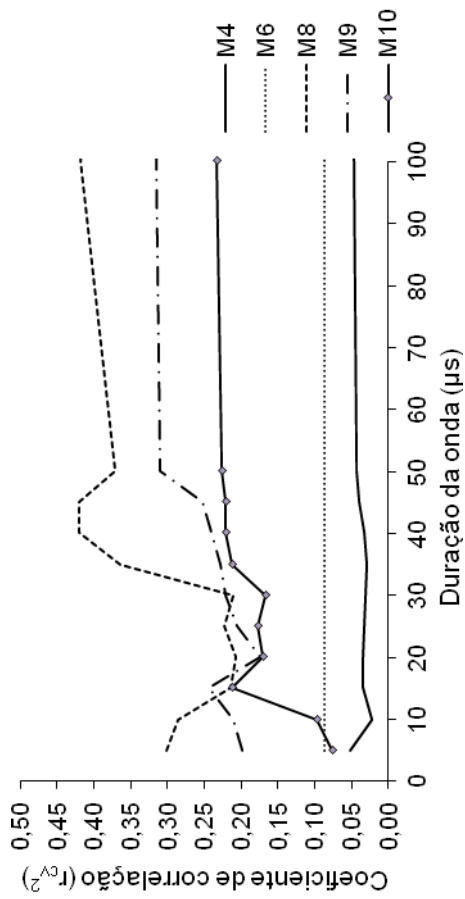
Vigas Cola PRF - Direção Média - SW



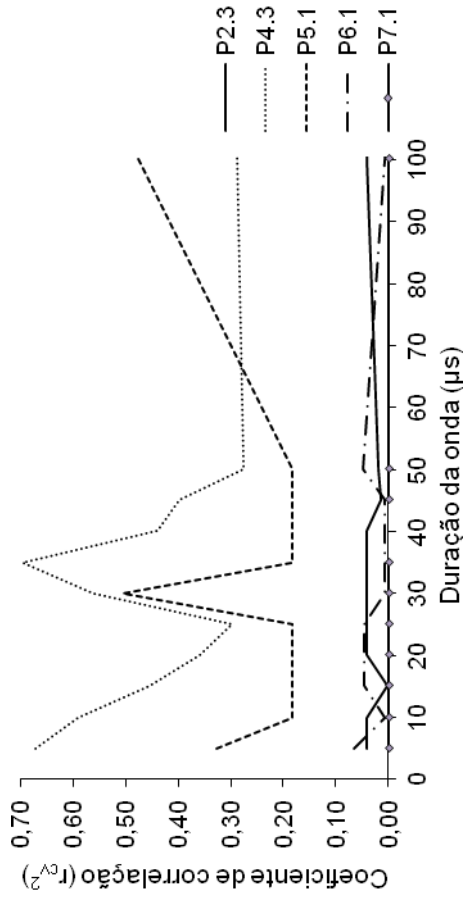
Calibração utilizando a velocidade e a onda no domínio do tempo
 SW – Resistência da madeira



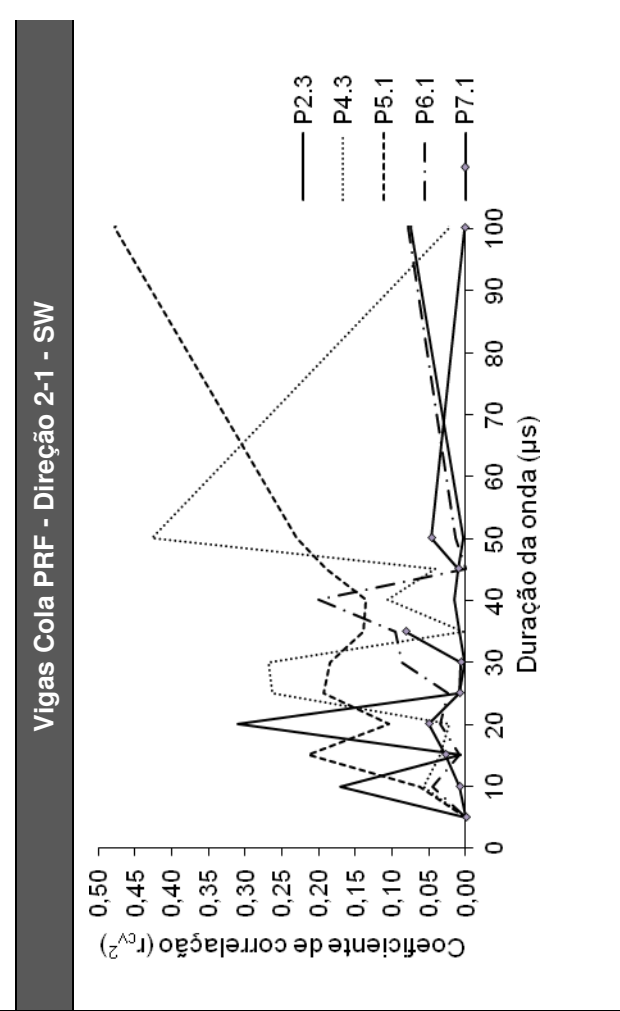
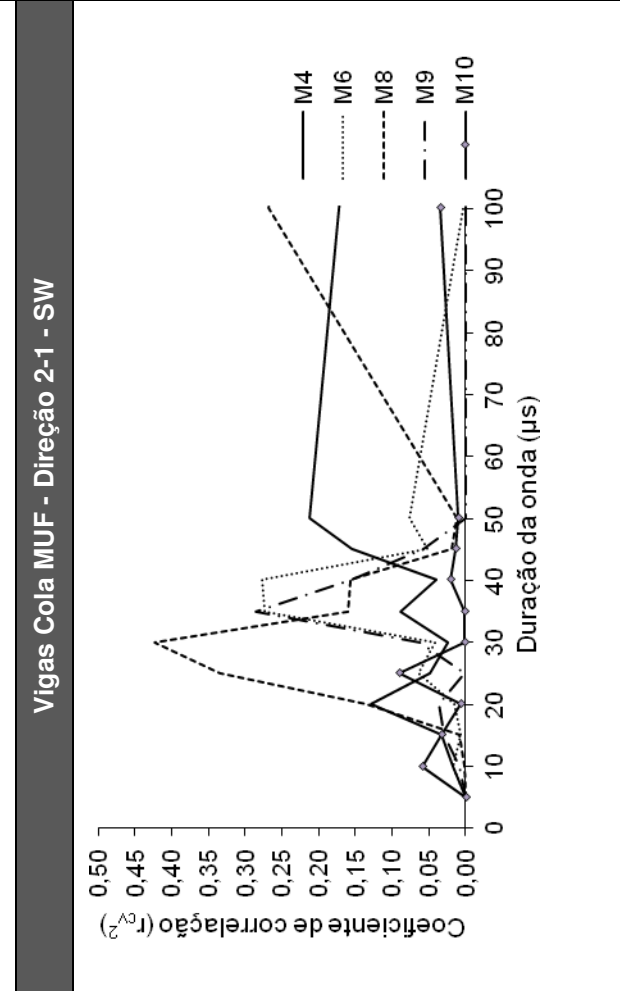
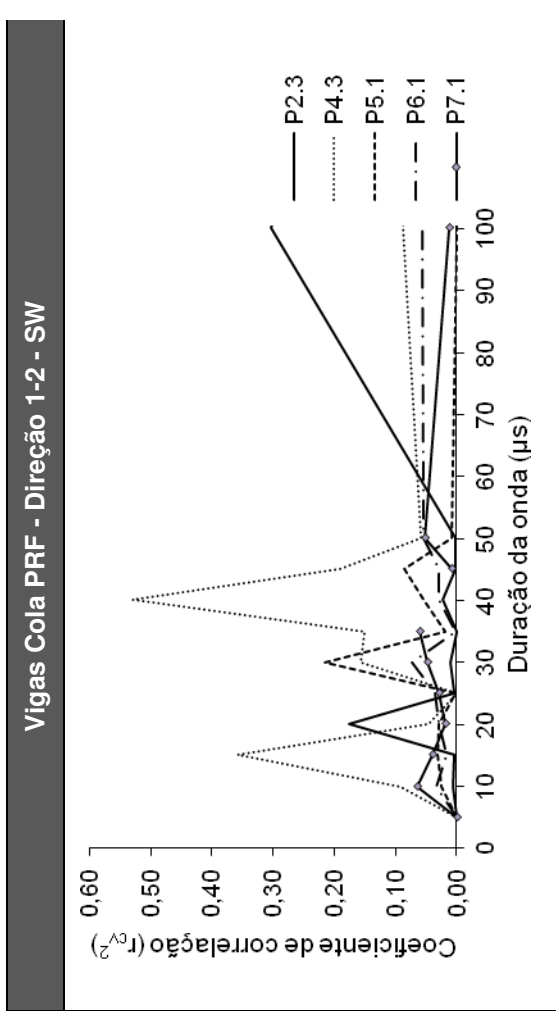
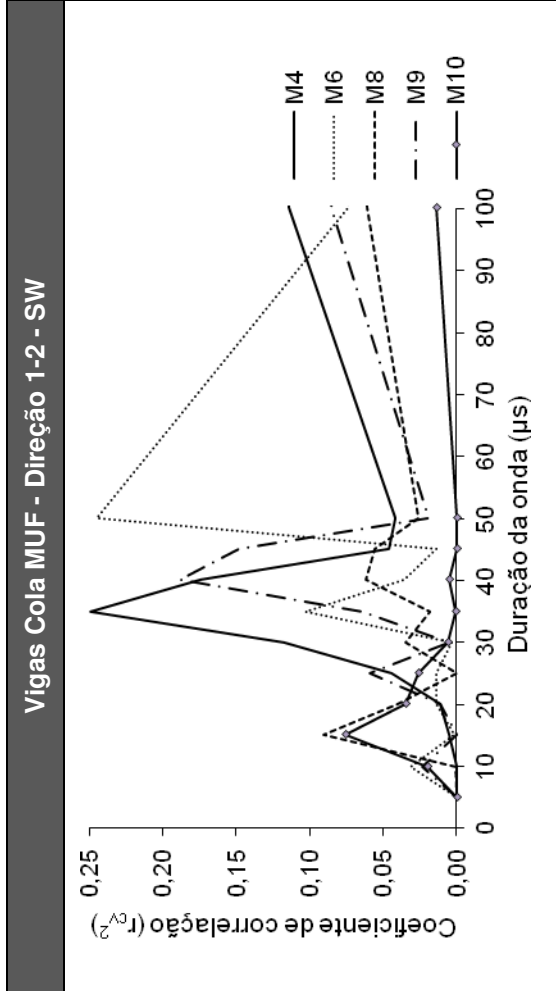
Vigas Cola MUF - Direção Média - SW



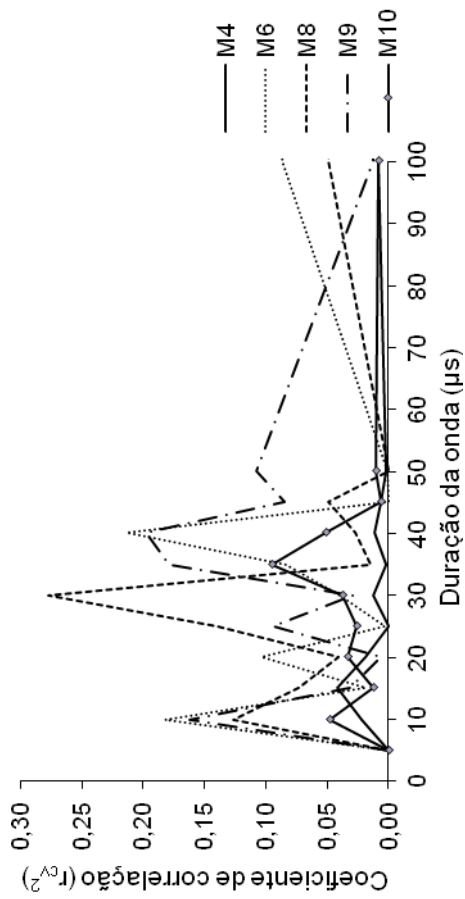
Vigas Cola PRF - Direção Média - SW



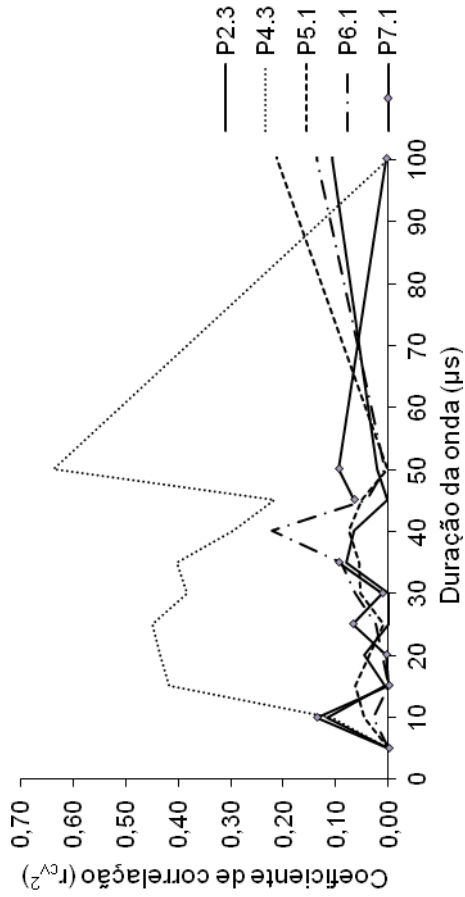
Calibração utilizando a onda no domínio da frequência
 SW – Resistência da madeira



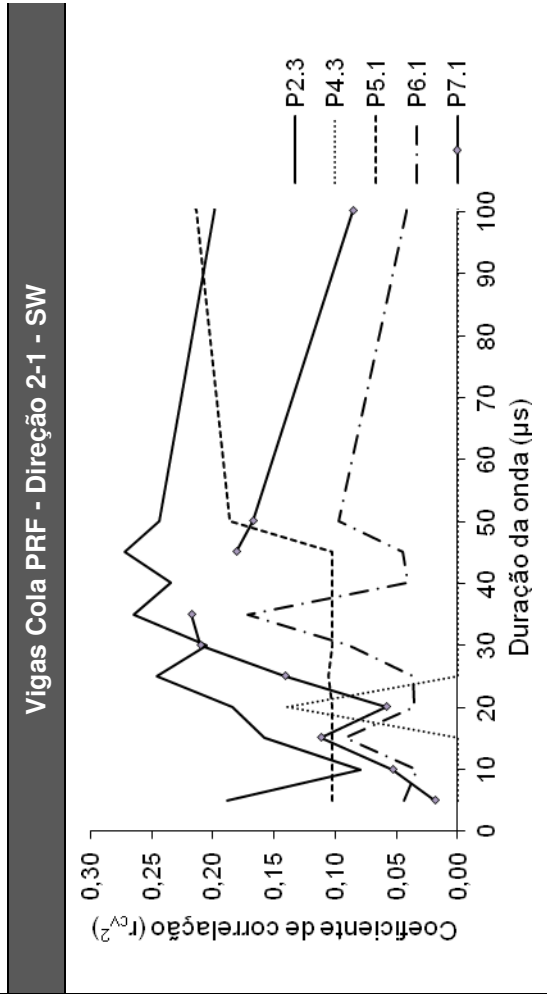
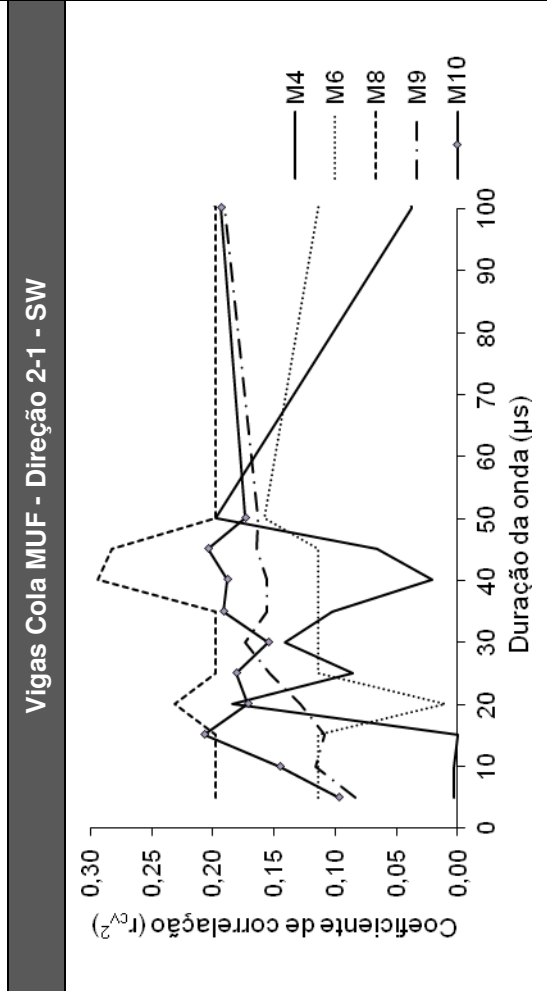
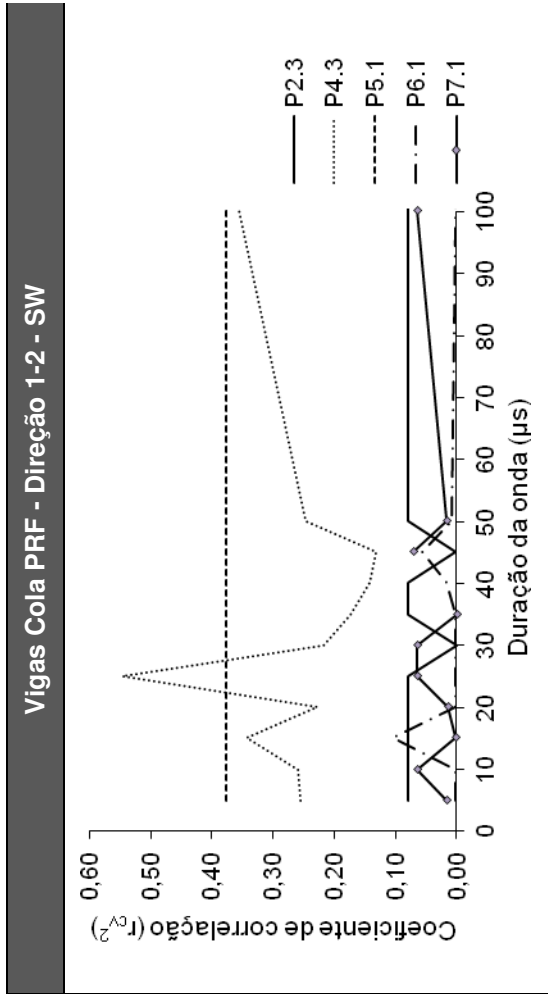
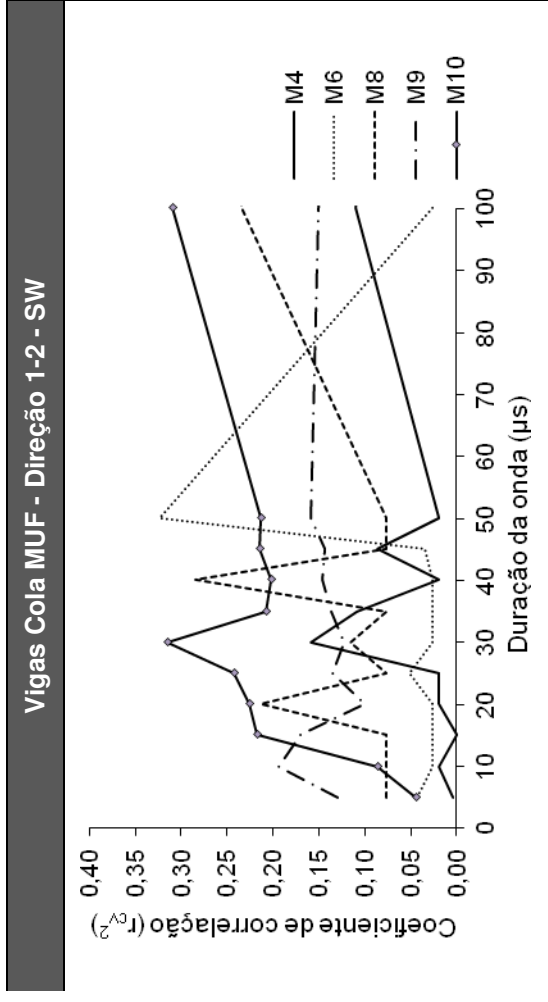
Vigas Cola MUF - Direção Média - SW



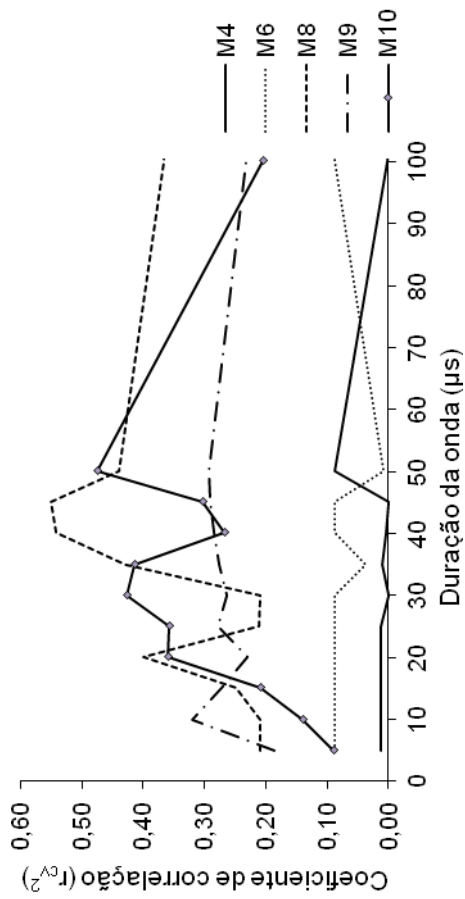
Vigas Cola PRF - Direção Média - SW



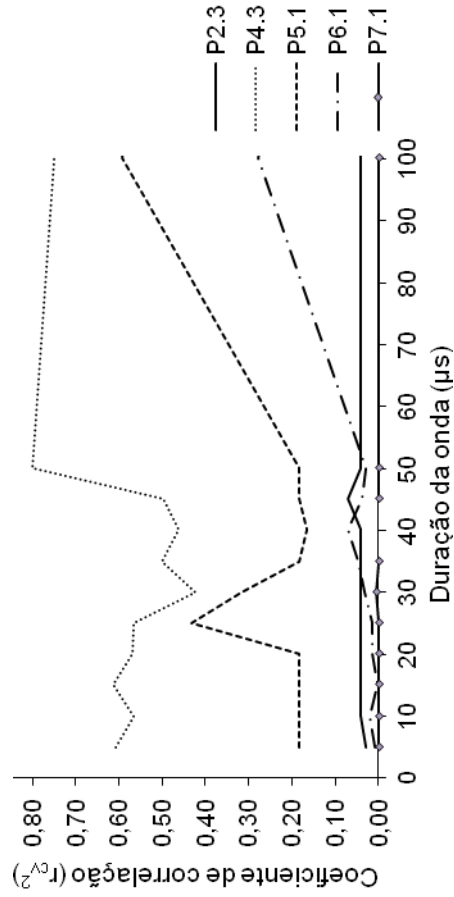
Calibração utilizando a velocidade e a onda no domínio da frequência
 SW – Resistência da madeira



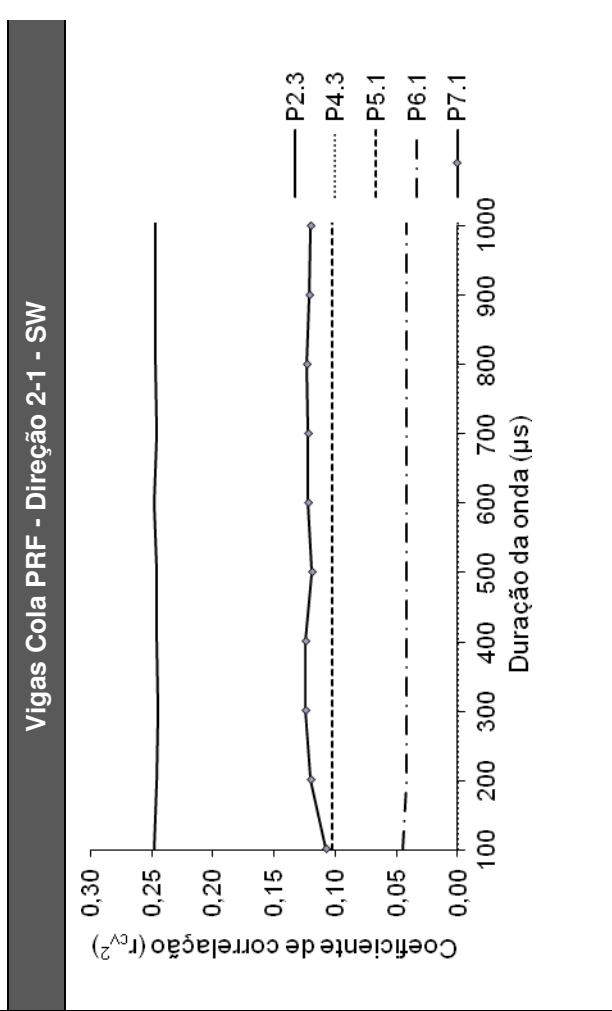
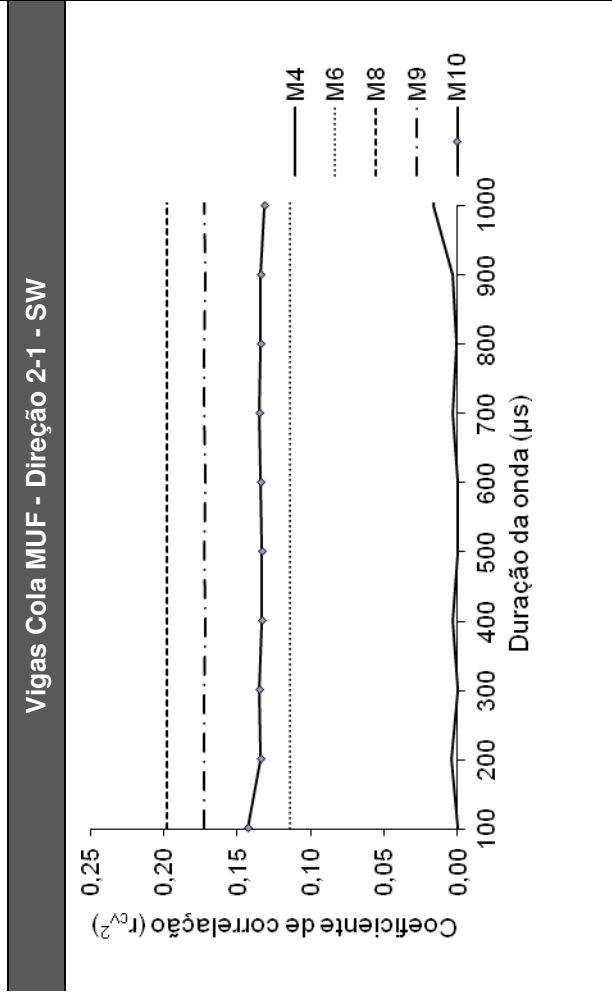
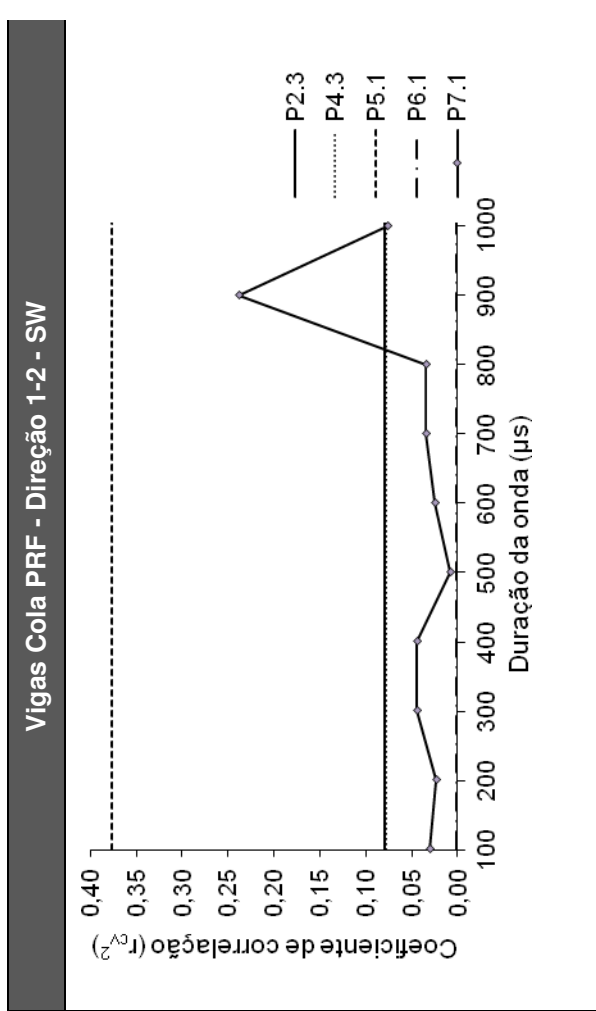
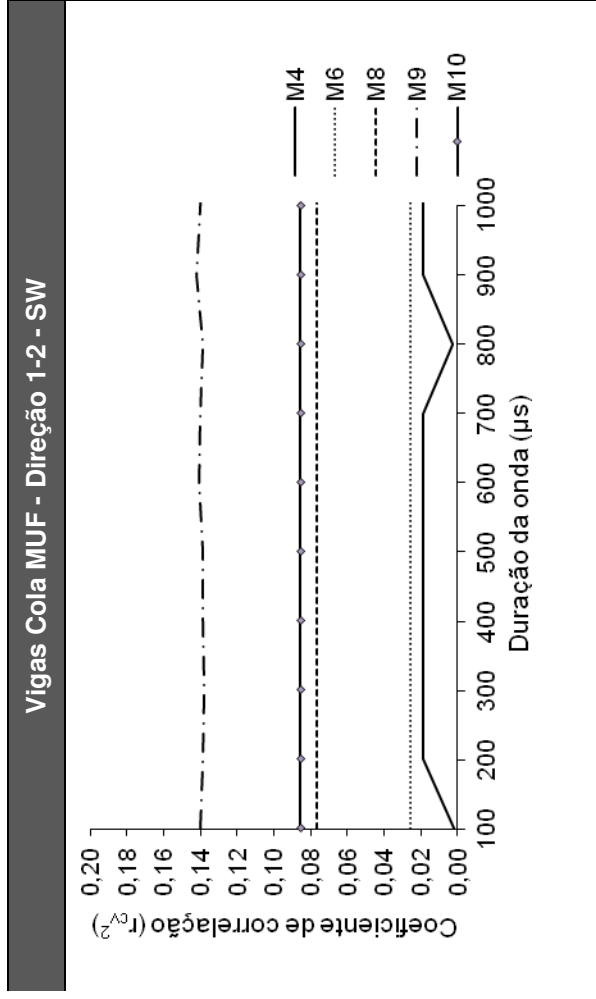
Vigas Cola MUF - Direção Média - SW



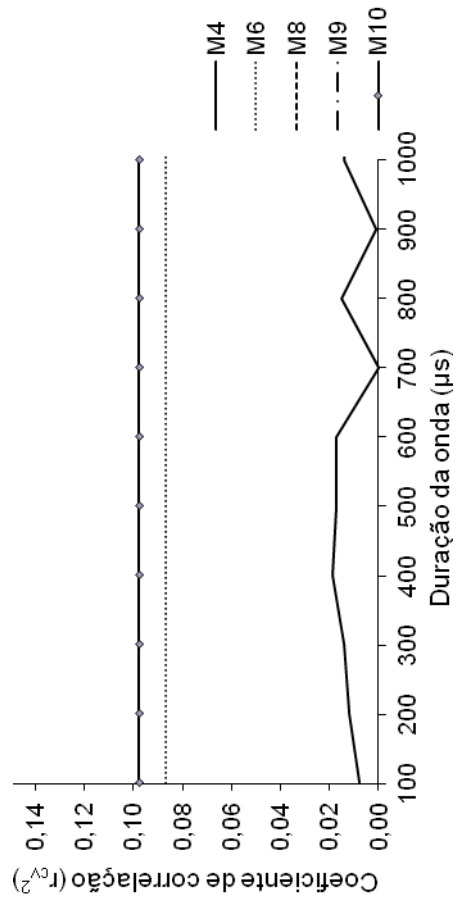
Vigas Cola PRF - Direção Média - SW



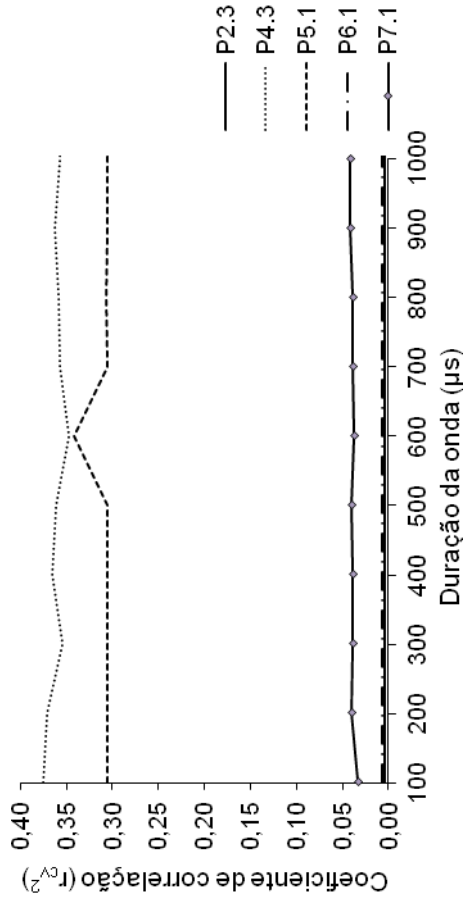
Calibração utilizando a velocidade e os parâmetros ultra-sônicos
 SW – Resistência da madeira



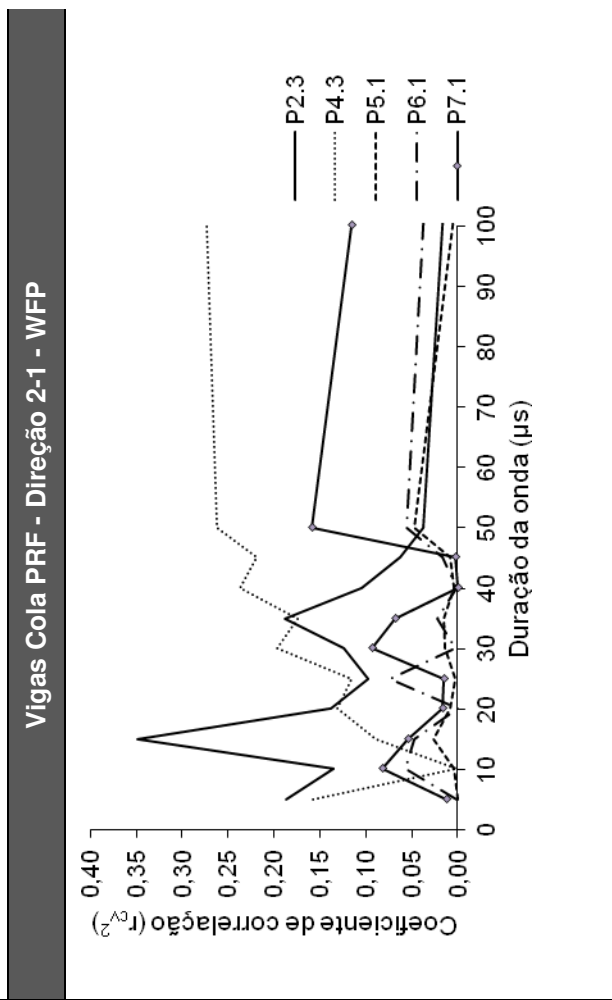
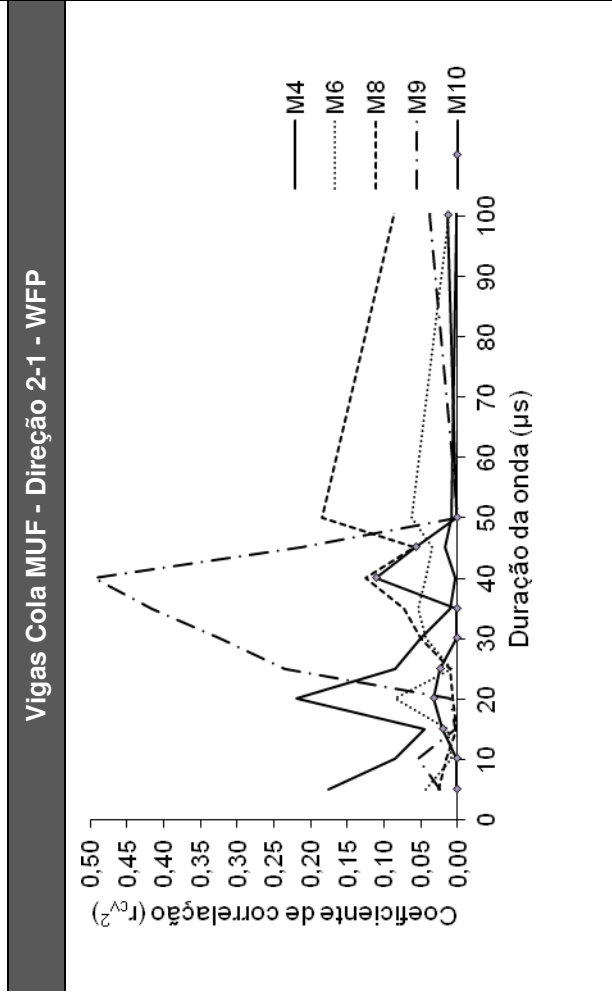
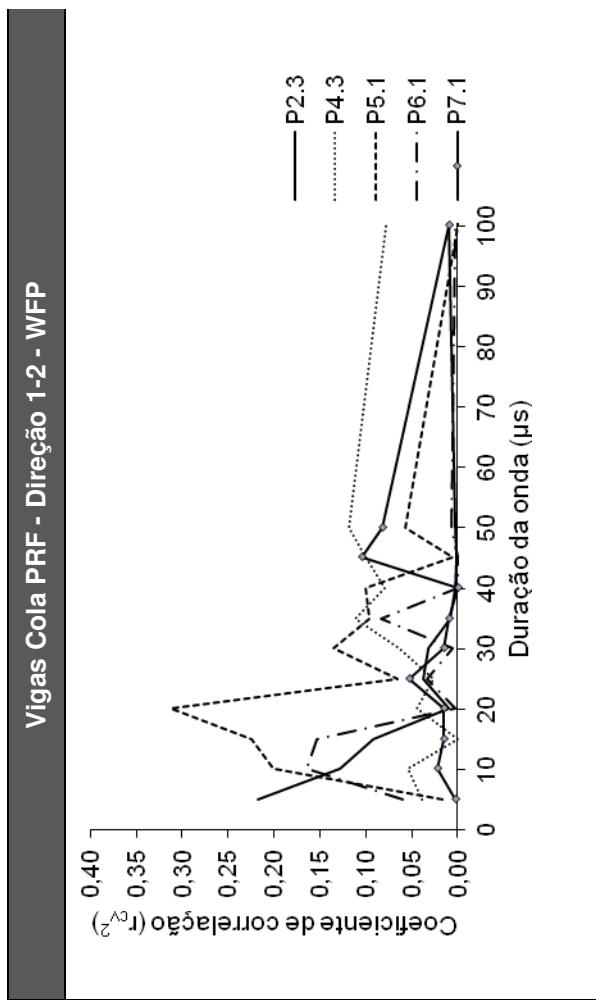
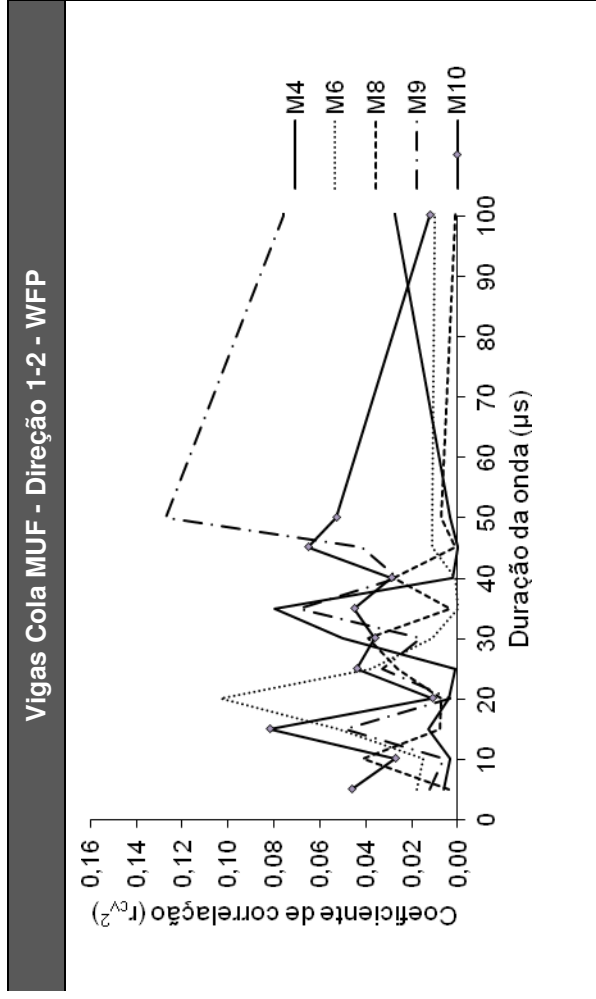
Vigas Cola MUF - Direção Média - SW



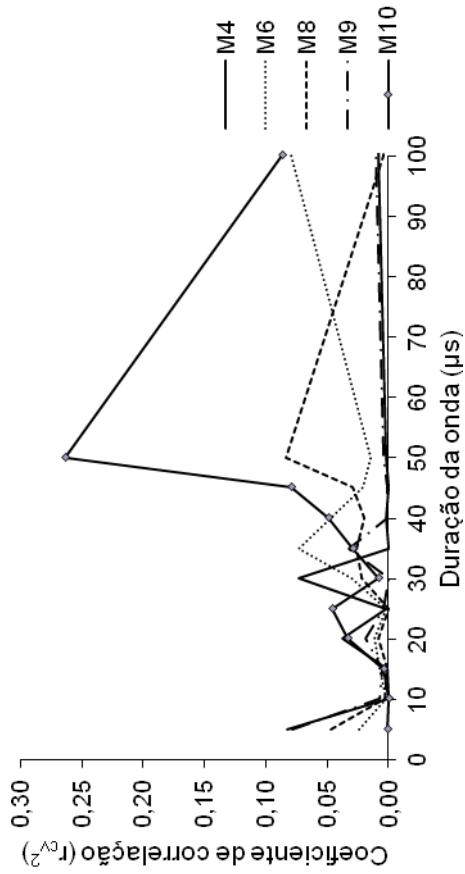
Vigas Cola PRF - Direção Média - SW



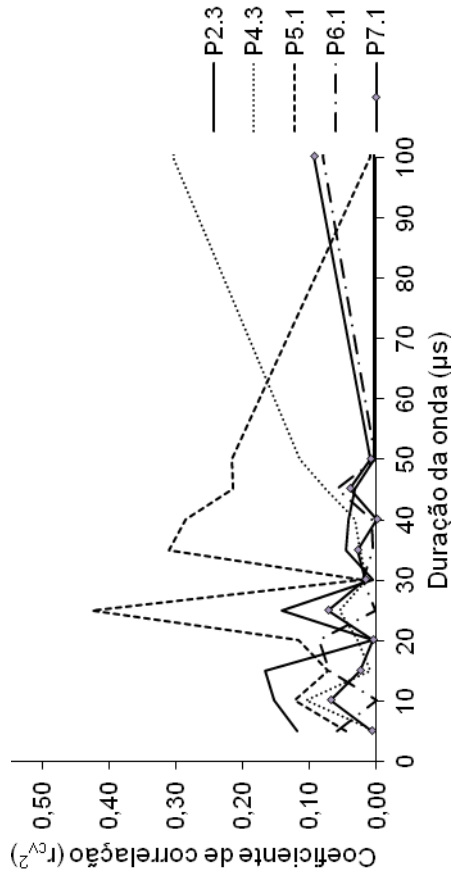
Calibração utilizando a onda no domínio do tempo
 WFP – Percentagem de rotura pela madeira



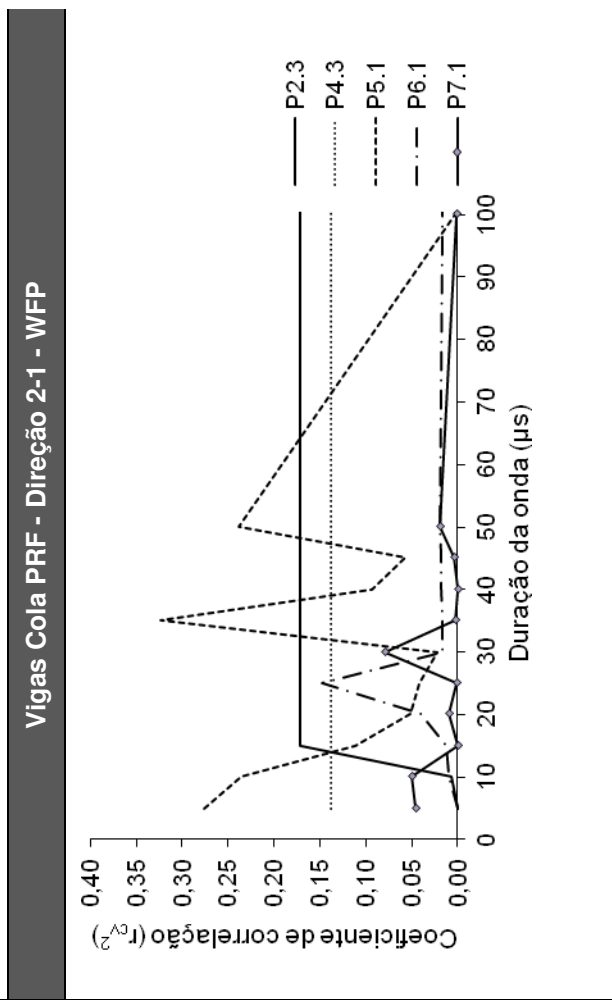
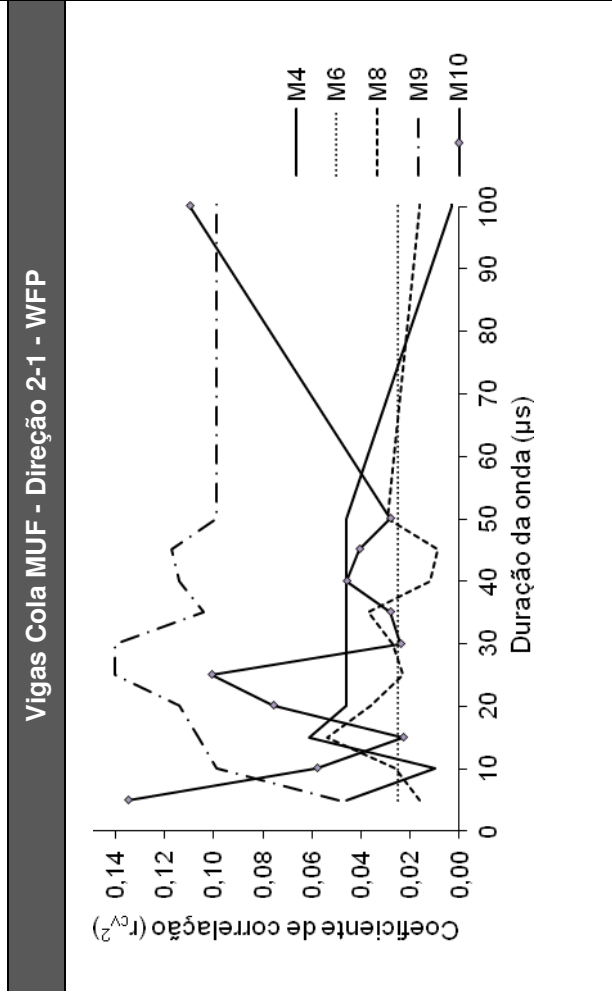
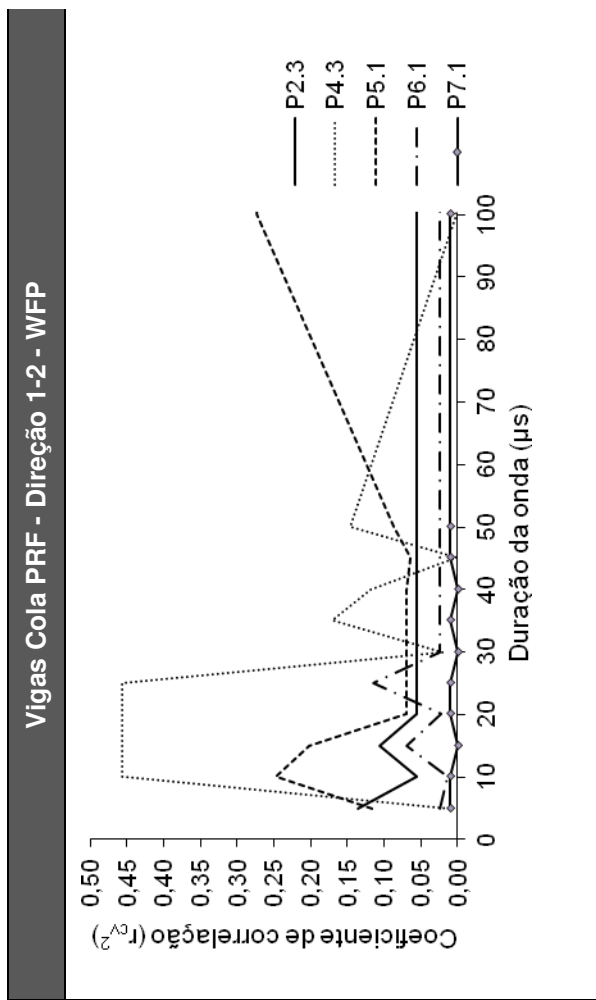
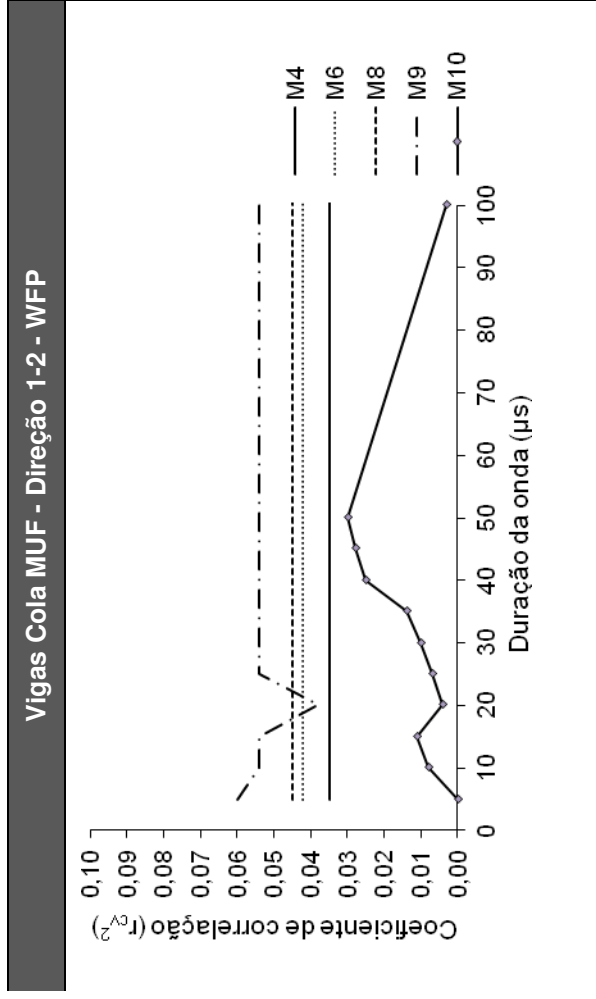
Vigas Cola MUF - Direção Média - WFP



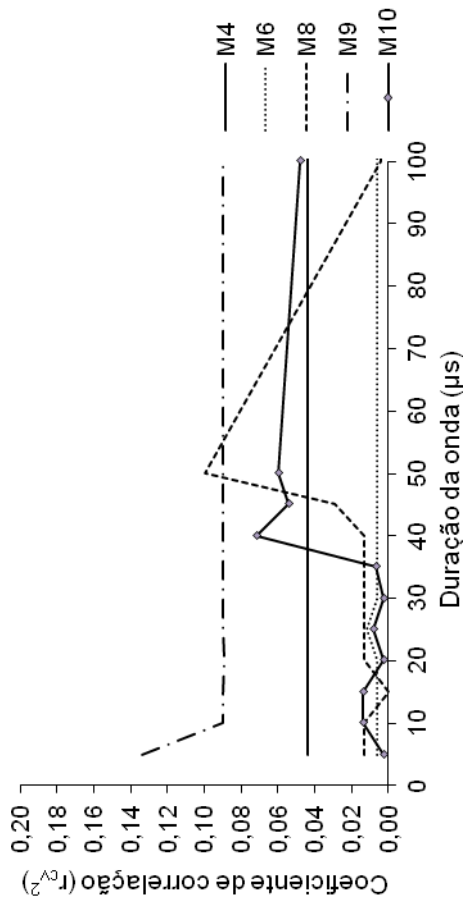
Vigas Cola PRF - Direção Média - WFP



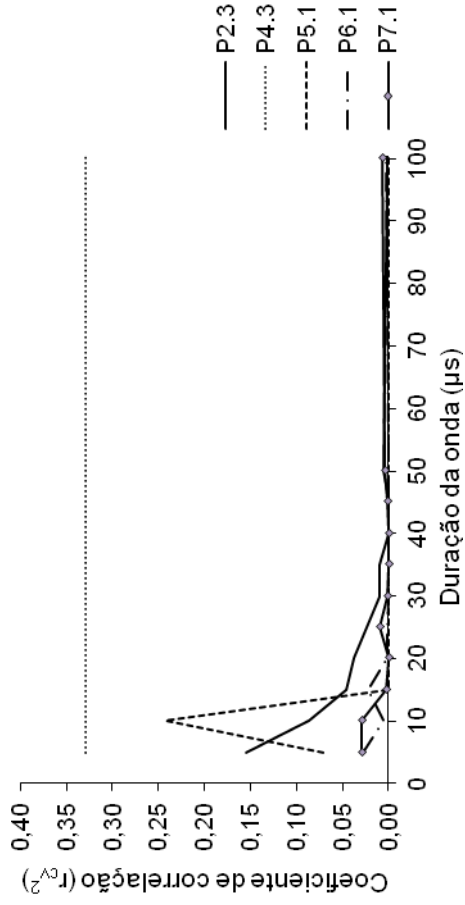
Calibração utilizando a velocidade e a onda no domínio do tempo
 WFP – Percentagem de rotura pela madeira



Vigas Cola MUF - Direção Média - WFP

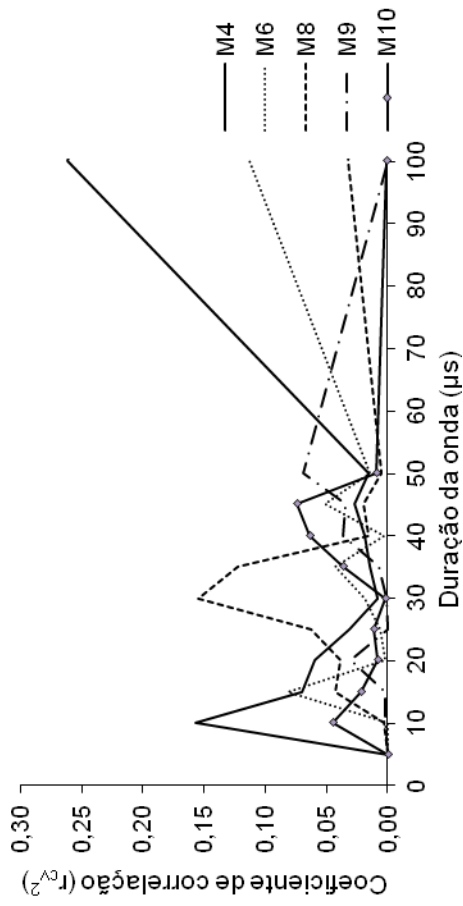


Vigas Cola PRF - Direção Média - WFP

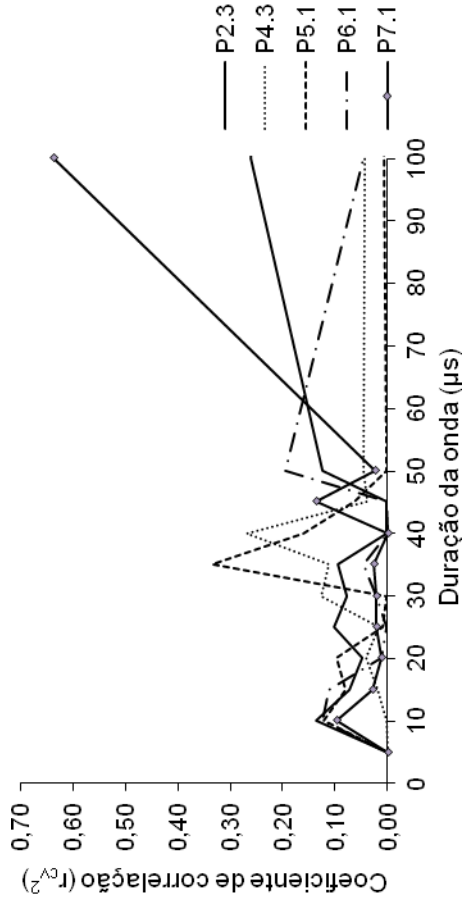


Calibração utilizando a onda no domínio da frequência
WFP – Percentagem de rotura pela madeira

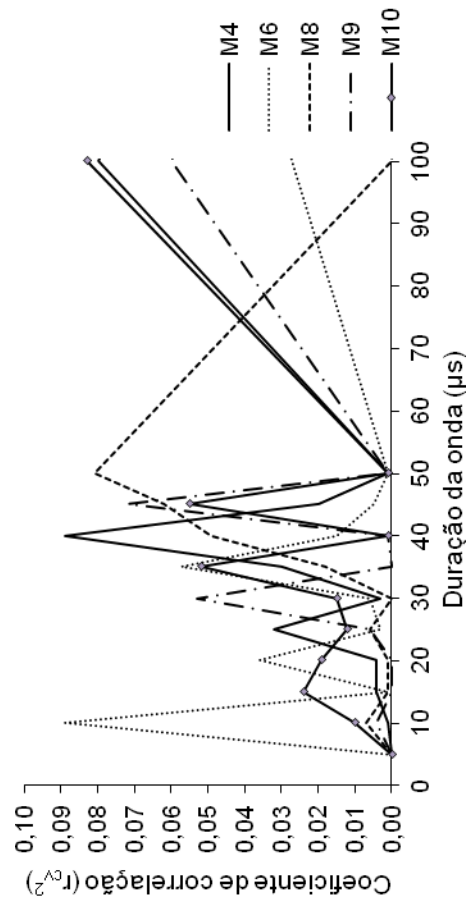
Vigas Cola MUF - Direção 1-2 - WFP



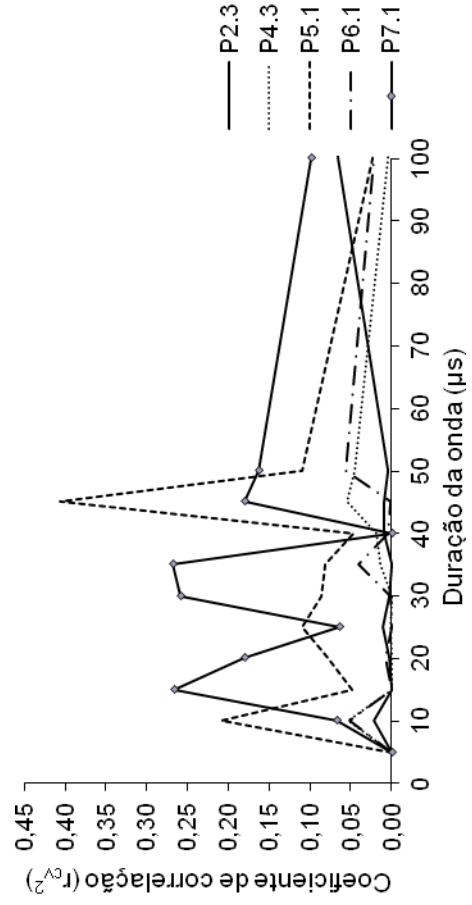
Vigas Cola PRF - Direção 1-2 - WFP



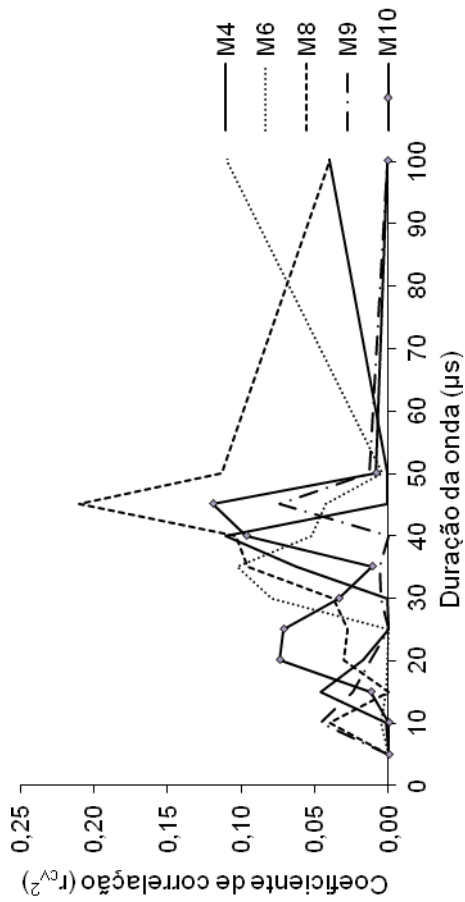
Vigas Cola MUF - Direção 2-1 - WFP



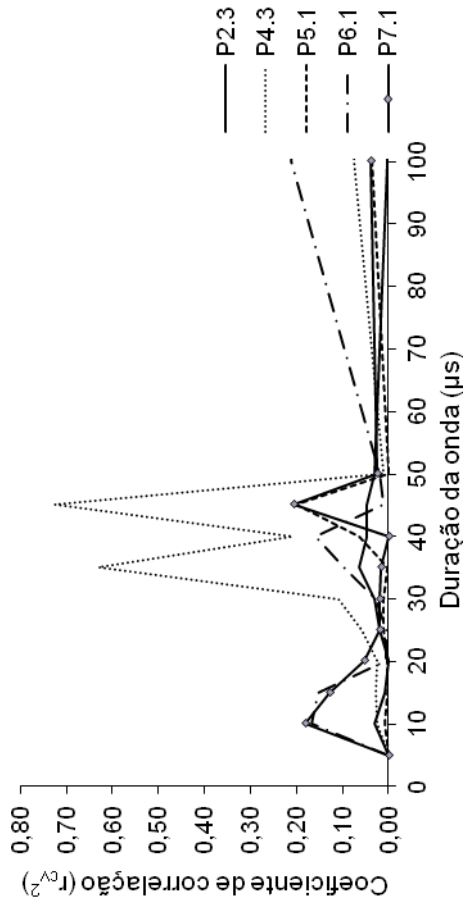
Vigas Cola PRF - Direção 2-1 - WFP



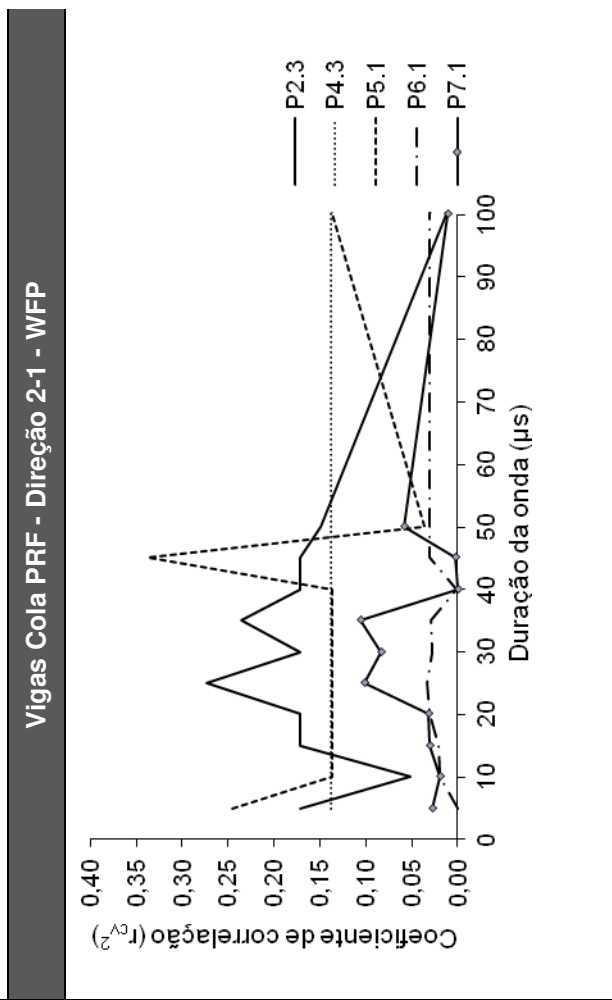
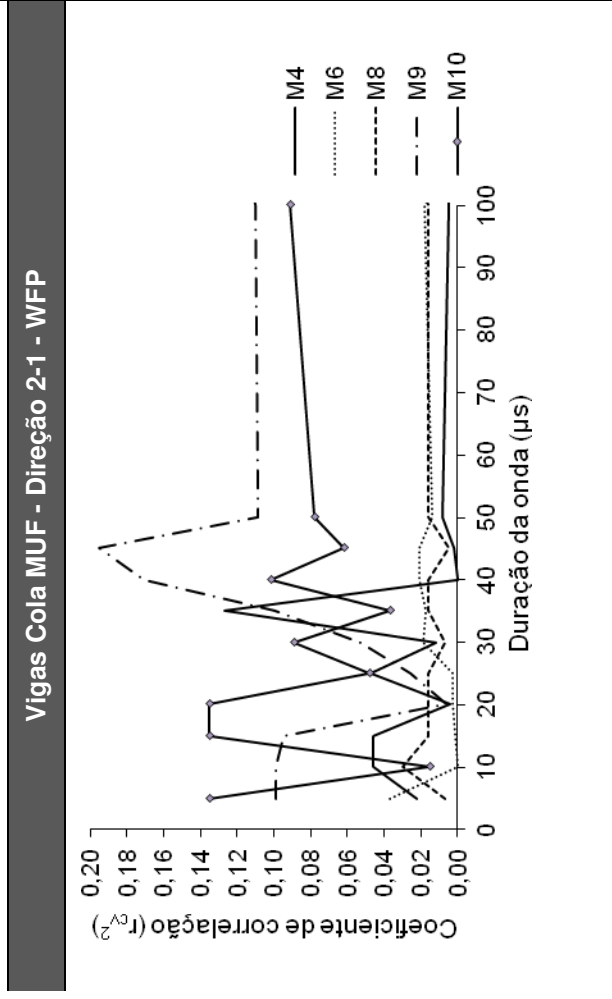
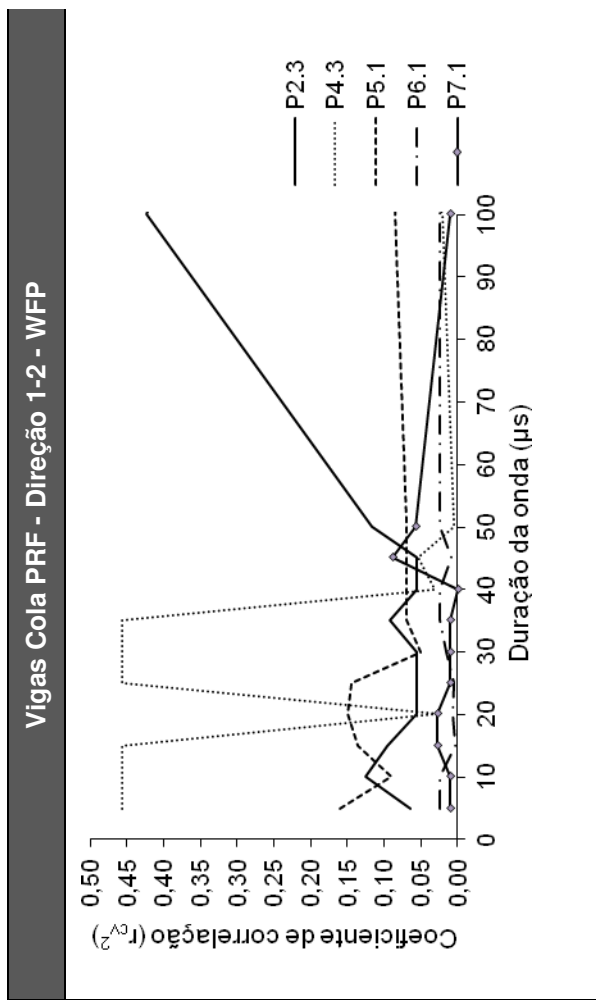
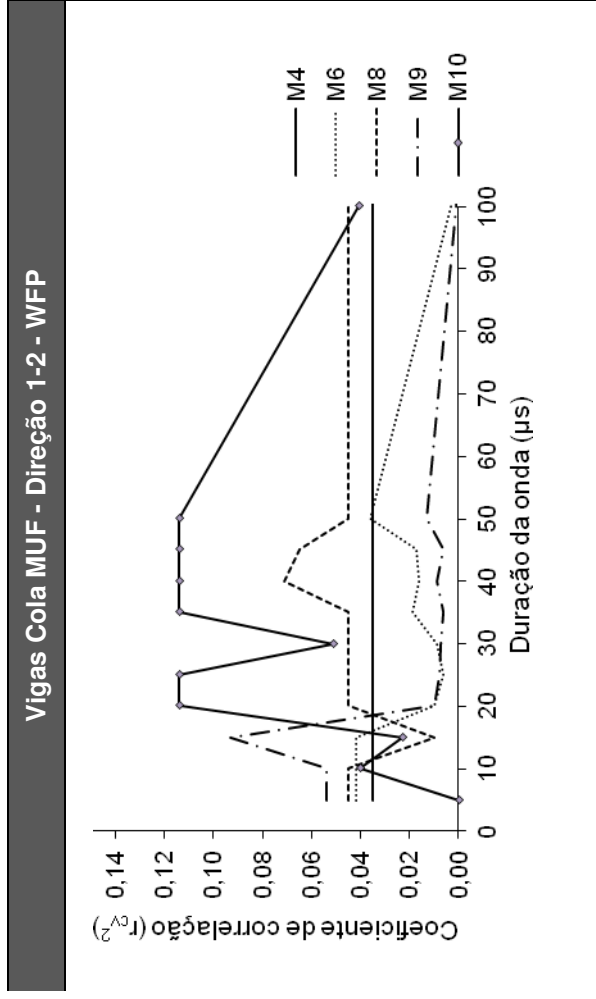
Vigas Cola MUF - Direção Média - WFP



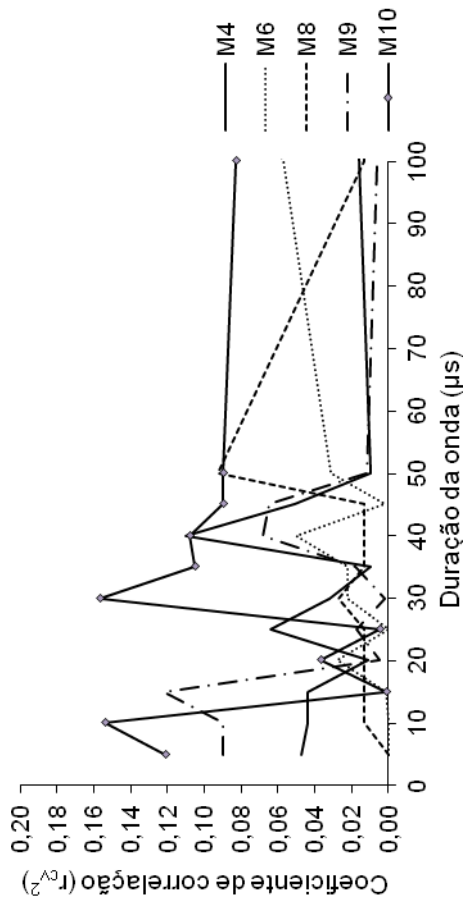
Vigas Cola PRF - Direção Média - WFP



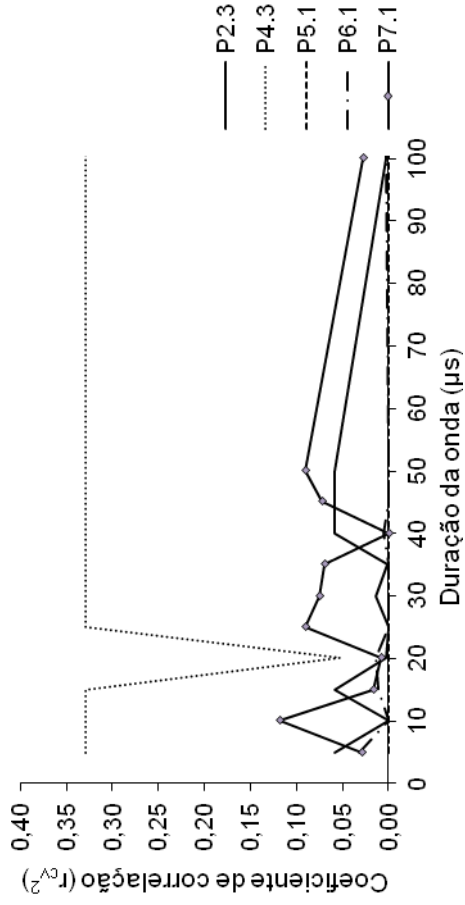
Calibração utilizando a velocidade e a onda no domínio da frequência
WFP – Percentagem de rotura pela madeira



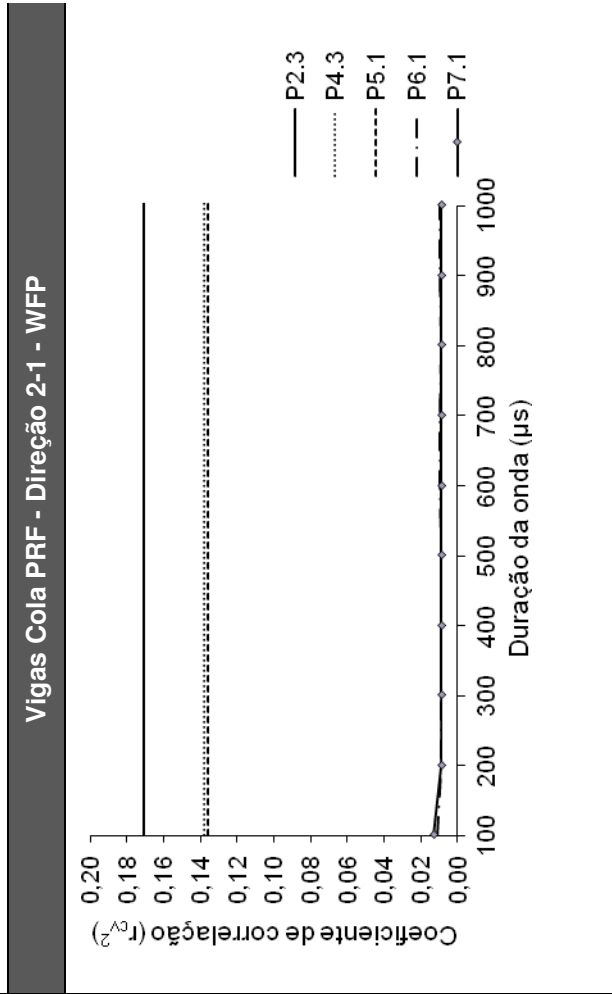
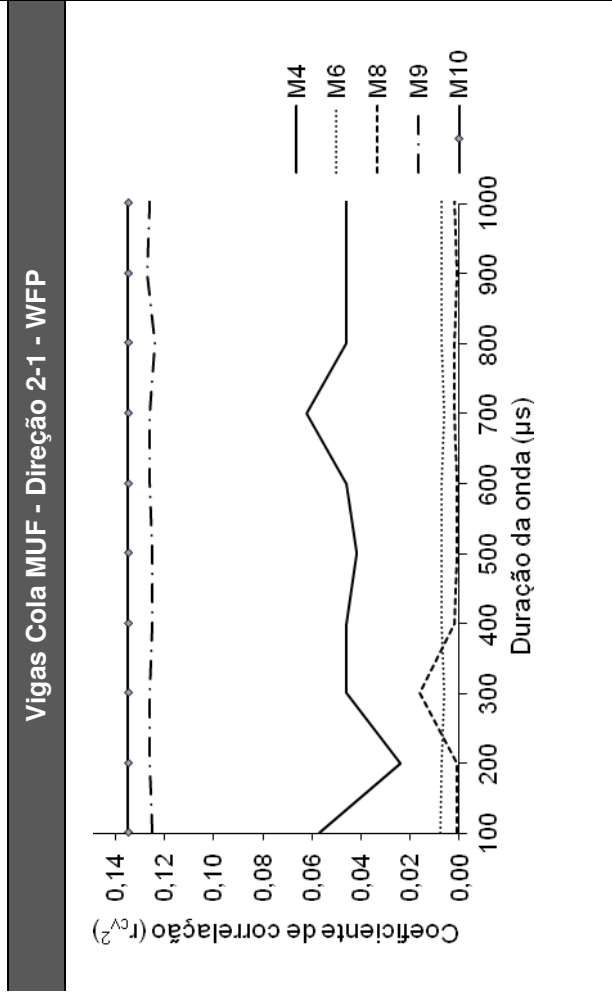
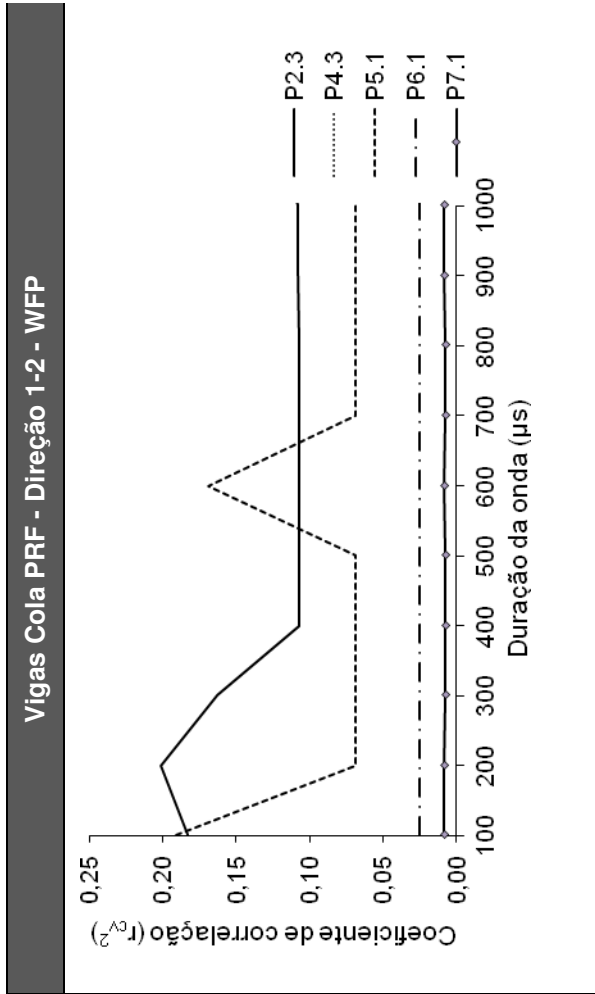
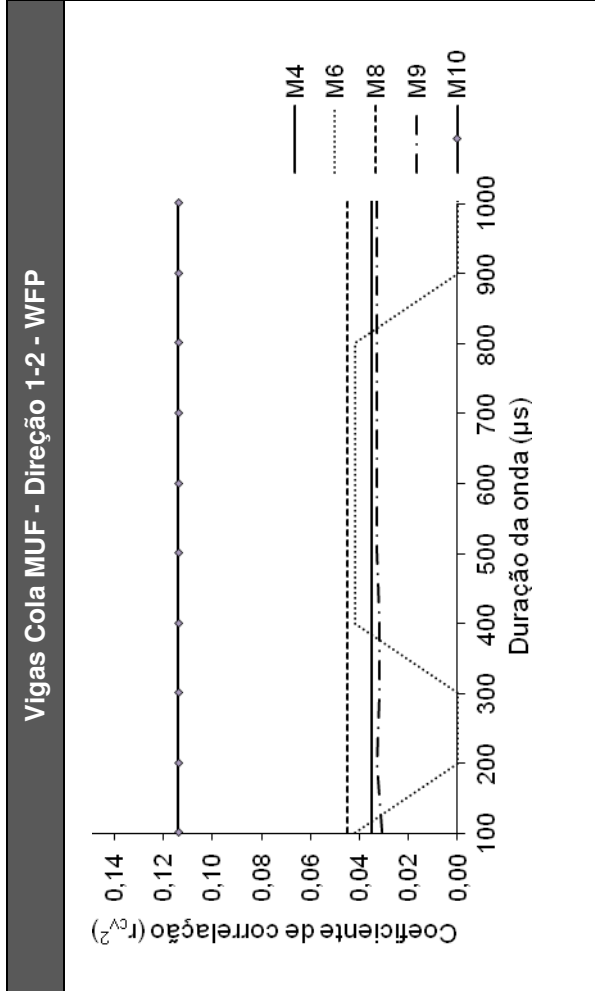
Vigas Cola MUF - Direção Média - WFP



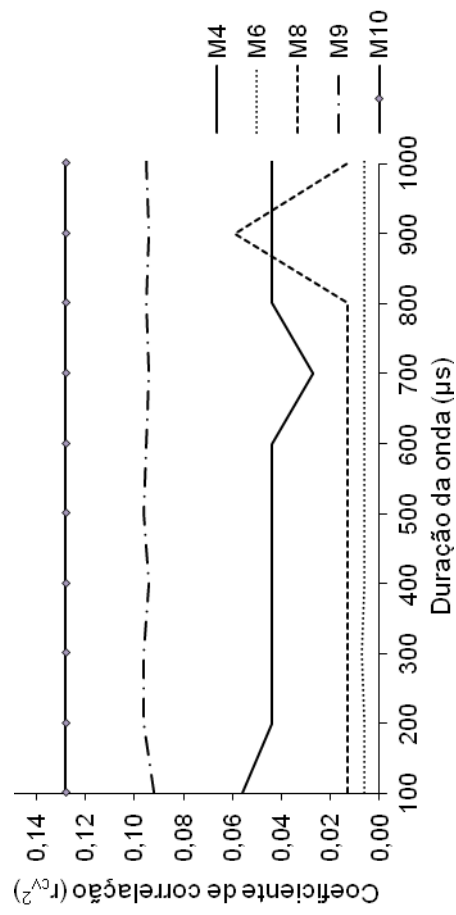
Vigas Cola PRF - Direção Média - WFP



Calibração utilizando a velocidade e os parâmetros ultra-sónicos
WFP – Percentagem de rotura pela madeira



Vigas Cola MUF - Direção Média - WFP



Vigas Cola PRF - Direção Média - WFP

