

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS

ESTRUTURAS HÍBRIDAS DE POLIAMIDA 6-MADEIRA (*EUCALYPTUS*
GRANDIS) SOBREMOLDADAS POR INJEÇÃO

Giovana Zanetini Zanchetta

São Carlos-SP
2026

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS

**ESTRUTURAS HÍBRIDAS DE POLIAMIDA 6-MADEIRA (*EUCALYPTUS*
GRANDIS) SOBREMOLDADAS POR INJEÇÃO**

Giovana Zanetini Zanchetta

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Ciência e
Engenharia de Materiais como requisito
parcial à obtenção do título de MESTRA EM
CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

Orientador: Dr. Leonardo Bresciani Canto

São Carlos-SP
2026

VITAE

Bacharel em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal do ABC
(2017).

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Giovana Zanetini Zanchetta, realizada em 24/04/2026.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Leonardo Bresciani Canto (UFSCar)

Profa. Dra. Sílvia Helena Prado Bettini (UFSCar)

Prof. Dr. Antonio José Felix de Carvalho (USP)

O Relatório de Defesa produzido pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se registrado no sistema direcionado para o PPGCEM Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à Suzano S.A. pelo fornecimento das amostras de madeira, necessárias à condução deste estudo, sem as quais não seria possível desenvolver as etapas experimentais propostas.

Registra-se, igualmente, o suporte do LCE – Laboratório de Caracterização Estrutural, responsável pela execução das análises estruturais e pelo acompanhamento técnico do profissional Igor Silva, cuja atuação contribuiu para a obtenção de dados consistentes.

Da mesma forma, reconhece-se o apoio do CCDM – Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais, tanto na moldagem por injeção das juntas quanto na assistência fornecida pelos técnicos Rafael Gouveia Lazarini e Victor Almeida, fundamentais para o adequado cumprimento dos procedimentos laboratoriais envolvidos.

Registra-se, também, a colaboração do profissional Fernando Passareli na condução e registros dos Ensaios Mecânicos realizadas no Departamento de Engenharia de Materiais (DEMA).

Agradece-se à Universidade Tecnológica de Graz (TU Graz), na Áustria, pelo suporte institucional disponibilizado durante a realização das análises de microtomografia, bem como pelas contribuições técnicas do Dr. Gean Marcatto, que auxiliou na interpretação dos resultados e no aprimoramento metodológico.

De maneira equivalente, reconhece-se o apoio do grupo de trabalho do Prof. Dr. Rodrigo Bresciani Canto, Professor Associado do Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar, composto também pelo Igor Paganotto Zago e Matheus Furlan, que suportaram a montagem e realização dos testes de Correlação de Imagem Digital.

Registra-se, ainda, a colaboração de Breno Calixto na produção das imagens profissionais das amostras, utilizadas para documentação e apresentação dos resultados.

Por fim, agradece-se a todos os profissionais e instituições que prestaram apoio técnico, administrativo ou científico relevante ao desenvolvimento desta pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

Estruturas híbridas polímero-madeira (PWH) representam uma alternativa promissora para aplicações estruturais sustentáveis. Este estudo introduz o desenvolvimento de juntas híbridas de poliamida 6 (PA6) e *Eucalyptus grandis* produzidas por sobremoldagem por injeção, sem o uso de adesivos ou tratamentos químicos. Duas geometrias do tipo *scarf*, com chanfros simples e duplo a 45°, foram projetadas e avaliadas quanto ao desempenho mecânico e aos mecanismos de adesão interfacial. A resistência ao cisalhamento foi determinada por ensaios mecânico *quasi* estático, enquanto a interface foi caracterizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microtomografia por raios X (μ CT). As análises microestruturais revelaram uma interface bem definida, com penetração da PA6 em vasos da madeira e a formação de protrusões poliméricas ($\sim 50\text{ }\mu\text{m}$), que promovem o intertravamento mecânico. Os ensaios mecânicos apresentaram boa repetibilidade, com as juntas híbridas atingindo valores de resistência ao cisalhamento de até $8,1 \pm 0,6\text{ MPa}$, comparáveis aos reportados na literatura para juntas híbridas polímero–madeira do tipo sobreposição. As análises complementares por correlação de imagem digital (DIC) indicaram acoplamento mecânico eficiente, com distribuição de deformações mais homogênea na geometria de chanfro simples, sugerindo uma transferência de tensões mais eficiente sob carregamento mecânico.

Palavras-chave: adesão direta; junta híbrida; sobremoldagem por injeção; madeira.

ABSTRACT

INJECTION OVERMOLDED POLYAMIDE 6–EUCALYPTUS HYBRID JOINTS

Polymer–wood hybrid (PWH) structures represent a promising alternative for sustainable structural applications. This study introduces the development of hybrid joints composed of polyamide 6 (PA6) and *Eucalyptus grandis* wood produced by injection overmolding, without the use of adhesives or chemical surface treatments. Two scarf joint geometries with single and double chamfers at 45° were designed and evaluated in terms of mechanical performance and interfacial adhesion mechanisms. Shear strength was determined through quasi-static mechanical tests, while the interface was characterized by scanning electron microscopy (SEM) and X-ray microtomography (μ CT). Microstructural analyses revealed a well-defined interface, with PA6 penetrating wood vessels and forming polymer protrusions ($\sim 50\text{ }\mu\text{m}$) that promote mechanical interlocking. Mechanical tests showed good repeatability, with hybrid joints reaching shear strength values of up to $8.1 \pm 0.6\text{ MPa}$, comparable to those reported in the literature for polymer–wood hybrid lap joints. Complementary digital image correlation (DIC) analyses indicated efficient mechanical coupling between the components, with a more homogeneous strain distribution for the single-chamfer configuration, suggesting more effective stress transfer under mechanical loading.

Keywords: direct adhesion; hybrid joint; injection overmolding; wood.

PUBLICAÇÕES

ZANCHETTA, G.Z.; OLIVEIRA, G.H.M; AMANCIO-FILHO, S.T.; CANTO, L.B. Polymer-Wood Hybrid Structures. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS. Anais do 18º Congresso Brasileiro de Polímeros. Campos do Jordão/SP. Outubro, 2025.

ZANCHETTA, G.Z.; OLIVEIRA, G.H.M; FURLAN, M.; SCIUTI, V.F; CANTO, R.B.; AMANCIO-FILHO, S.T.; CANTO, L.B. Injection Overmolded Polyamide 6-Eucalyptus Hybrid Joints. Polímeros: Ciência e Tecnologia, 2026. ACEITO

ÍNDICE DE ASSUNTOS

	Pág.
FOLHA DE APROVAÇÕES.....	i
AGRADECIMENTOS.....	ii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT.....	v
PUBLICAÇÕES.....	vi
ÍNDICE DE ASSUNTOS.....	vii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	5
2.1 Estrutura, Morfologia e Propriedades da Madeira	5
2.2 Sobremoldagem por Injeção	11
2.3 Teorias de Adesão e Mecanismos de Falha	14
2.4 Estruturas Híbridas Polímero-Madeira (PWH)	20
2.5 Correlação de Imagem Digital (DIC).....	23
3 MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1 Materiais	25
3.2 Preparação dos substratos de madeira	25
3.3 Geometria das juntas polímero-madeira.....	26
3.4 Preparação das juntas polímero-madeira	27
3.5 Ensaio mecânico das juntas polímero-madeira.....	27
3.6 Microtomografia por raios X.....	28
3.7 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	28
3.8 Correlação de imagens digital das juntas polímero-madeira	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1 Interface das juntas híbridas polímero-madeira	34
4.2 Resistência mecânica das juntas híbridas polímero-madeira	38
4.3 Mecanismos de falha das juntas híbridas polímero-madeira	44
4.4 Correlação de Imagem Digital (DIC).....	47
5 CONCLUSÕES	53
6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	55
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

1 INTRODUÇÃO

A crescente incorporação de critérios ambientais na indústria e academia tem impulsionado o uso de materiais renováveis e tecnologias de menor impacto ambiental em aplicações estruturais e de engenharia [1]. Nesse contexto, a madeira, um dos recursos naturais mais utilizados historicamente, passou a ocupar, estrategicamente, uma posição de destaque na engenharia e na ciência, por ser uma matéria-prima renovável, de ampla disponibilidade e relevante na conservação ambiental, na economia global e no desenvolvimento social [1]. Durante seu ciclo de vida, a madeira atua como reserva natural de carbono, contribuindo para a redução da pegada ambiental de processos produtivos e produtos derivados. No Brasil, estima-se que aproximadamente 9 milhões de hectares de plantios de eucalipto, pinus e demais espécies, armazenem cerca de 1,88 bilhão de toneladas de dióxido de carbono equivalente [2]. Além disso, o manejo florestal sustentável contribui para a conservação da biodiversidade, regula os ciclos hídricos e promove o equilíbrio climático. A madeira também possui elevado impacto socioeconômico, sendo amplamente empregada em setores como construção civil, mobiliário, papel e celulose. Do ponto de vista tecnológico, os avanços recentes abriram novas possibilidades para o uso da madeira em aplicações estruturais de alta performance, ampliando seu papel como alternativa a utilização de materiais e recursos não renováveis, na geração de energia por meio de biomassa, ou até mesmo como materiais de design sofisticado, mostrando seu potencial como material estratégico para um futuro mais sustentável [2-5].

Compósitos poliméricos com madeira também ganham cada vez mais espaço no mercado, mostrando-se como uma solução versátil para atender à crescente demanda por materiais renováveis, aplicados a diferentes setores industriais, como o automotivo, bens de consumo e construção civil [3]. Estudos recentes exploram as propriedades mecânicas e interações microestruturais em compósitos polímero-madeira (WPC) convencionais, nos quais fibras ou partículas lignocelulósicas são incorporadas a matrizes poliméricas. Esses materiais já são amplamente utilizados na fabricação de painéis, perfis extrudados e componentes injetados [6]. Diferentemente dos compósitos convencionais, as estruturas híbridas de polímero-madeira (PWH) empregam

madeira *in natura* como substrato, preservando a integridade física e estrutural de ambos os materiais, promovendo a substituição parcial do polímero, mantendo as propriedades ortotrópicas e estéticas da madeira. Para viabilizar uma interface fortemente aderida, estudos recentes têm explorado o uso de adesivos e agentes de acoplamento mais sustentáveis, buscando melhorar a interação entre a madeira e o polímero por meio de aditivos químicos de menor impacto ambiental [3-6].

Para que a utilização de estruturas híbridas de polímero e madeira (PWH) se consolide, é fundamental garantir o aprimoramento das técnicas de processamento e de fabricação, de modo a assegurar, simultaneamente, a integridade estrutural da madeira, a robustez da interface e a viabilidade produtiva em escala industrial. Nesse contexto, a utilização do processamento via sobremoldagem por injeção de estruturas híbridas de polímero-madeira (PWH) surge como uma alternativa que permite a manutenção da integridade estrutural e estética da madeira, no processo de hibridização com polímeros, com eficiência e sustentabilidade.

Na técnica de sobremoldagem por injeção, já aplicada comumente na indústria para moldagem de estruturas híbridas de polímero-polímero e polímero-metal, um polímero é injetado sobre um substrato previamente preparado, permitindo a obtenção de peças com geometrias complexas em uma única etapa, com alta replicabilidade e versatilidade [3]. No caso das estruturas híbridas polímero-madeira, a sobremoldagem por injeção com adesão direta apresenta potencial significativo, uma vez que se apoia diretamente na estrutura porosa da madeira para viabilizar a formação de uma interface coesa, dispensando o uso de agentes de acoplamento, adesivos químicos ou modificações relevantes na superfície do substrato.

A microestrutura complexa e porosa da madeira consiste em um arranjo tridimensional e hierárquico de células compostas por múltiplas paredes celulares, de diferentes espessuras e composição química, que envolvem a cavidade interna formada pelo lúmen, traqueoides ou vasos, responsáveis pelo transporte de água e nutrientes em toda extensão da árvore. [3-6]. A interação físico-química entre essa estrutura e o polímero é determinante para a qualidade da adesão na interface e, conseqüentemente, para viabilizar o desempenho

mecânico das juntas híbridas em condições exigentes, como aquelas enfrentadas no setor automotivo ou na construção civil [3,5].

Um estudo recente demonstrou a viabilidade da produção de juntas híbridas polímero-madeira mecanicamente robustas por moldagem por injeção com adesão direta. Stadlmann *et al.* [3] avaliaram a resistência ao cisalhamento em sobreposição de juntas à base de polipropileno (PP) e poliamida 6 (PA6) com madeiras de bétula (*Betula pendula*) e faia (*Fagus sylvatica*). Análises por MEV mostraram que a adesão é governada pela penetração do polímero em vasos e fibras superficiais da madeira (~100-200 µm). As juntas de PA6 apresentaram resistência ao cisalhamento significativamente maior que as de PP (~6 MPa vs. ~2 MPa), sem efeito significativo da espécie de madeira, o que foi atribuído à maior polaridade da PA6.

Apesar dos avanços recentes, ainda existem lacunas importantes na compreensão do desempenho mecânico, mecanismos de adesão e modos de falhas em estruturas híbridas polímero-madeira produzidas por sobremoldagem por injeção.

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver estruturas híbridas polímero-madeira produzidas por sobremoldagem por injeção com adesão direta, contribuindo, de maneira inovadora, para o avanço científico e tecnológico no desenvolvimento de estruturas híbridas polímero-madeira, fornecendo subsídios para aplicações futuras em diversos setores industriais, com menor impacto ambiental. A poliamida 6 (PA6) foi selecionada em função de sua ampla empregabilidade como matriz de compósitos poliméricos e em aplicações industriais e de engenharia,, permitindo avaliar a viabilidade da tecnologia proposta em uma condição relevante para aplicações industriais. Como substrato, utilizou-se madeira do tipo folhosa de fibra curta da espécie *Eucalyptus grandis*, produzida em abundância no Brasil em função do clima e solos favoráveis, utilizada principalmente na produção de papel e celulose, destacando-se por apresentar uma configuração estrutural favorável à infiltração do polímero, em razão de sua elevada porosidade, e baixa densidade relativa. Duas novas geometrias de juntas tipo *scarf*, com chanfro simples e duplo, foram projetadas e avaliadas. O comportamento deformacional das juntas foi investigado por meio de ensaios mecânicos acoplados à correlação digital de

imagens (DIC), enquanto os mecanismos de união foram analisados por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microtomografia por raios X (μ CT).

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Estrutura, Morfologia e Propriedades da Madeira

A madeira natural é um material compósito de origem biológica, cuja estrutura celular apresenta característica anisotrópica, complexa e altamente porosa, responsável pela execução de funções estruturais e de condução. A organização estrutural da madeira pode ser descrita em três níveis principais: microestrutura, mesoestrutura e macroestrutura [7]. A compreensão desses níveis estruturais é essencial para a análise das propriedades físico-químicas e mecânicas da madeira, as quais fundamentam sua relevância e atratividade para aplicações estruturais [7-9].

O primeiro nível estrutural da madeira, a microestrutura, refere-se aos constituintes físicos e químicos da parede celular, na escala micrométrica. A parede celular (Figura 2.1) consiste em duas regiões principais, rearranjadas de maneira hierárquica: a parede celular primária ou também chamada de lamela média, com espessura entre 0,2 μm e 1,0 μm , seguida da parede celular secundária, composta por três camadas sobrepostas (S1, S2 e S3), com espessura total variando entre 1,3 μm e 5,4 μm , que envolvem o espaço vazio no centro da célula, denominado de lúmen [5-10]. A microestrutura constituinte da parede celular rígida da madeira é um compósito semicristalino natural composto por microfibrilas de celulose envoltas em uma matriz de hemicelulose e lignina, intimamente associadas por ligações intermoleculares de hidrogênio.

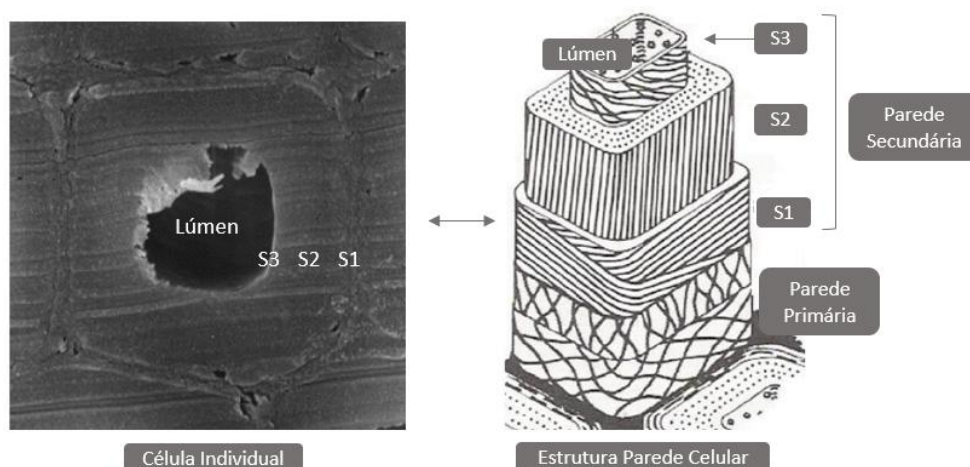
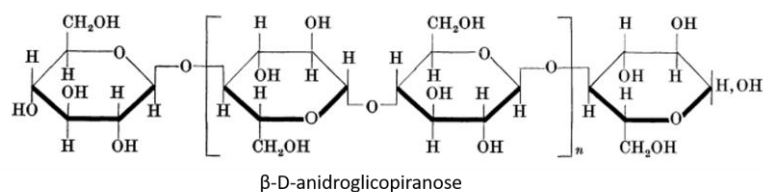
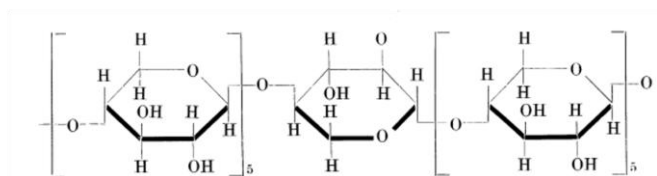


Figura 2.1: Estrutura da parede celular da madeira. Organizada pela autora e adaptada de Pedrazzi et al [9].

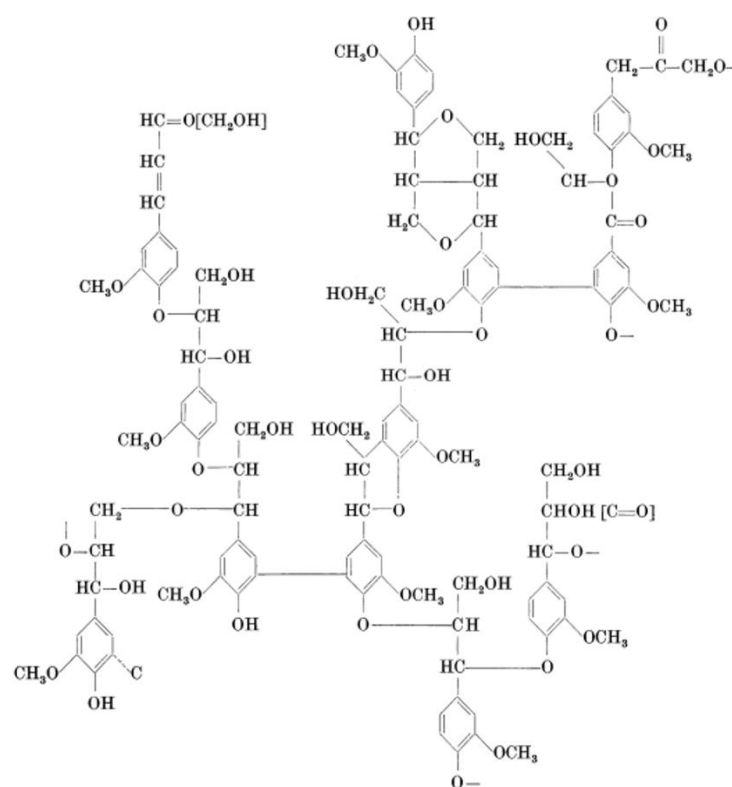
Os principais constituintes químicos da parede celular da madeira são: celulose, hemicelulose e lignina, cujas estruturas químicas estão ilustradas na Figura 2.2. A celulose ($C_6H_{10}O_5$)_n é o principal componente da parede celular e consiste em um homopolímero semicristalino de cadeia linear, formado por unidades repetitivas de β-D-glicose, unidas por ligações covalentes glicosídicas β 1-4 [10-12]. Esse polímero apresenta elevada rigidez molecular e organiza-se em microfibrilas com dimensões variando entre 3 e 10 nm de diâmetro, dependendo da espécie, que constituem a principal fase estrutural da parede celular [5,7]. A hemicelulose é composta de cadeias menores, altamente ramificadas e amorfas, constituídas de diversos monômeros. Esse grupo pode ser classificado, de forma simplificada, em xilanas e mananas, cujas proporções variam entre madeiras de coníferas e folhosas. Para a espécie *Eucalyptus grandis*, uma madeira folhosa, essa proporção pode representar 95% xilana e 5% mananas. A lignina, por sua vez, é um composto aromático formado por uma estrutura tridimensional complexa e amorfa, com grupos funcionais metílicos (OCH₃), hidroxílicos (OH) e fenólicos. Esse composto atua como matriz ligante entre as células e os polissacarídeos estruturais, contribuindo para a resistência mecânica, a resistência ao impacto, a hidrofobicidade e a resistência ao ataque biológico por fungos e microrganismos [9-12].



Celulose



Hemicelulose



Grupos Funcionais e Interligações de Lignina

Figura 2.2: Macromoléculas de celulose, hemicelulose e um sumário de grupos funcionais e interligações da lignina. Organizado pela autora e adaptado de Kollmann & Côté (1968), e Adler (1977) [8, 11].

O transporte de água e nutrientes na madeira ocorre predominantemente por mecanismos físico-químicos associados à adesão entre as moléculas de

água e as superfícies internas da parede celular, especificamente e principalmente no lúmen, bem como por forças capilares e gradientes de potencial hídrico. No nível da parede celular secundária, a camada S3, localizada na região mais interna da célula, apresenta menor teor de lignina em comparação às camadas S1 e S2, o que favorece a interação com a água e contribui para os processos de condução [9, 13].

Além dos polímeros estruturais, a madeira contém compostos de baixa massa molar conhecidos como extrativos, constituintes orgânicos que não integram a estrutura da parede celular, mas exercem influência significativa sobre as propriedades físico-químicas do material [7]. Esses componentes estão presentes em diferentes proporções em toda estrutura da árvore, e são responsáveis por características específicas de cada espécie, como cor, odor e folhagem, sendo relevantes para a identificação de espécies, aplicabilidade e trabalhabilidade da madeira [7,9]. Os extrativos correspondem a um conjunto heterogêneo de compostos orgânicos de baixa massa molar, incluindo fenóis, terpenos, ácidos graxos, ceras, resinas, taninos e flavonoides, cuja composição e concentração variam conforme a espécie, idade e região anatômica da madeira [8,9]. Em espécies do gênero *Eucalyptus*, esses compostos representam cerca de 2% a 5% da composição, e apresentam caráter predominantemente hidrofóbico e apolar, o que pode afetar mecanismos de adesão e compatibilidade interfacial com outros compostos polares como as poliamidas, podendo comprometer a molhabilidade e a adesão interfacial em sistemas híbridos de madeira-polímero [7].

A mesoestrutura, segundo nível estrutural da madeira, compreende os principais elementos anatômicos celulares, incluindo vasos, traqueídeos e fibras, predominantemente orientados na direção longitudinal, sendo os vasos e os traqueídeos responsáveis pelo transporte de água e nutrientes ao longo de toda extensão da árvore [5,13]. A distribuição, geometria e proporção desses elementos influenciam diretamente as propriedades físicas e mecânicas da madeira, bem como sua classificação em coníferas (*softwood*) e folhosas (*hardwood*). As madeiras classificadas como coníferas apresentam uma estrutura celular relativamente simples, sendo constituídas predominantemente por traqueídeos longitudinais de elevado comprimento em relação ao diâmetro

transversal (razões de 40x a 250x), o que resulta em densidade relativamente baixa entre 300 e 700 kg/m³ e maior facilidade de processamento [5,13]. As madeiras *folhosas* apresentam uma estrutura anatômica mais complexa, caracterizada pela presença de diferentes elementos vasculares, com elevada variabilidade no diâmetro do lúmen (valores típicos entre 50 a 300 µm) e na espessura da parede celular. Esses fatores contribuem para densidades geralmente mais elevadas, com valores típicos entre 500 e 1.000 kg/m³, e maior resistência mecânica em comparação às coníferas [5–13].

O *Eucalyptus grandis*, objeto de estudo deste trabalho, é uma espécie pertencente ao grupo das folhosas (*hardwood*), caracterizada por fibras curtas, com comprimento típico entre 0,8 e 1,2 mm, e vasos de diâmetro médio na faixa de 80 a 200 µm, distribuídos de forma anisotrópica no lenho da madeira [7]. Madeiras utilizadas em estudos anteriores como *Betula pendula* (bétula), *Fagus sylvatica* (faia) e *Quercus robur* (carvalho europeu) também são classificadas como folhosas, de fibra curta variando entre 0,8 mm e 1,8 mm, diferindo-se no diâmetro médio dos vasos, onde o carvalho, especificamente, pode apresentar vasos com diâmetros até 300 µm [3,14].

O ângulo fibrilar (*microfibril angle*, MFA), definido como o ângulo entre a orientação das microfibrilas de celulose e o eixo longitudinal da célula, constitui um importante parâmetro estrutural da madeira. Para o *Eucalyptus grandis*, valores típicos de MFA foram medidos por Lima *et al.* entre 29° e 19°, com redução significativa desse valor da madeira juvenil para a madeira adulta [15]. Essas características contribuem para suas propriedades mecânicas e para sua ampla aplicação em produtos estruturais, componentes ferroviários e na indústria de papel e celulose. A densidade básica do *Eucalyptus grandis* situa-se tipicamente entre 450 e 600 kg/m³ [18]. A densidade básica é um parâmetro intrinsecamente relacionado a disponibilidade de vasos para ancoragem física do polímero em estruturas hibridizadas. Para a bétula e a faia utilizadas por Staldmann *et al.* (2021), a densidade básica teórica situa-se tipicamente entre 540 e 650 kg/m³, e, 680 e 750 kg/m³, respectivamente [3]. O carvalho europeu, utilizado por Oliveira *et al.* (2026), apesar do maior diâmetro dos vasos, é uma folhosa tipicamente mais densa, com valores típicos entre 650 e 770 kg/m³ [17]. Tanto a densidade básica, quanto o diâmetro do lúmen, associado a espessura

da parede celular, são características que se diferenciam nas folhosas de acordo com a fisiologia evolutiva de cada uma das espécies.

Os aspectos macroscópicos da madeira referem-se à organização dos elementos ao longo da seção transversal do tronco, incluindo a distribuição da casca, floema, alburno, cerne e medula, os quais desempenham funções fisiológicas e estruturais essenciais para o desenvolvimento e sobrevivência da árvore, conforme ilustrado na Figura 2.3. Esses componentes apresentam variações significativas em densidade e composição química ao longo do raio do tronco, influenciando diretamente o perfil radial de densidade da madeira [19]. A casca e o floema (casca interna) atuam principalmente na proteção biológica contra agentes externos, apresentando densidade típica inferior a 300 kg/m^3 . O alburno e o cerne constituem o lenho, sendo o alburno caracterizado por maior teor de umidade, menor densidade básica (350 a 650 kg/m^3) e maior suscetibilidade ao ataque de fungos e insetos, enquanto o cerne apresenta maior densidade (entre 450 e 900 kg/m^3) e maior durabilidade, sendo a parte mais utilizada para aplicações estruturais. A medula localiza-se na região central do tronco, apresenta baixa densidade e resistência mecânica, e possui maior proporção de parênquima e canais vasculares primários [13,18-20].

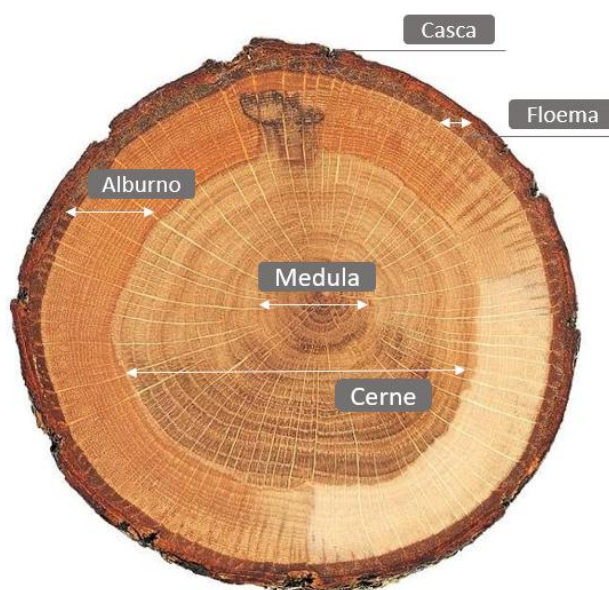


Figura 2.3: Seção transversal do tronco da árvore, com os constituintes macroscópicos de um disco de madeira. Organizado pela autora e adaptado de GettyImages.com [21].

A combinação de fibras curtas com paredes celulares relativamente espessas e densidade moderada confere ao *Eucalyptus grandis* elevada rigidez específica, tornando-o adequado para aplicações estruturais, como reforço em compósitos madeira-polímero ou substrato em estruturas híbridas com polímeros [12].

A Tabela 2.1, adaptada de Klock et al. [7], apresenta a composição química típica de madeiras de coníferas, folhosas e especificamente do *Eucalyptus grandis*. A Tabela 2.2 apresenta propriedades mecânicas médias reportadas para madeira de *Eucalyptus grandis* de alta densidade (814 kg/m³), conforme dados publicados por Lobão et al. [18].

Tabela 2.1: Composição química típica das classes de madeira Conífera e Folhosa, e da espécie *Eucalyptus grandis* [7]

Componente	Coníferas	Folhosas	<i>Eucalyptus grandis</i>
Celulose (%)	40-45	40-45	50,2
Mananas (%)	20	5	1,4
Xilanas (%)	10	20-30	19,6
Lignina (%)	25-30	20-25	26,7
Extrativos (%)	4-10	1-4	2,1

Tabela 2.2: Propriedades de interesse do *Eucalyptus grandis*, considerando teor de umidade de 12%. [18]

Propriedade Mecânica	Valores típicos
Compressão paralela às fibras	62,4 MPa
Resistência à tração paralela às fibras	93,6 MPa
Resistência ao cisalhamento	12,2 MPa
Módulo de elasticidade longitudinal	19.479 MPa

2.2 Sobremoldagem por Injeção

A moldagem por injeção é um processo de manufatura eficiente, versátil e de baixo custo, amplamente utilizado na indústria polimérica para produção de

peças simples ou complexas em grande escala [22]. A sobremoldagem por injeção (*injection overmolding*), técnica empregada neste estudo, é utilizada na fabricação de componentes híbridos, permitindo a combinação de materiais distintos, como polímeros, metais, cerâmicas e madeira como substrato, possibilitando a integração de propriedades complementares em um único componente.

Na sobremoldagem por injeção, o substrato é previamente posicionado na cavidade do molde e recoberto pelo polímero fundido. A união entre o substrato e o polímero ocorre por meio de mecanismos de ancoragem mecânica (*form-fit*) e/ou por adesão físico-química [22-26]. Esse método de fabricação de estruturas híbridas é amplamente utilizado na indústria para juntas polímero–polímero e polímero–metal, particularmente em aplicações automotivas, eletrônicas e de bens de consumo, nas quais a combinação de materiais com diferentes propriedades físicas e funcionais proporciona competitividade em desempenho, redução de peso e custo de produção [6,23].

O desempenho da junta fabricada por sobremoldagem por injeção depende de diversos fatores, incluindo a compatibilidade química entre os materiais, a topografia e energia superficial do substrato, bem como as condições de processamento, como temperatura do polímero fundido, velocidade e pressão de injeção, influenciando diretamente os mecanismos de adesão e a qualidade da interface polímero-substrato [1,26-28].

O preenchimento da cavidade do molde constitui uma etapa crítica no processo de injeção, sendo caracterizado por um fluxo transiente e não isotérmico. Inicialmente, o polímero fundido apresenta um fluxo radial, formando uma frente de fluxo circular, que evolui e se altera para um padrão bidimensional devido aos gradientes de velocidade e às elevadas tensões de cisalhamento impostas pelas paredes da cavidade. Esse comportamento resulta na deformação da frente de fluxo em direção às paredes do molde, conforme observado na Figura 2.4 em uma geometria simples [26,29].

Durante o preenchimento, o polímero fundido apresenta o fenômeno conhecido como fluxo fonte (*fountain flow*), no qual o material ao centro é transportado em direção às paredes da cavidade, e ao entrar em contato com as superfícies frias do molde, sofre resfriamento rápido, formando uma camada

solidificada superficial, denominada camada congelada (*frozen layer*) [22]. A camada logo após a camada congelada seguirá o processo de solidificação exposto a altas taxas de cisalhamento e alta orientação molecular. O núcleo, por outro lado, sem a exposição as altas taxas de cisalhamento, e mais distante das paredes da cavidade, é resfriado lentamente, permitindo o rearranjo necessário das moléculas, sem a criação de tensões residuais [22,29]. A espessura da camada congelada é influenciada pelas condições de processamento, sendo reduzida com o aumento da temperatura do fundido e do molde, bem como com o aumento da pressão e do tempo de recalque [29]. A taxa de resfriamento imposta durante a moldagem por injeção desempenha um papel fundamental no desenvolvimento da microestrutura da PA6, influenciando a orientação molecular, as propriedades mecânicas e o grau de cristalinidade. Como consequência dos gradientes térmicos presentes ao longo da espessura da peça, diferentes condições de cristalização são estabelecidas, sendo esperada uma menor cristalinidade nas regiões próximas à camada congelada em comparação com o núcleo [24,27]. O processo se torna ainda mais complexo quando se tem a presença de um substrato no molde. Nesse caso, a orientação das cadeias poliméricas na peça moldada deverá ser ainda menos uniforme. O substrato cria obstáculos adicionais ao fluxo, uma vez que sua superfície irá simular uma parede da cavidade do molde. No caso prático proposto neste estudo, a presença de chanfros com inclinação simples e dupla de 45°, muda o fluxo do polímero de forma significativa. No substrato com chanfro simples, o fluxo mudará de direção podendo promover gradientes locais de cisalhamento, e diferentes espessuras de camada congelada. No substrato de chanfro duplo, por sua vez, o fluxo é dividido e redirecionado, resultando em padrões de escoamento mais complexos, com possível concentração das tensões residuais, influenciando a qualidade da interface e a resistência mecânica da junta. Dependendo da temperatura do substrato, pode-se formar uma camada congelada espessa e altamente orientada na interface polímero–substrato, comprometendo como consequência, os mecanismos de adesão e resultando em uma interface com elevada concentração de tensões residuais [22,26-29].

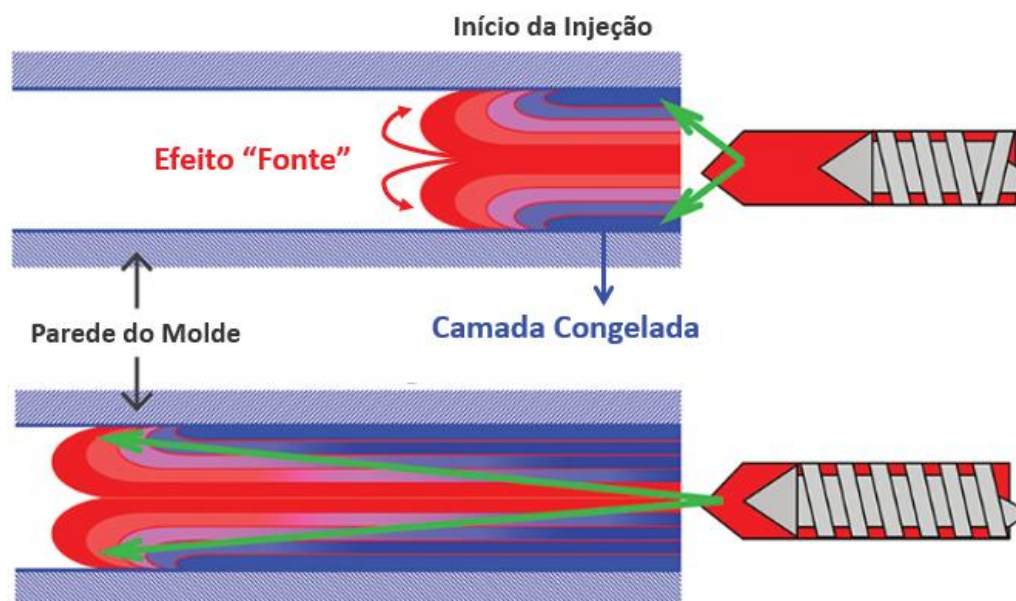


Figura 2.4: Representação esquemática do Efeito Fonte no padrão de fluxo durante o preenchimento da cavidade de um molde retangular. Organizada pela autora e adaptado de *“Understanding Fountain Flow in Injection Molding – Plastics technology”* [23].

Além do controle e acompanhamento dos parâmetros de processamento, a compatibilidade interfacial entre a madeira e o polímero também constitui fator determinante para qualidade e desempenho das juntas. Por isso, no capítulo seguinte serão discutidos os principais mecanismos de adesão e de falha que podem ocorrer em sistemas sobremoldados.

2.3 Teorias de Adesão e Mecanismos de Falha

A adesão entre madeira e adesivos ou matrizes poliméricas desempenha papel fundamental na fabricação de produtos de engenharia, como compensados, painéis reconstituídos e laminados [31]. A compreensão dos mecanismos de adesão é, portanto, essencial para otimizar o desempenho mecânico e a durabilidade de juntas híbridas polímero–madeira produzidas tanto por processos adesivos convencionais quanto por sobremoldagem por injeção.

Existem diversas teorias propostas para descrever o fenômeno de adesão, incluindo: (i) travamento mecânico (*mechanical interlocking*), (ii) teoria eletrônica ou eletrostática, (iii) teoria de adsorção, (iv) teoria da difusão, (v)

formação de ligações covalentes e (vi) teoria da camada fraca (*weak boundary layer*). Essas teorias frequentemente coexistem em uma mesma interface adesiva, dependendo das propriedades e condições de processamento do substrato e do adesivo [31-33]. Neste trabalho, serão explorados principalmente as teorias de travamento mecânico, adsorção e da camada fraca, considerando sua relevância para sistemas híbridos polímero–madeira.

A teoria do travamento mecânico (*mechanical interlocking*) sugere que a adesão ocorre devido à capacidade de preenchimento, ou da molhabilidade do polímero fundido ou adesivo em poros, rugosidades e irregularidades da superfície do substrato, promovendo uma ancoragem física da fase polimérica, conforme ilustrado na Figura 2.5 [34]. No caso do substrato de madeira, cuja estrutura celular é porosa, composta por fibras e lúmens com diâmetros típicos da ordem de dezenas de micrômetros ($\approx 10\text{--}100\ \mu\text{m}$, dependendo da espécie), o polímero pode infiltrar-se nas cavidades celulares, formando estruturas intertravadas na interface [34,35].

Esse mecanismo depende fortemente da viscosidade do polímero fundido, das condições de processamento, como pressão e temperatura de injeção, e da capacidade de molhamento da superfície da madeira como consequência da energia superficial de ambos os materiais [31].

De acordo com a revisão apresentada por Frihart et al. [33] uma adequada molhabilidade é condição fundamental para uma interface aderente, uma vez que permite o estabelecimento de contato íntimo entre as superfícies e favorece os fenômenos de adesão [31-33]. No caso da madeira, a presença de grupos hidroxila confere elevada energia superficial e caráter polar à superfície celular. Dessa forma, polímeros de maior polaridade, como a PA6 com a presença de grupos amida, tendem a apresentar maior afinidade com substratos lignocelulósicos, favorecendo o espalhamento do fundido e sua infiltração em vasos, lúmens e demais cavidades anatômicas, via ação capilar, potencializando o intertravamento mecânico [31]. O travamento mecânico ocorre predominantemente em escalas micro e nanométricas, sendo considerado um dos principais mecanismos de contribuição para a resistência ao cisalhamento em interfaces polímero–madeira [13,31].

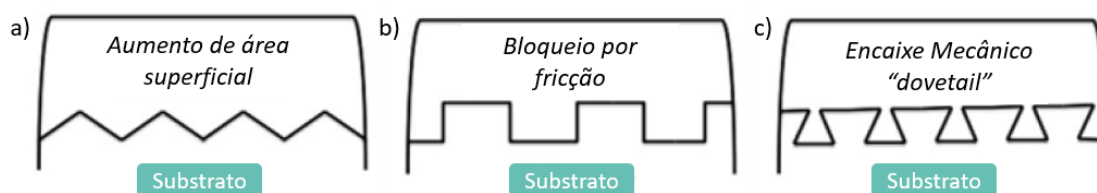


Figura 2.5: Representação esquemática da teoria do travamento mecânico (*mechanical interlocking*) através dos mecanismos de a) do aumento da área de interface; b) do bloqueio por fricção e c) do encaixe mecânico (*dovetail*). Adaptado pela autora, retirado de Gardner et al [31].

A teoria da adsorção, também denominada adesão termodinâmica, descreve a adesão como resultado da formação de interações intermoleculares entre o adesivo ou polímero e o substrato. Essas interações podem ser primárias, como ligações covalentes, ou secundárias, como ligações de hidrogênio e de van der Waals, envolvendo os constituintes químicos do adesivo e da madeira, incluindo celulose, hemicelulose, lignina e extrativos presentes [31-35]. A tensão superficial do substrato e do polímero são parâmetros fundamentais para a formação da interface adesiva, sendo a tensão interfacial e o ângulo de contato indicadores termodinâmicos da molhabilidade e da qualidade da adesão. Segundo Gardner et al. [31], em sistemas madeira-polímero, tais interações físico-químicas podem ser favorecidas pela presença de grupos funcionais polares em ambas as fases, contribuindo para a resistência e qualidade da interface.

Esses fenômenos ocorrem em escala molecular, tipicamente na ordem de 1 a 10 nm [31-35]. Na madeira, os grupos hidroxila ($-OH$) presentes na celulose e hemicelulose atuam como sítios ativos para a formação de ligações de hidrogênio com adesivos e polímeros polares. No caso da poliamida 6 (PA6), interações intermoleculares podem ocorrer, principalmente, pelos grupos amida ($-CONH-$) ao longo da cadeia polimérica, favorecendo a adesão a superfícies hidrofílicas [3,33]. Essawy et al. observaram que a presença de grupos polares, como $-NH_2$ e $-NH_3^+$ em sistemas adesivos, promovem de maneira positiva a adesão em substratos lignocelulósicos [36].

A teoria da camada fraca (*weak boundary layer*, WBL) propõe que a adesão pode ser comprometida pela presença de uma camada interfacial

mecânica ou quimicamente inadequada entre o adesivo e o substrato [31]. Bikerman, que introduziu esse conceito, descreveu diferentes origens para camadas fracas, incluindo bolhas de ar, impurezas superficiais e produtos das reações da superfície do substrato com o ambiente [32]. Em madeira, essa camada pode ser constituída por extrativos naturais, os quais incluem compostos hidrofóbicos e hidrofílicos que migram e alteram a molhabilidade da superfície. Adicionalmente, camadas fracas podem ser formadas por danos mecânicos decorrentes de corte e/ou lixamento, degradação superficial induzida por intempéries como a deslignificação, ou pela presença de partículas contaminantes ou bolhas de ar, conforme ilustrado na Figura 2.6. Essas camadas, tipicamente com espessuras na ordem de dezenas de nanômetros (10–100 nm), reduzem a molhabilidade e prejudicam a formação de uma interface adesiva eficiente, impactando negativamente a resistência mecânica da junta [31-33].

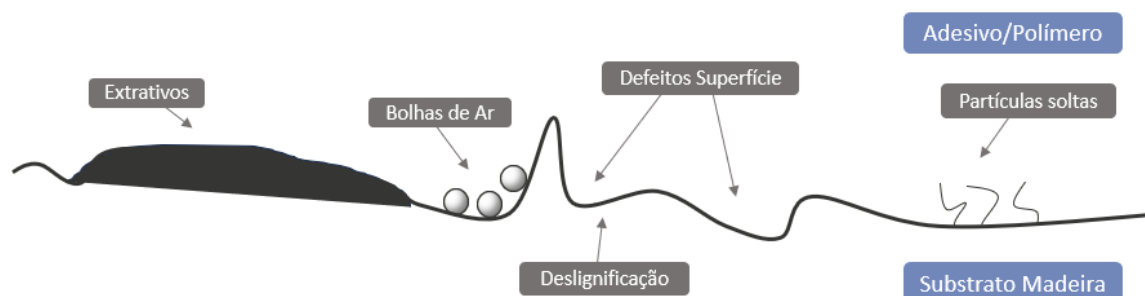


Figura 2.6: Representação esquemática para as interferências presentes na madeira, suportando a teoria da camada fraca. Revisado e adaptado pela autoria, retirada de Gardner et al. [3,31,37].

A identificação do tipo ou mecanismo de falha em juntas de polímero-madeira obtidas por sobremoldagem por injeção é essencial para compreender a eficiência do processo de adesão e a integridade estrutural do sistema. Diferenciar entre falhas adesivas e coesivas permite diagnosticar se os problemas estão relacionados à interface ou às propriedades intrínsecas dos materiais envolvidos [38]. No caso de falhas adesivas, é possível identificar, suportadas pelas teorias de adesão, as limitações na compatibilidade química,

no preparo inadequado da superfície da madeira ou insuficiência no fluxo do polímero fundido para penetração e ancoragem. Já as falhas coesivas indicam que a adesão foi eficaz, mas a resistência interna do material foi superada, o que pode exigir ajustes na formulação do polímero, no design da interface ou nas condições do processo de injeção. Portanto, essa análise não apenas direciona melhorias no processo de sobremoldagem, mas também garante melhor desempenho e durabilidade das juntas, aspectos críticos em aplicações industriais e estruturais [36-38].

Considerando que a teoria de adesão e os mecanismos de falha são complementares e irão suportar uma análise detalhada da adesão das juntas, abaixo segue na Tabela 2.3 a correlação entre a teoria de adesão e os mecanismos de falha predominante [38].

Tabela 2.3: Principais mecanismos de falha e a escala de atuação para as Teorias de Adesão do Travamento mecânico, adsorção e camada fraca.

Teoria de Adesão	Mecanismo de Falha	Escala de atuação
<i>Travamento Mecânico</i>	Coesiva (madeira ou adesivo) ou adesiva (interface física)	Micrométrica (10-100 μm)
<i>Adsorção (ou interações químicas)</i>	Coesiva (adesivo ou madeira), mas também adesiva em casos de degradação química	Molecular (1-10 nm)
<i>Camada Fraca</i>	Coesiva (camada fraca)	Nanométrica (10-100 nm)

A continuidade de pesquisas nessa área é necessária para compreender e otimizar o travamento mecânico em estruturas híbridas polímero–madeira, explorando a natureza porosa da madeira como vantagem funcional. Um parâmetro útil para avaliar o potencial de preenchimento do polímero na estrutura celular, e conseqüentemente, melhorar o travamento mecânico de estruturas híbridas de polímero-madeira é o índice de Runkel (relação entre a espessura da parede celular “E” e o diâmetro do lúmen “D”), descrito pela Equação 1 [39]. Esse índice é utilizado na indústria para medir a colapsabilidade celular, e fornece informações relevantes sobre a densidade aparente da madeira, a presença de poros e o potencial de travamento mecânico na interface.

$$\text{índice de Runkel} = \frac{(2 \times E)}{D} \quad (1)$$

A espessura da parede celular e o diâmetro do lúmen variam entre espécies como resposta adaptativa ao ambiente, possuindo características diferentes, como apresentado na Figura 2.7. Valores elevados do índice de Runkel ($\geq 1,0$) são tipicamente associados a madeiras de maior densidade, caracterizadas por paredes celulares espessas e lúmens reduzidos, frequentemente observadas em espécies ou regiões sujeitas a condições mais restritivas, nas quais há maior demanda por resistência mecânica e controle da condução hídrica. Em contraste, valores reduzidos do índice de Runkel ($\leq 1,0$) são característicos de madeiras com paredes celulares mais finas, lúmens maiores, o que favorece a condução de água e nutrientes, mas pode resultar em menor densidade e resistência mecânica [29,39].

O índice de Runkel da espécie *Eucalyptus grandis* varia entre 0,6 e 0,9, dependendo das condições climáticas em que a espécie é cultivada, bem como os nutrientes disponíveis no solo. Além disso, estudos indicam que pode haver diferenças no Índice de Runkel no sentido radial (medula-casca), e no sentido longitudinal (base-topo) da árvore, com menores valores de densidade e índice de Runkel frequentemente observados em regiões juvenis próximas à medula e em posições intermediárias do tronco (DAP – diâmetro altura do peito) [28, ,39].

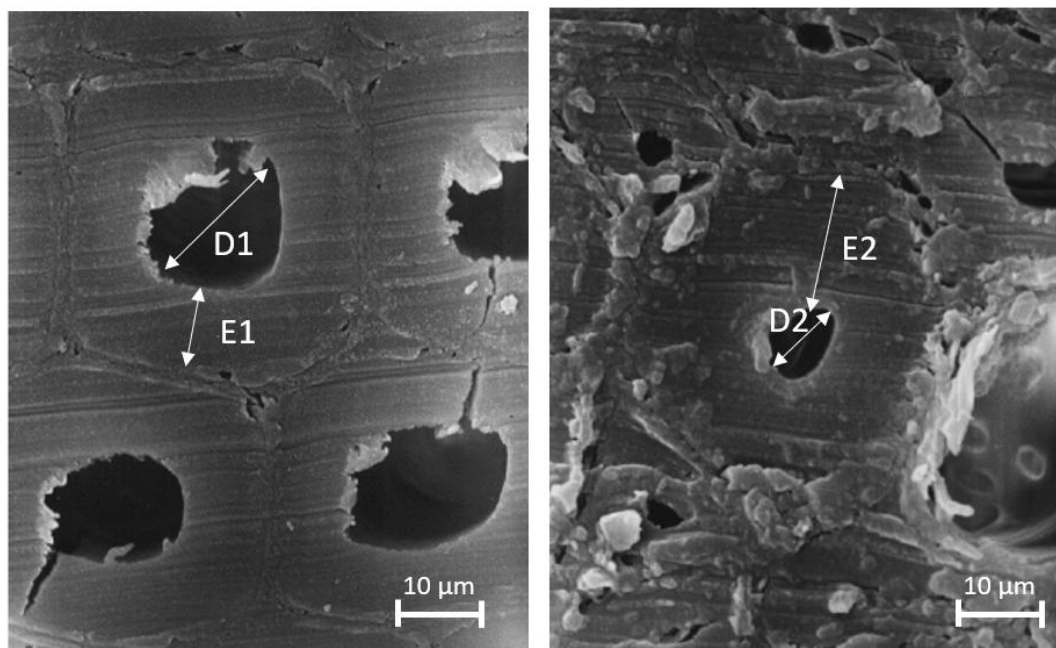


Figura 2.7: Variação morfológica entre duas espécies de *Eucalypto*, sendo a da esquerda uma espécie com menor densidade (*E. grandis*), e menor índice de Runkel, e a da direita, com maior densidade (*E. urophylla*), e maior índice de Runkel. Adaptada pela autora, com referência a material de uso interno de terceira parte, não disponível.

2.4 Estruturas Híbridas Polímero-Madeira (PWH)

O desenvolvimento de estruturas híbridas de polímero-madeira tem atraído crescente interesse devido à demanda por materiais leves, resistentes e com menor impacto ambiental. A madeira é um material ortotrópico, com elevada resistência mecânica, baixa densidade e propriedades estéticas atrativas, tornando-se um candidato relevante para aplicações estruturais e semi-estruturais, particularmente na indústria automotiva e de construção civil [1,3]. Além de ser abundante e renovável, a madeira apresenta baixa pegada de carbono em comparação a metais e polímeros sintéticos, o que a torna especialmente atrativa para compósitos híbridos sustentáveis. Entretanto, a madeira tem limitações intrínsecas, como sensibilidade à umidade e baixa resistência térmica, que podem ser suavizadas pela combinação com polímeros, resultando em estruturas inovadoras e multifuncionais [4,29-31].

Diferentemente das estruturas híbridas madeira-polímero, os compósitos poliméricos convencionais com madeira (WPCs) são formados pela incorporação de partículas, fibras descontínuas ou fibras contínuas em uma matriz polimérica [13,28]. Neste caso, a madeira encontra-se dispersa na forma de partículas ou fibras, o que desfavorece o processamento, limitando os parâmetros de processamento, como a temperatura de injeção, e consequentemente a escolha do polímero, além de limitar o aproveitamento integral das propriedades mecânicas do substrato lignocelulósico [13]. Em contraste, as estruturas híbridas, como citado anteriormente, permitem a preservação a integridade anatômica e estrutural da madeira, e mantem a versatilidade de processamento e a versatilidade na escolha do polímero. A combinação de madeira e polímeros em estruturas híbridas permite integrar as qualidades mais desejáveis de ambos os materiais, resultando em peças com propriedades ajustáveis para atender diferentes setores, como o automotivo, onde podem ser empregadas em componentes estruturais e internos [1,3]. Contudo, o desempenho dessas estruturas depende fortemente da adesão interfacial entre o polímero e a madeira, a qual é influenciada pela qualidade da interface, propriedades físico-químicas dos materiais e parâmetros de processamento, particularmente em processos de sobremoldagem por injeção [22,23].

Apesar do crescente interesse por soluções híbridas madeira-polímero, poucos estudos têm investigado sistemas baseados em adesão direta entre os substratos. A maior parte dos trabalhos reportados na literatura utiliza adesivos estruturais, agentes compatibilizantes ou modificações superficiais para promover a união interfacial, enquanto abordagens fundamentadas exclusivamente na interação física entre o polímero fundido e a estrutura porosa da madeira permanecem pouco exploradas. Dentre os estudos atualmente disponíveis, Stadlmann *et al.* [3] estudaram a sobremoldagem de estruturas híbridas de polímero (poliamida 6 e polipropileno) e madeira, utilizando espécies nativas de árvores diferentes das avaliadas neste trabalho, como a *Betula pendula* (bétula) e a *Fagus sylvatica* (faia). Os resultados indicaram que amostras sobremoldadas com PA6 apresentaram resistência ao cisalhamento significativamente superior às obtidas com PP. Valores médios de resistência ao

cisalhamento de $5,71 \pm 1,13$ MPa para bétula e $6,36 \pm 1,47$ MPa para faia foram reportados, com valores máximos atingindo 8,5 MPa e 9,74 MPa, respectivamente. Comparativamente, as juntas sobremoldadas com PP apresentaram valores máximos inferiores, da ordem de 2,98 MPa (bétula) e 4,19 MPa (faia). Por meio de análises complementares de microscopia eletrônica de varredura (SEM) e espectroscopia eletrônica de raios-X (XPS), os autores observaram que a penetração do polímero nos vasos da madeira resultou em uma interfase estável, com profundidade entre 100 e 200 μm . Além disso, os autores atribuíram o desempenho superior das juntas com PA6 à presença de interações químicas secundárias, principalmente ligações de hidrogênio entre os grupos amida da poliamida e os grupos hidroxila da madeira, evidenciando a contribuição simultânea de mecanismos físicos e químicos para a adesão interfacial. Com objetivo de investigar a profundidade da penetração do polímero na madeira na estrutura híbrida, Stadlmann *et al.* propuseram a avaliação de imagem por espectroscopia eletrônica de raios-X (XPS). A varredura linear foi realizada em quatro pontos de análise percorrendo uma seção transversal da interface polímero-madeira, conforme Figura 2.8. Com base nas informações fornecidas pelo XPS, foi possível derivar a evolução da composição elementar (carbono, nitrogênio e oxigênio) em cada um dos pontos, levando em consideração as razões atômicas de O/C e N/C para a poliamida 6. O resultado apresentou uma significativa redução da razão O/C, e um aumento na razão N/C na direção substrato-polímero, fornecendo informações sobre a profundidade de penetração do polímero na estrutura porosa da madeira, e dando suporte as teorias de travamento mecânico e químico durante o processo de fabricação das juntas, via sobremoldagem por injeção [3].

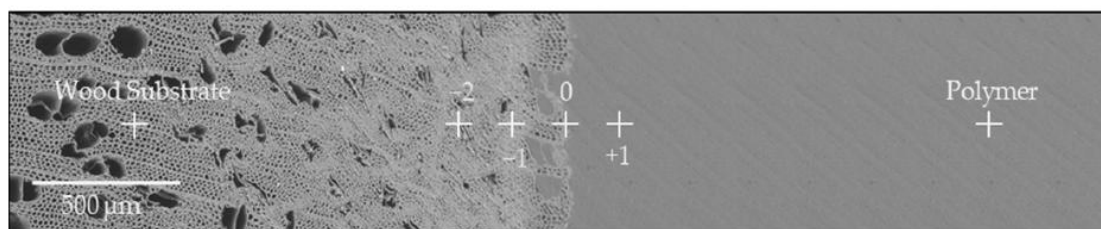


Figura 2.8.: Resultado de micrografia da análise de espectroscopia de raios-x, de amostras sobremoldadas por Staldman et al., utilizada para determinar a composição de carbono, oxigênio e nitrogênio presentes em 4 pontos da interface [3].

De forma complementar aos estudos reportados na literatura, o presente trabalho propõe uma investigação sistemática da sobremoldagem por injeção em juntas híbridas de poliamida 6 (PA6) e *Eucalyptus grandis*, uma espécie tropical de rápido crescimento e elevada produtividade, cuja aplicação em estruturas híbridas polímero–madeira permanece pouco explorada em comparação com espécies temperadas, como *Betula pendula* e *Fagus sylvatica*. Diferente de estudos anteriores, esta pesquisa aprofunda na influência da seleção da madeira sobre a qualidade da interface, considerando parâmetros morfológicos fundamentais, como densidade aparente por meio do índice de Runkel como métrica relevante na arquitetura celular e no potencial de preenchimento do polímero fundido. Adicionalmente, o presente estudo introduz a geometria de substrato “scarf joint” para análise da interface polímero–madeira, baseada em chanfros simples e duplo com ângulo de 45°, permitindo avaliar os efeitos da geometria na transferência de carga e nos mecanismos de intertravamento mecânico. Essa abordagem explora e usa como vantagem, a estrutura porosa intrínseca da madeira como estratégia para ancoragem física, reduzindo a dependência de tratamentos químicos ou modificações superficiais.

2.5 Correlação de Imagem Digital (DIC)

A correlação de imagem digital (Digital Image Correlation - DIC) é uma técnica experimental não destrutiva de medição ótica, que captura e analisa imagens digitais, com objetivo de monitorar e medir movimentos ou deslocamentos de materiais, incluindo informações sobre os mecanismos de

deformação e falha que ocorrem ao serem submetidos a ensaios mecânicos [40]. Essa técnica é amplamente empregada na caracterização de polímeros e compósitos por permitir a medição de campos completos de deformação durante ensaios mecânicos. No caso específico de uma estrutura hibridizada, o DIC pode fornecer informações relevantes sobre a qualidade da adesão na interface e sobre como a anisotropia da estrutura influenciam o comportamento mecânico.

A preparação da amostra é fundamental para a qualidade das medições. Usualmente, o corpo de prova recebe um padrão aleatório de alto contraste na superfície, obtido por meio da deposição de tinta spray de alto contraste sobre uma camada base uniforme e clara (*speckle pattern*). Esse padrão cria uma textura óptica única que se deforma com o material durante o ensaio [40].

O deslocamento de cada região é determinado por funções de correlação baseadas na intensidade dos pixels, e os gradientes espaciais desses deslocamentos permitem calcular as deformações longitudinal, transversal e cisalhante no corpo de prova [41].

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

O polímero utilizado foi a poliamida 6 (PA6), contratipo Ultramid® C 200, fornecido pela empresa BASF S.A., de viscosidade média e densidade de 1,14 g/cm³ (ISO 1183), indicado para moldagem por injeção [42]. Antes do processamento, os grânulos do polímero foram secos em estufa a vácuo a 60 °C por 12 horas. A poliamida (PA6) é um termoplástico semicristalino, largamente utilizado em compósitos para aplicações de engenharia, substituindo total ou parcialmente metais em componentes de alto desempenho [43].

A amostra de madeira é de eucalipto, da espécie *Eucalyptus grandis*, fornecida pela empresa Suzano S.A. no formato de tábuas com dimensões aproximadas de 500 mm de comprimento, 200 mm de largura e 30 mm de espessura, cortadas no sentido longitudinal (base-topo) ao crescimento da árvore, na altura DAP (Diâmetro à Altura do Peito, ou cerca de 1,3 m), com objetivo de coletar o material com a menor densidade, e consequentemente, com a maior concentração de vasos de transporte que facilitasse a infiltração do polímero na superfície da madeira.

3.2 Preparação dos substratos de madeira

As tábuas de madeira *in natura* foram inicialmente secas ao ar, sem exposição direta ao sol, em local seco e ventilado, por 70 dias. Essa etapa de secagem inicial ao ar livre foi necessária para evitar o empenamento da madeira. Ao final desse período, as tábuas apresentaram uma perda média de massa de aproximadamente 38%. Em seguida, as tábuas foram submetidas a secagem em estufa com circulação de ar a 50°C por 36 horas, elevando a perda média de massa para cerca de 45%.

Após a etapa de secagem, as tábuas foram cortadas em serra circular na forma de barras com 91 mm de comprimento, 12,7 mm de largura e 3,2 mm de espessura, considerando a anisotropia e a morfologia da madeira, mantendo a orientação no sentido longitudinal das fibras. Em seguida, chanfros foram produzidos em uma das extremidades das barras utilizando serra circular, nas

configurações de chanfro simples (reto) e chanfro duplo (em V), ambos com ângulos de 45° , conforme mostrado na fotografia da Figura 3.2.

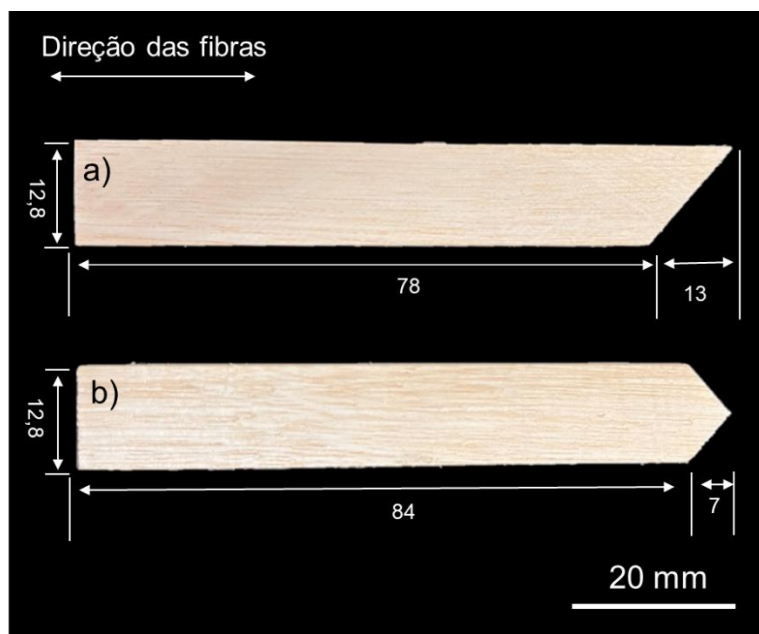


Figura 3.2: Fotografia e dimensões dos substratos de madeira (visão topo): (a) chanfro simples de 45° e (b) chanfro duplo de 45° . Produzida pela autora. Dimensões dadas em milímetros.

3.3 Geometria das juntas polímero-madeira

Juntas híbridas com configuração tipo *scarf*, com chanfros simples e duplo, foram empregadas, conforme mostrado na fotografia da Figura 3.3. A geometria e as dimensões dos corpos de prova foram adaptadas da norma ASTM D638 Tipo I, originalmente utilizada para ensaio de tração de polímeros. Isso permite o uso de cavidades padrão de moldagem por injeção comumente disponíveis em laboratórios de pesquisa e desenvolvimento. Os chanfros de 45° impõem um carregamento combinado de tração e cisalhamento na interface quando as juntas são submetidas à tração uniaxial.



Figura 3.3: Junta híbrida polímero-madeira com geometria tipo “*scarf joint*” com chanfro simples (acima) e chanfro duplo (abaixo), adaptada da norma ASTM D638 tipo I. A espessura da junta é de 3,2 mm.

3.4 Preparação das juntas polímero-madeira

O processamento das juntas via sobremoldagem por injeção foi realizada em uma máquina injetora Battenfeld PLUS 35/75 com rosca de 25 mm de diâmetro. As amostras foram injetadas com o perfil de temperatura do cilindro em 220°C, 230°C e 240°C. A velocidade de injeção foi de 21 cm³/s a uma pressão de injeção de 187 bar e com tempo de injeção de 4 s. A pressão e o tempo de empacotamento foram de 160 bar e 9 s, respectivamente. O tempo de resfriamento foi de 40 s e a temperatura do molde de 30°C.

3.5 Ensaio mecânico das juntas polímero-madeira

A resistência mecânica das juntas foi determinada por meio de ensaio mecânico estático monotônico com carregamento uniaxial de tração nas extremidades do corpo de provas. Os ensaios foram realizados em equipamento Instron 5569, equipado com célula de carga de 50 kN, com procedimento adaptado da norma ASTM D638 tipo I, com separação entre garras de 115 mm e velocidade de travessa de 1 mm/min.

Os corpos de prova foram condicionados em dessecador por pelo menos 48 h antes dos ensaios. Os ensaios mecânicos foram realizados em sala climatizada com temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa de 50 ± 5%. Para

obtenção estatística de valores médios e desvios padrão, foram produzidas e ensaiadas pelo menos cinco réplicas de cada configuração de junta.

3.6 Microtomografia por raios X

A microtomografia computadorizada (μ CT) foi realizada utilizando um sistema Werth TomoScope XS 160. A amostra foi seccionada aproximadamente 5 mm da interface e fixada em suportes de espuma de poliestireno. Os parâmetros de aquisição incluíram tensão do tubo de 80 kV, corrente de 360 μ A e tempo de exposição de 1/3 s. Foi utilizado um ângulo de passo de rotação de $0,15^\circ$, com tamanho de voxel de 8,7 μ m. Adicionalmente, foi empregado um filtro de alumínio de 0,5 mm para reduzir artefatos de endurecimento do feixe (beam hardening). As imagens bidimensionais (2D) obtidas por microtomografia computadorizada (μ CT) foram processadas utilizando o software Dragonfly, permitindo a geração de reconstruções volumétricas tridimensionais (3D).

3.7 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A interface das juntas híbridas polímero-madeira foi investigada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando um equipamento INSPECT S50 operado em alto vácuo, com distância de trabalho de 10 mm, voltagem de aceleração de 5 kV e detector de elétrons secundários (SE). As juntas foram seccionadas transversalmente a uma distância de 5 mm da interface, conforme ilustrado esquematicamente na Figura 3.4, embutidas a frio em resina epóxi com tempo de cura de 24 h e lixadas sequencialmente com lixas P120, P240, P600 e P1200 até atingir a meia espessura, e polidas com tecido de feltro sintético. Em seguida, as amostras foram recobertas com ouro, aterradas com tinta prata e analisadas.

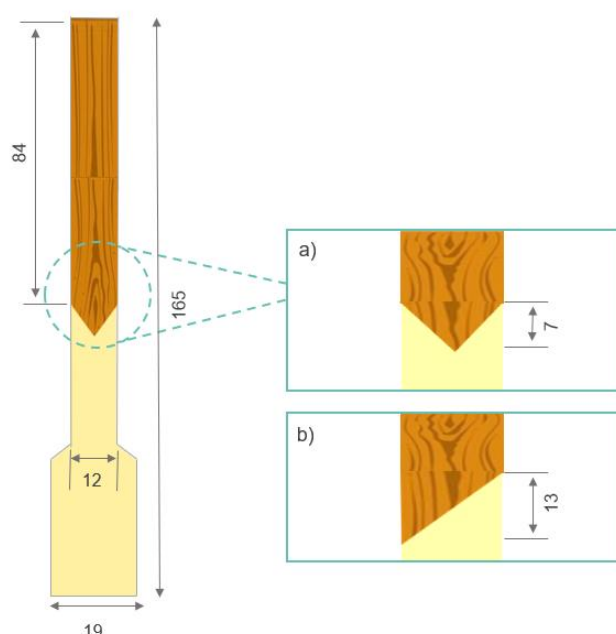


Figura 3.4: Representação esquemática do corte das juntas híbridas polímero-madeira para posterior avaliação por MEV: (a) chanfro duplo e (b) chanfro simples. Dimensões dadas em milímetros.

As superfícies de fratura das juntas híbridas polímero-madeira submetidas ao ensaio mecânico de cisalhamento, bem como a superfície do substrato de madeira *in natura*, foram igualmente investigadas por MEV, utilizando-se o mesmo equipamento e as mesmas condições operacionais descritas anteriormente. As amostras foram seccionadas e fixadas com cola em porta amostra (*stub*) de alumínio, recobertas com ouro, aterradas com tinta prata e, em seguida, analisadas.

3.8 Correlação de imagens digital das juntas polímero-madeira

Correlação de imagens digital (DIC) foi acoplada ao ensaio mecânico para avaliar o comportamento de deformação das juntas híbridas polímero-madeira. Inicialmente, as juntas foram condicionadas em dessecador por pelo menos 48 h antes dos ensaios. Posteriormente, foram pintadas com spray de tinta branca e, em seguida, borrifadas com spray de tinta preta para gerar um padrão aleatório de pontos (*speckle pattern*), permitindo o rastreamento do deslocamento de diferentes pontos de contraste ao longo do ensaio.

Os ensaios mecânicos foram realizados em equipamento MTS Systems Corporation Exceed E44.304, equipado com célula de carga de 30 kN, garras de fixação por aperto mecânico e juntas universais. As condições do ensaio foram semelhantes às empregadas no ensaio convencional de cisalhamento, com separação entre garras de 115 mm e velocidade de travessa de 1 mm/min. Os ensaios mecânicos foram realizados em sala climatizada com temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa de $50 \pm 5\%$.

Os parâmetros do sistema DIC estão apresentados na Tabela 3.8. Duas câmeras CCD (charge-coupled device), foram posicionadas lateralmente, voltadas para ambas as faces da junta, a uma distância de 750 mm, e utilizadas para a captura das imagens durante o ensaio. Quatro sistemas de iluminação com lâmpadas LED brancas foram empregados para garantir iluminação homogênea da região de interesse. A Figura 3.5 apresenta uma ilustração esquemática da disposição das câmeras e dos sistemas de iluminação.

Tabela 3.8: Parâmetros do sistema de Correlação de Imagem Digital (DIC).

Câmeras	Canon EOS 5DS
Lentes	Canon EF 180 mm f/3.5L Macro USM
Amplitude de níveis de cinza	14 bits
Filtro de Cor	Bayer
Abertura	f/7,1
Distância de trabalho (stand-off)	750 mm
Velocidade do obturador	1/30s
ISO	100
Resolução	2920 × 4363 px

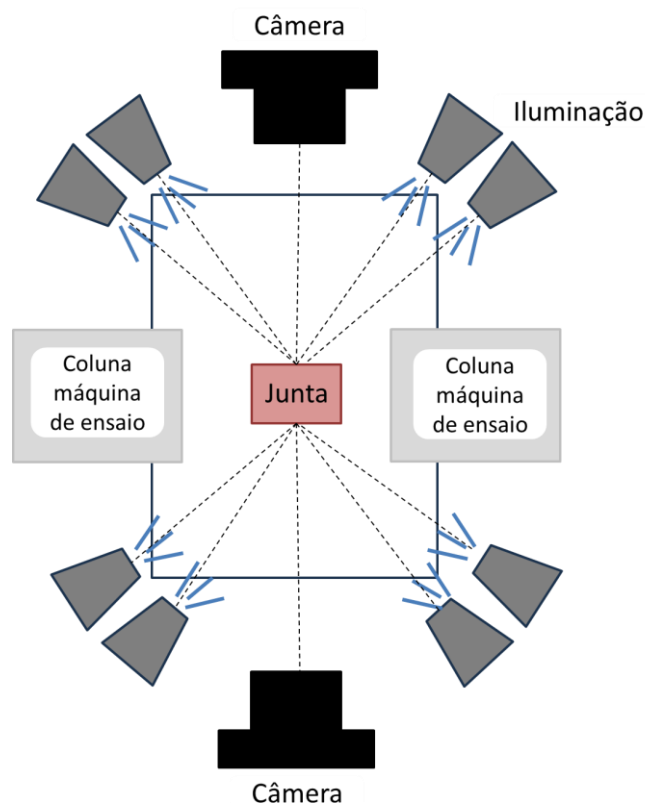


Figura 3.5: Ilustração esquemática (visão superior) do ensaio de correlação de imagens digital (DIC) mostrando a disposição dos equipamentos durante o ensaio de cisalhamento das juntas híbridas polímero-madeira. Adaptado de Vargas et al. [42], e organizada pela autora.

Para a aquisição das imagens, após aplicação de uma pré-carga de 10 N, foram capturadas 20 imagens iniciais para a definição do padrão de referência e avaliar a incerteza experimental, seguidas da aquisição de uma imagem a cada 2 s durante o ensaio mecânico. As imagens geradas com o mapeamento do padrão de ensaio foram analisadas por meio do software Correli 3.0 [45], para obtenção dos campos de deslocamento e deformação gerados no ensaio mecânico. Foi adotada uma malha composta por elementos finitos triangulares lineares (T3), com tamanho médio característico de 100 pixels (≈ 3 mm).

Extensômetros virtuais de deformação com dimensões de 10×10 mm² foram definidos em cada componente da junta, correspondendo a uma região contendo aproximadamente 25 elementos finitos. Nessas regiões (destacadas em verde na Figura 3.6), foram extraídos os componentes de deformação obtidos a partir da análise de DIC, a saber: a deformação longitudinal (ε_y), a

deformação transversal (ε_x) e a deformação de cisalhamento (γ_{xy}). Os valores de deformação reportados para cada extensômetro virtual correspondem à média desses componentes sobre os elementos contidos na região selecionada, o que reduz o ruído local de medição e fornece uma estimativa mais robusta do estado de deformação. Além disso, um extensômetro longitudinal virtual com comprimento de 115 mm foi definido para monitorar a deformação global da junta. O alongamento do corpo de prova foi calculado a partir da diferença no componente de deslocamento longitudinal dos nós localizados nas extremidades do comprimento de base, destacados em azul na Figura 3.6. Esse procedimento permite obter diretamente a deformação longitudinal global do corpo de prova a partir do campo de deslocamentos determinado por DIC. Além das medições obtidas a partir dos extensômetros virtuais de deformação e do extensômetro virtual, o campo de deformação ao longo de toda a junta também foi analisado. Mapas espaciais de uma medida escalar de deformação equivalente (ε_{eq}) foram avaliados para caracterizar a distribuição de deformações no interior do corpo de prova, particularmente ao longo da interface da junta. A deformação equivalente foi calculada a partir dos componentes de deformação no plano obtidos pela análise de DIC, de acordo com a equação 2 [46,47] :

$$\varepsilon_{eq} = \frac{1}{1+\nu} \times \sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 - \varepsilon_x \varepsilon_y + 3\varepsilon_{xy}^2} \quad (2)$$

Essa grandeza escalar fornece uma medida conveniente da intensidade local de deformação e é utilizada nas seções seguintes para visualizar a distribuição espacial das deformações na junta.

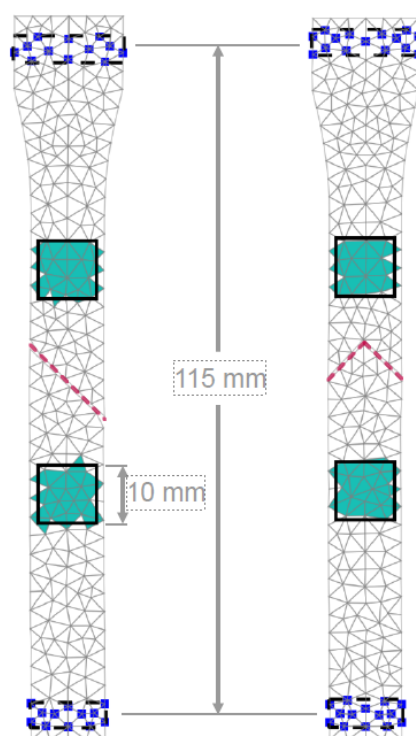


Figura 3.6: Ilustração esquemática dos corpos de prova com configurações de chanfro simples (esquerda) e duplo (direita) e do arranjo de correlação de imagem digital (DIC) utilizado para análise de dados, mostrando a malha de elemento finito triangular (T3) com tamanho médio de elemento característico de 100 px (≈ 3 mm), o posicionamento de extensômetros virtuais (10×10 mm²) em cada componente da junta, e o extensômetro longitudinal virtual com comprimento de medição de 115 mm usado para monitorar o deslocamento geral da junta.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Interface das juntas híbridas polímero-madeira

As imagens de MEV da seção transversal (meia espessura) das juntas híbridas PA6-Eucalipto com configurações de chanfro simples e duplo são apresentadas na Figura 4.1. As micrografias apresentadas são representativas das características observadas ao longo de toda a interface das juntas.

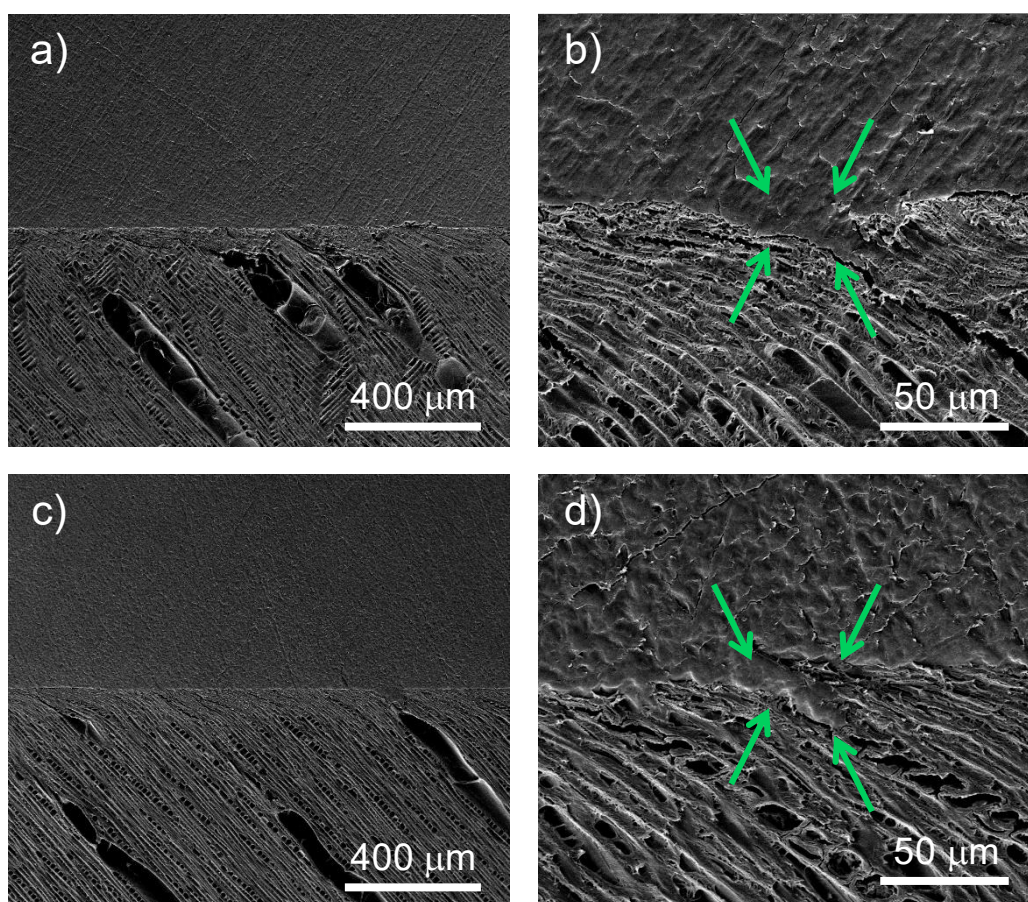


Figura 4.1: Imagens de MEV da seção transversal (meia espessura) das juntas híbridas PA6-Eucalipto. As imagens superiores correspondem à junta com chanfro simples ((a) e (b)), enquanto as inferiores referem-se à junta com chanfro duplo ((c) e (d)). As imagens (a) e (c) foram obtidas com menor ampliação, e as imagens (b) e (d) com maior ampliação. O polímero está localizado na parte superior das imagens, e a madeira na parte inferior. As amostras foram rotacionadas a 45° para alinhar a interface na direção horizontal.

Para ambas as configurações, observam-se interfaces coesas (Figura 4.1, imagens (a) e (c)), o que sugere bom molhamento da superfície da madeira pela PA6 fundida durante o processo de sobremoldagem por injeção. Stadlmann *et al.* [3] obtiveram resultados similares em juntas sobrepostas produzidas por sobremoldagem por injeção constituídas de PA6 e madeiras de alta densidade (*hardwood*), especificamente bétula (*Betula pendula*) e faia (*Fagus sylvatica*), e atribuíram esse comportamento à viscosidade intrinsecamente baixa da PA6 e à sua natureza polar, decorrente dos grupos amida nas unidades repetitivas, o que favorece o molhamento dos grupos hidroxilas dos principais constituintes da madeira, a saber: celulose, hemicelulose e lignina. A análise por MEV também revela a presença de protrusões de PA6 penetrando no substrato de madeira, como mostrado nas imagens ampliadas e indicadas por setas verdes (Figura 4.1, imagens (b) e (d)). Essas protrusões estão distribuídas aleatoriamente ao longo da interface e apresentam dimensões características da ordem de 50 μm . Essas estruturas contribuem para o intertravamento mecânico da interface, conforme discutido na seção seguinte.

As imagens de MEV da Figura 4.1 também revelam a morfologia da madeira, e evidenciam sua natureza celular porosa e fibrilar, como observado em maiores detalhes na imagem de MEV ampliada da Figura 4.2. Observa-se a organização anisotrópica dos elementos, com vasos orientados predominantemente na direção longitudinal das fibras, e com diâmetros que variam de 10 a 50 μm . Essa característica anatômica reforça seu caráter ortotrópico, no qual as propriedades físicas e mecânicas variam conforme a direção de aplicação da carga em função das orientações dos vasos e das fibras, além do seu aspecto morfológico, estando este diretamente relacionada aos mecanismos de transporte de fluidos e à transferência de carga ao longo da estrutura celular.

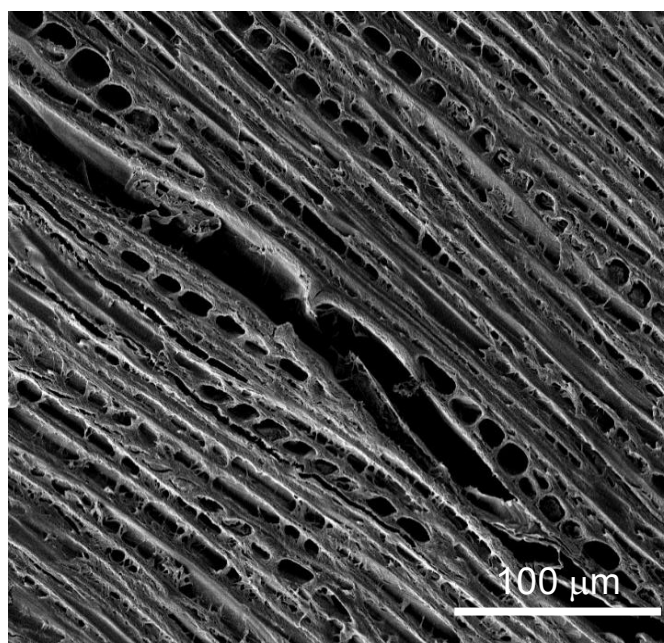


Figura 4.2: Imagem de MEV representativa da seção transversal (meia espessura) da madeira de Eucalipto.

A Figura 4.3 é uma imagem representativa da superfície do chanfro dos substratos de madeira de eucalipto antes do processo de hibridização com o polímero. Observa-se nitidamente que o corte com serra circular utilizado na confecção do chanfro promoveu o colapso dos vasos na superfície da madeira. Esse colapso dos vasos da madeira também pode ser visualizado nas imagens de MEV das seções transversais das juntas híbridas (Figura 4.1), estendendo-se por uma camada de aproximadamente 100 μm abaixo da interface. Para camadas mais afastadas da interface, como apresentado na Figura 4.2, a superfície da madeira porosa fica evidenciada, reforçando a teoria de colapso dos vasos restrita a regiões próximas à interface, em função do corte durante a confecção do chanfro. Entretanto, a imagem de MEV da Figura 4.3 também revela a presença de um vaso aberto na superfície da madeira, cujo diâmetro é da ordem de 50 μm , próximo ao tamanho característico das protrusões poliméricas mostradas nas imagens das seções transversais das juntas (Figura 4.1). Estes vasos abertos estão distribuídos aleatoriamente na superfície dos chanfros da madeira e atuam como sítios de ancoragem mecânica do polímero durante o processo de sobremoldagem por injeção.

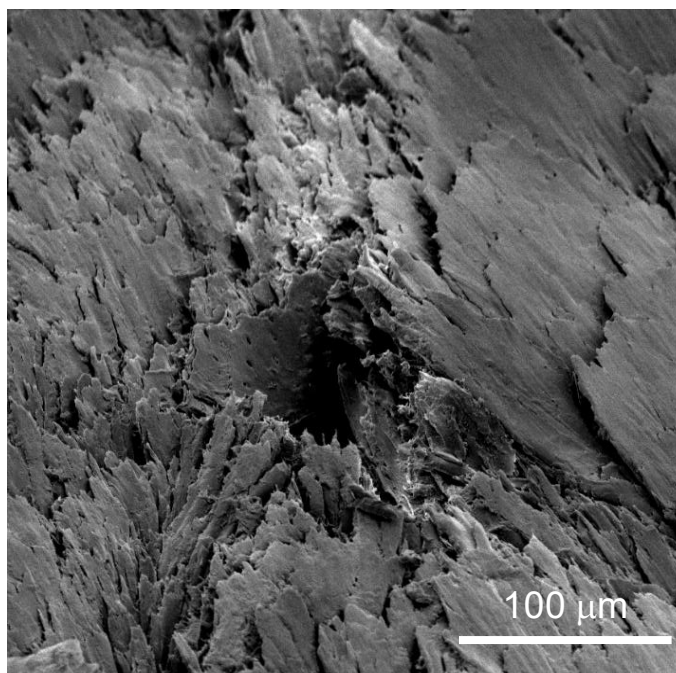


Figura 4.3: Imagem de MEV representativa da superfície dos chanfros do substrato de madeira Eucalipto, antes do processo de hibridização com o polímero, com detalhes para o colapso dos vasos e um vaso aberto.

As imagens de microtomografia por raios X da Figura 4.4 evidenciam o preenchimento do polímero no interior de um vaso aberto da madeira, indicado pelas setas verdes, corroborando os aspectos revelados pelas análises de MEV apresentadas na Figura 4.1. É possível, por meio tanto da seção 2D (Figura 4.4.a) quanto da reconstrução 3D (Figura 4.4.b), identificar a interface entre o polímero e a madeira, bem como o colapso dos vasos da madeira em uma camada situada abaixo da interface, como já discutido anteriormente. A análise indica uma profundidade de preenchimento do polímero nas protrusões de aproximadamente 50 μm, valor consistente com o observado nas imagens de MEV apresentadas na Figura 4.1.

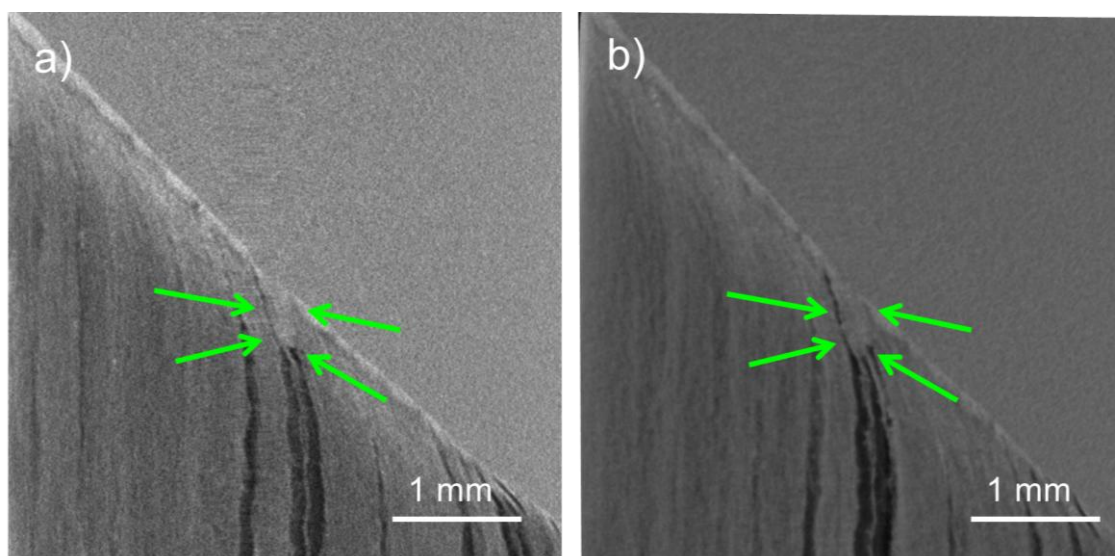


Figura 4.4: Imagens de microtomografia por raios X evidenciando o preenchimento de um vaso da madeira pelo polímero: (a) seção 2D e (b) reconstrução tridimensional (3D). O polímero está localizado na porção superior das imagens e a madeira na porção inferior. A figura não foi rotacionada, e o ângulo de 45° do chanfro foi mantido.

4.2 Resistência mecânica das juntas híbridas polímero-madeira

A Figura 4.5 mostra as curvas força-deslocamento obtidas a partir do ensaio mecânico para as juntas híbridas PA6-Eucalipto nas configurações de chanfro simples e de chanfro duplo. A boa sobreposição entre as curvas individuais em cada configuração de junta evidencia baixa dispersão experimental, indicando boa repetibilidade e robustez da metodologia de sobremoldagem por injeção adotada. Esse aspecto é particularmente relevante para o sistema híbrido estudado, em que variações locais de molhabilidade, penetração do polímero fundido nos poros da madeira e contração diferencial podem impactar significativamente o desempenho mecânico.

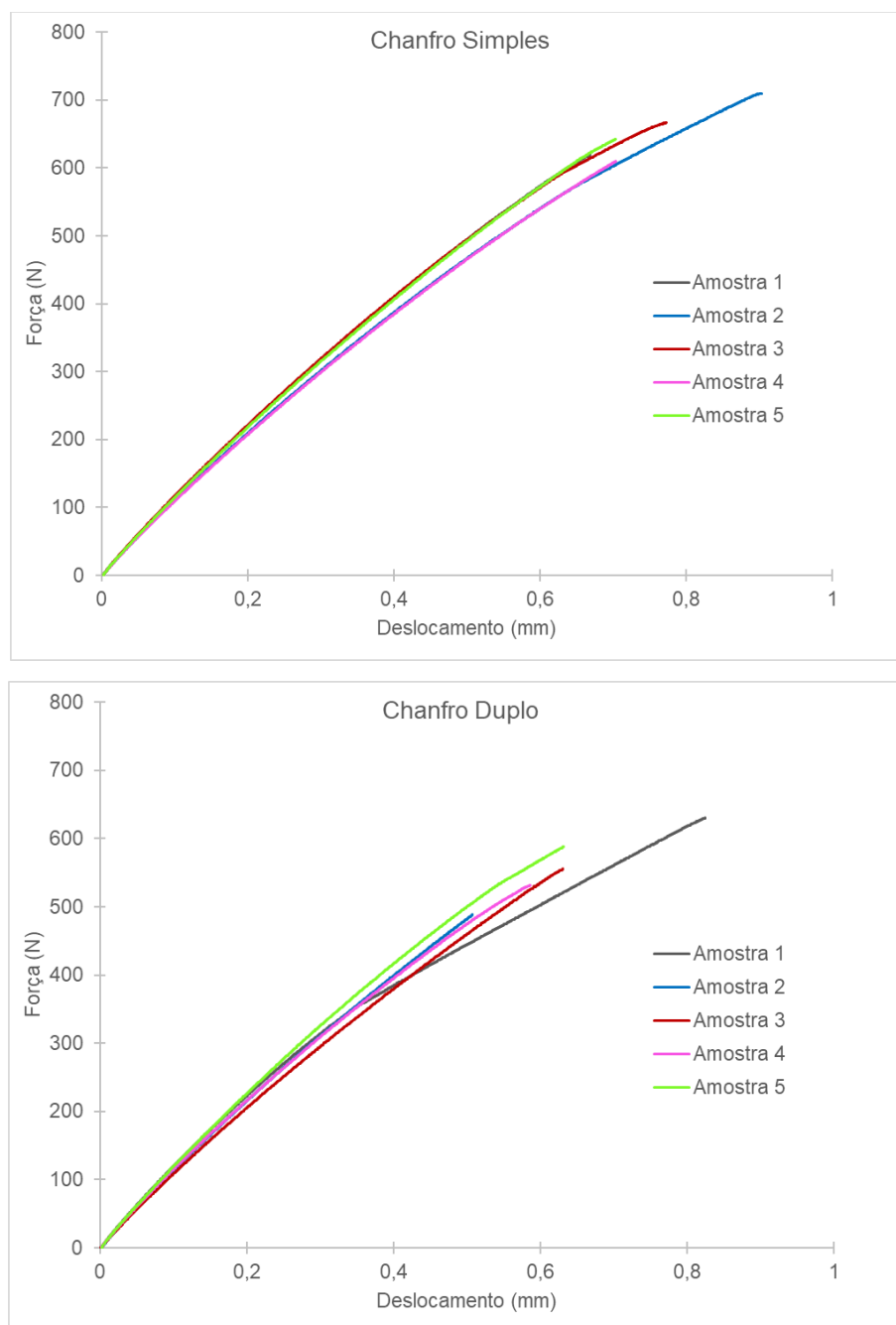


Figura 4.5: Curvas força-deslocamento obtidas nos ensaios de resistência ao cisalhamento das juntas híbridas PA6-Eucalipto nas configurações chanfro simples (acima) e chanfro duplo (abaixo). Cada um dos cinco corpos de prova ensaiados para cada configuração é identificado por um número correspondente nas legendas das figuras.

A distribuição estatística dos valores de força e deslocamento máximos das juntas híbridas PA6-Eucalipto no ensaio de resistência ao cisalhamento é apresentada na Figura 4.6. Os resultados evidenciaram diferenças claras entre

as geometrias avaliadas. As juntas com chanfro simples apresentaram maior resistência mecânica, com valores médios de força máxima de 675 N, em comparação as amostras de chanfro duplo, que apresentou média de 600 N, correspondendo a um aumento de aproximadamente 13%. Além disso, as amostras de chanfro simples apresentaram menor dispersão dos resultados de força máxima, com coeficiente de variação de 7,0%, enquanto as amostras de chanfro duplo apresentaram maior variabilidade (11,5%), indicando maiores concentradores de tensão na estrutura. A menor variabilidade observada para a força máxima das juntas com chanfro simples sugere maior estabilidade mecânica e melhor reprodutibilidade do comportamento estrutural. Resultados semelhantes foram observados para o deslocamento máximo, no qual as amostras de chanfro simples apresentaram maior deslocamento, com valor médio de 0,8 mm, enquanto o chanfro duplo apresentou mediana de 0,6 mm, representando uma diferença de aproximadamente 27%. Apesar de ambos os grupos de juntas apresentarem dispersão semelhante, o maior deslocamento observado para a junta com chanfro simples sugere uma transferência de carga mais eficiente e uma distribuição de tensões mais homogênea na interface da junta. Esses resultados evidenciam que a geometria da interface pode desempenhar um papel relevante na eficiência da transferência de carga e no mecanismo de falha da estrutura hibridizada.

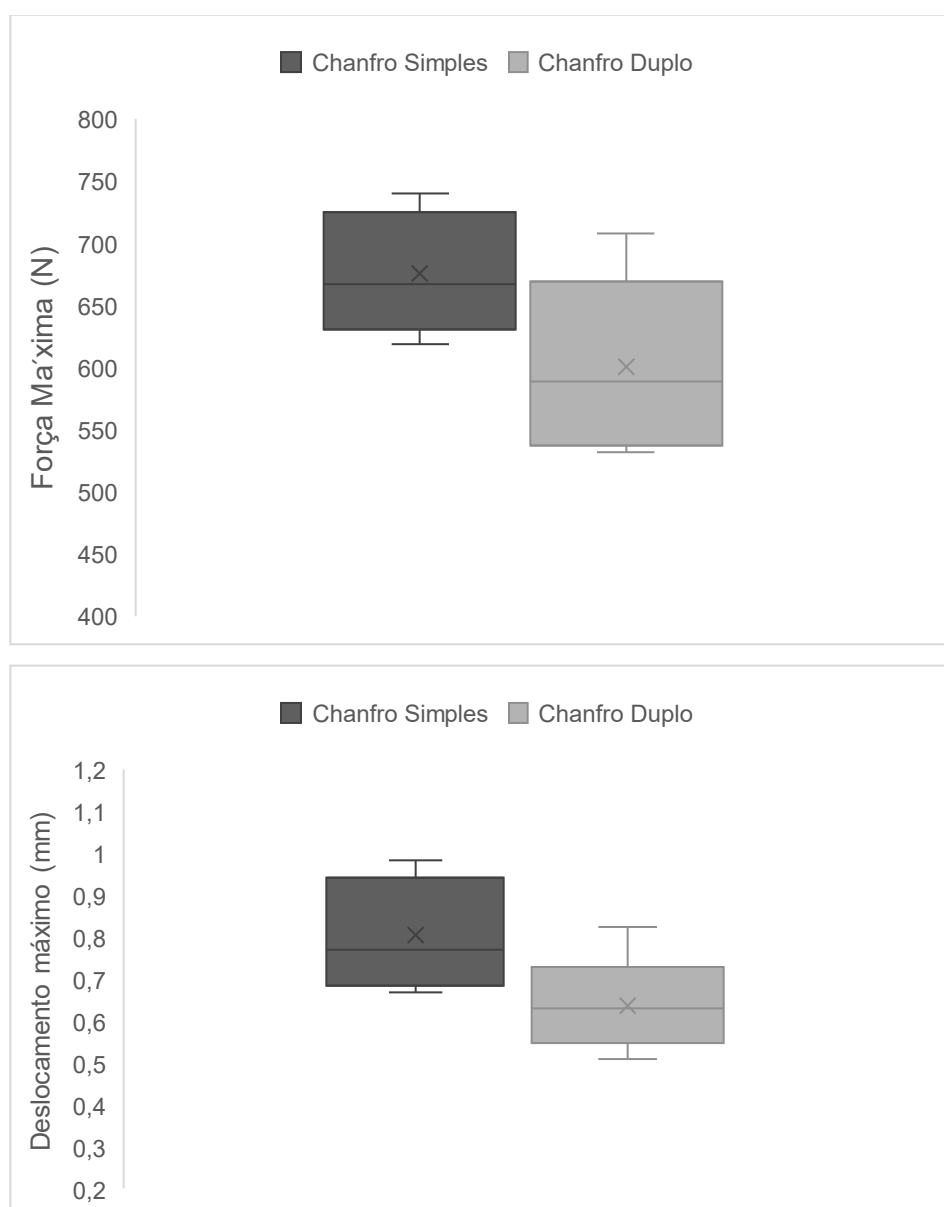


Figura 4.6: Box-plot dos valores de força máxima (superior) e de deslocamento máximo (inferior) obtidos nos ensaios de resistência ao cisalhamento das juntas híbridas PA6-Eucalipto nas configurações chanfro simples e duplo. No gráfico, as “caixas” correspondem ao intervalo interquartil que representa os 50% centrais dos dados (Q1, ou 25% dos dados e Q3, ou 75% dos dados), enquanto os “bigodes” se estendem até os valores extremos. O “x” representa o valor médio, enquanto a linha horizontal que divide a caixa representa a mediana.

O valor médio de resistência ao cisalhamento das juntas híbridas de PA6 e *Eucalyptus grandis* foi de $8,1 \pm 0,6$ MPa e de $7,3 \pm 1,0$ MPa, com valores

máximos de $9,0 \pm 0,6$ MPa e $8,7$ MPa $\pm 1,0$ para as configurações de chanfro simples e chanfro duplo, respectivamente. O cálculo da resistência ao cisalhamento das juntas (τ) assumiu uma distribuição uniforme de tensões no plano de chanfro a 45° , e considerou como base a Equação 3. Foram consideradas as áreas nominais (A) das seções transversais dos corpos de prova, de aproximadamente 42 mm^2 .

$$\tau = \frac{\sigma}{2} \sin 2\theta \equiv \tau_{45^\circ} = \frac{\sigma}{2} = \frac{F}{2A} \quad (3)$$

Os valores médios de resistência ao cisalhamento obtidos para as juntas estudadas são, a princípio, da mesma ordem de grandeza daqueles reportados na literatura para juntas híbridas polímero-madeira. Stadlmann *et al* [3] investigaram o comportamento mecânico e a interface de juntas híbridas de sobreposição simples (*single-lap joints*) constituídas de PA6 e madeiras de alta densidade (*hardwood*), especificamente bétula (*Betula pendula*) e faia (*Fagus sylvatica*), produzidas por sobremoldagem por injeção. Os autores reportaram valores médios de resistência ao cisalhamento de $5,7 \pm 1,1$ MPa e $6,4 \pm 1,5$ MPa para bétula e faia, respectivamente, com valores máximos de aproximadamente $8,7$ MPa e $9,7$ MPa, atribuído ao travamento mecânico e interações físico-químicas na interface. Oliveira *et al.* [17] utilizaram a técnica de fabricação por fusão de filamento (FFF) para unir um compósito de poliamida 6 reforçada com fibra de carbono (PA6-15CF) a um substrato de faia europeia, por meio de uma geometria de sobreposição simples (*single-lap joint*), e reportaram uma resistência ao cisalhamento de $7,5 \pm 1,1$ MPa, atribuída à formação de uma interface coesa entre o substrato e o polímero. Awan *et al.* [ref] avaliaram a união entre um compósito de PA6 reforçado com fibras de carbono e madeira de carvalho por meio do processo de soldagem ultrassônica (*ultrasonic joining, U-Joining*). Os autores reportaram resistência ao cisalhamento de $9,2 \pm 0,7$ MPa para uma geometria de sobreposição simples (*single-lap joint*), o qual foi diretamente relacionado ao travamento mecânico adicional promovido pelo tratamento superficial prévio, a partir da texturização a laser da superfície da madeira, resultando em falha coesiva no substrato de madeira.

Entretanto, é importante destacar que os valores ligeiramente superiores de resistência ao cisalhamento obtidos para as juntas híbridas deste estudo são atribuídos, em parte, à geometria distinta das juntas aqui investigadas (juntas do tipo *scarf*) em relação àquelas reportadas na literatura (juntas do tipo *single-lap*). O uso de juntas do tipo *scarf* minimiza a excentricidade da linha de aplicação de carga em relação ao plano médio da junta e, conseqüentemente, reduz a intensidade da flexão secundária (*secondary bending*). Esse fenômeno associado ao momento fletor é comum em juntas híbridas do tipo *single-lap joint* de materiais dissimilares [48]. A geometria escolhida (*scarf joint*), com chanfros simples ou duplo a 45°, promoveu uma transferência de carga mais uniforme e menor concentração de tensões nas extremidades da junta polímero-madeira, mitigando mecanismos prematuros de falha associados à flexão secundária (*secondary bending*), fazendo com que o momento fletor atue de forma subdominante e permitindo a determinação mais precisa da resistência ao cisalhamento intrínseca da junta [49].

Adicionalmente, a seleção da madeira de eucalipto com base em parâmetros anatômicos, como o Índice de Runkel e a densidade aparente associada, contribuiu para a escolha de um substrato potencialmente mais suscetível ao preenchimento pelo polímero fundido durante o processo de sobremoldagem por injeção. Valores médios reportados na literatura indicam que *Eucalyptus grandis* apresenta Índice de Runkel tipicamente entre 0,6 e 0,9, enquanto espécies como *Betula pendula* e a *Fagus sylvatica* apresentam Índice de Runkel superiores a 1, situando-se tipicamente entre 1,05 e 1,14 [25,50]. Espécies de *Quercus robur* ou *Carvalho Europeu* também apresentam Índice de Runkel acima de 1,0, usualmente associados a paredes celulares mais espessas, menor colapsabilidade e maior densidade aparente [51]. Assim, o menor Índice de Runkel do eucalipto sugere maior flexibilidade e maior fração de vasos disponível, isto é, menor densidade aparente, favorecendo a infiltração do polímero nas cavidades, e o aumento da área de ancoragem mecânica quando comparado às demais folhosas citadas. Essa condição favoreceu a formação de sítios de travamento mecânico na interface polímero-madeira, conforme evidenciado pelas análises de MEV (Figura 4.1) e microtomografia por raios X

(Figura 4.4) apresentadas na seção anterior, contribuindo para a resistência mecânica ao cisalhamento das juntas híbridas PA6-eucalipto.

4.3 Mecanismos de falha das juntas híbridas polímero-madeira

A Figura 4.8 apresenta imagens fotográficas das juntas híbridas PA6-Eucalipto com chanfro simples (a e b) e chanfro duplo (c e d) submetidas ao ensaio mecânico, com detalhes para o mecanismo macroscópico de falha. As juntas com chanfro simples apresentaram dois tipos de fratura macroscópica. Dois corpos de prova falharam por delaminação interfacial (amostras 1 e 3 na Figura 4.5), enquanto os três corpos de prova restantes apresentaram fratura mista associada à falha no lado do PA6. As juntas com chanfro duplo, por sua vez, apresentaram o tipo de falha mista adesiva-coesiva para todas as amostras.

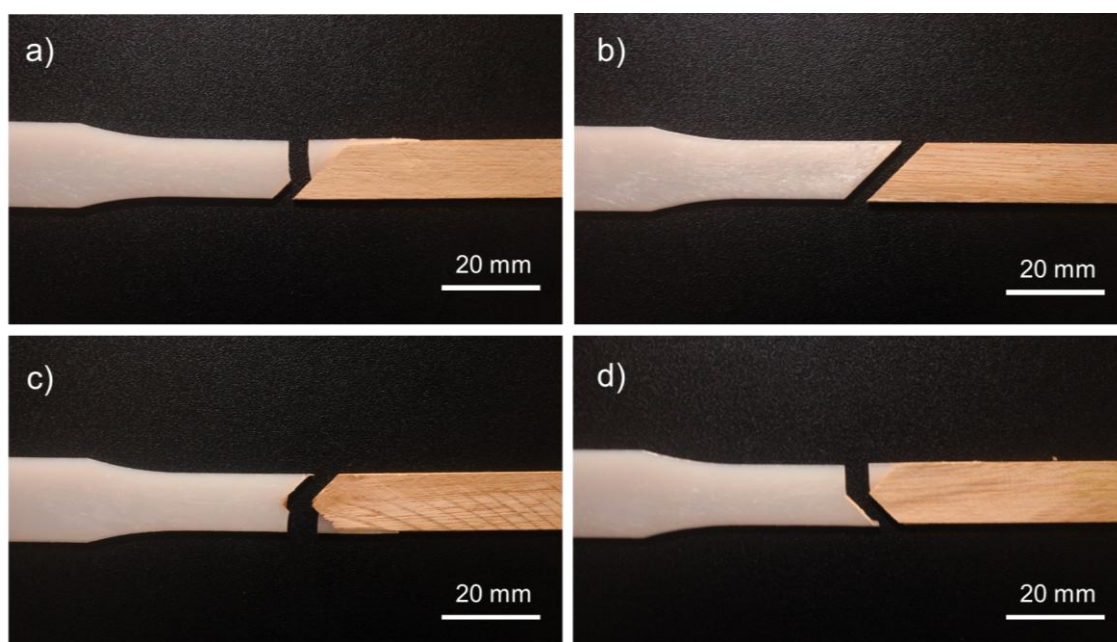


Figura 4.8: Imagens fotográficas dos corpos de prova das juntas híbridas PA6-Eucalipto com chanfro simples (a) e (b) e chanfro duplo (c) e (d) submetidos ao ensaio mecânico.

Na Figura 4.9 são apresentadas imagens de MEV das superfícies de fratura delaminadas de uma junta híbrida PA6-Eucalipto com chanfro simples (Amostra 3, Figura 4.5). As micrografias apresentadas são representativas das características observadas ao longo de toda a interface delaminada dessa junta,

assim como da junta com chanfro duplo (não mostrada). Na superfície do componente PA6 (Figura 4.9a), observam-se protrusões poliméricas, rotuladas de 1 a 6, com tamanhos característicos da ordem de 50 μm , rodeadas por fragmentos de madeira aderidos ao polímero. Na imagem correspondente da superfície da madeira (Figura 4.9b), identificam-se cavidades vazias, também rotuladas de 1 a 6. A correspondência morfológica entre as protrusões presentes na superfície do polímero e as cavidades observadas na madeira evidencia que essas estruturas constituem pares complementares formados pelo preenchimento dos vasos da madeira pela PA6 fundida durante o processo de sobremoldagem por injeção, consistente com as análises de MEV das seções transversais (meia espessura) das juntas mostradas na Figura 4.1. A presença dessas protrusões indica que, durante a fratura, ocorreu a extração do polímero previamente ancorado nos vasos da madeira, caracterizando um mecanismo de intertravamento mecânico. Por outro lado, a presença de fragmentos de madeira aderidos à superfície do polímero indica que, em outras regiões, a fratura ocorreu de forma coesiva no interior do substrato lignocelulósico, sugerindo que a resistência interfacial local superou a resistência da própria madeira. Esses aspectos fractográficos evidenciam, portanto, a ocorrência de um modo de fratura mista adesiva–coesiva nas juntas híbridas.

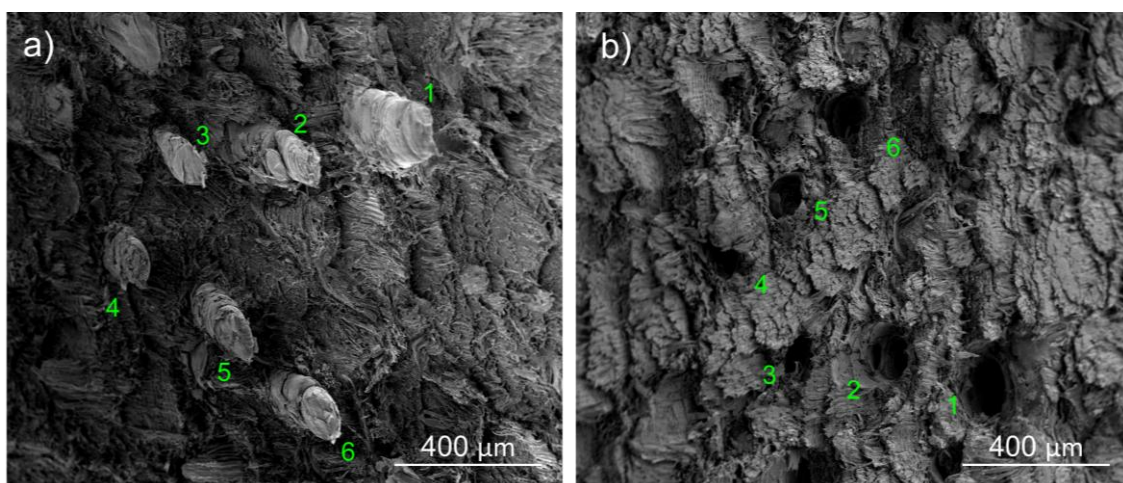


Figura 4.9: Imagens de MEV obtidas das superfícies de fratura de uma junta híbrida PA6-Eucalipto com chanfro simples (Amostra, Figura 4.5), delaminada no ensaio de cisalhamento. A imagem (a) representa a superfície de PA6, enquanto a imagem (b) representa a superfície do eucalipto. Os números indicam os pares de preenchimento da PA6 nos vasos da madeira.

Outro aspecto que representa papel importante na qualidade da interface das juntas híbridas aqui estudadas é a presença de extrativos naturais na madeira. Estudos demonstram que a presença de extrativos interferem diretamente no desempenho mecânico das juntas. Gardner et al. (2015) apresentaram uma análise dos fenômenos de adesão em materiais à base de madeira, demonstrando que os extrativos podem migrar para a superfície durante processos térmicos com gradientes de temperatura expressivos, como moldagem por injeção por exemplo, alterando a energia superficial e a molhabilidade do substrato [31]. Segundo os autores, a presença de extrativos favorece a formação de uma camada superficial quimicamente heterogênea, que pode atuar como uma camada fraca, limitando tanto as interações químicas quanto o travamento mecânico entre o polímero e a madeira. No caso específico de madeiras folhosas, incluindo o eucalipto, os principais extrativos presentes são os ácidos graxos saturados e insaturados, que podem atingir concentrações significativas, particularmente concentrados nos vasos na região do cerne [7]. Esses e outros tipos de extrativos, como compostos hidrofílicos como álcoois alifáticos, esteróis, terpenoides e compostos fenólicos, podem migrar para a superfície durante o processamento térmico, formando uma camada superficial

de compostos apolares que reduz a energia superficial e prejudica a adesão com polímeros polares, como a PA6. A poliamida apresenta elevada polaridade devido à presença de grupos amida, favorecendo interações por ligações de hidrogênio com grupos hidroxila da celulose; entretanto, a presença de extrativos apolares pode reduzir a efetividade dessa interação química [52].

4.4 Correlação de Imagem Digital (DIC)

A Figura 4.10 apresenta as curvas tensão–deformação longitudinal obtidas nos ensaios mecânicos acoplados ao DIC para as juntas híbridas PA6–Eucalipto nas configurações de chanfro simples e duplo, com resultados mostrados separadamente para a junta como um todo, para o componente polímero (PA6) e para o componente madeira (Eucalipto), correspondentes às duas faces da junta.

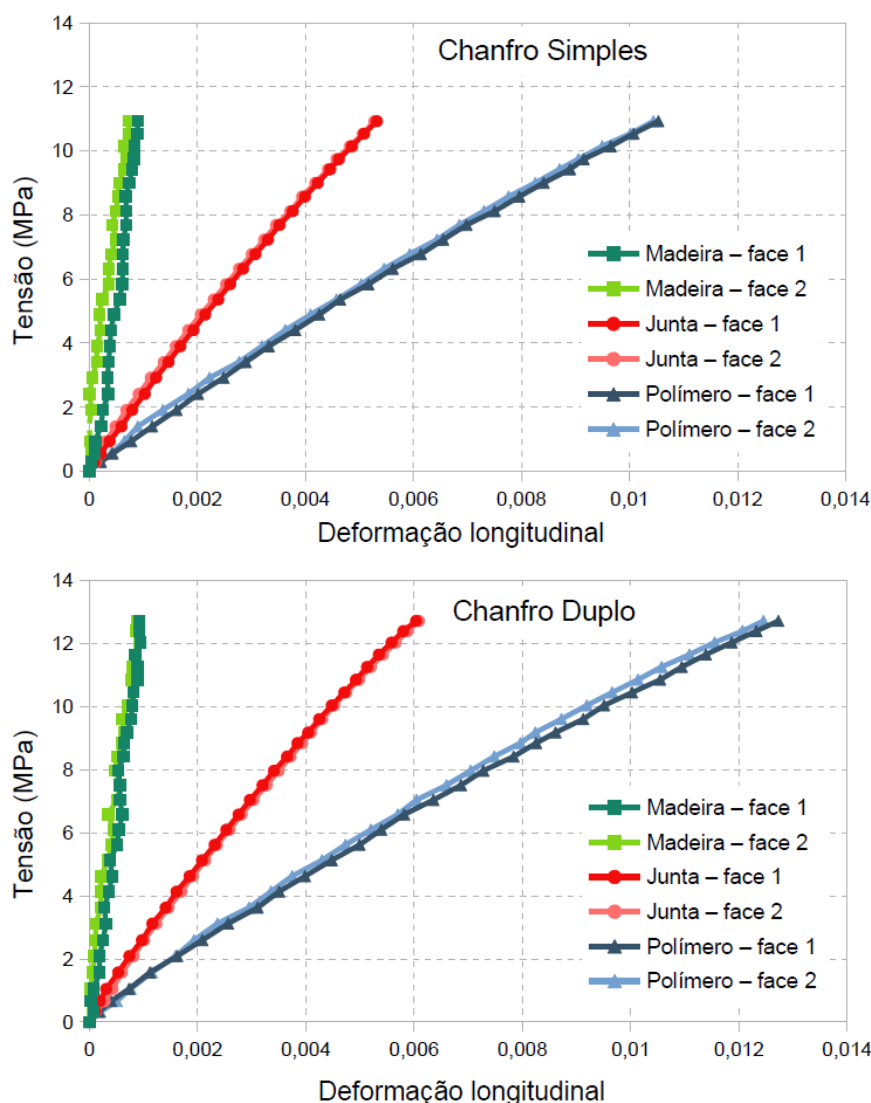


Figura 4.10: Curvas tensão–deformação obtidas nos ensaios mecânicos acoplados ao DIC para as juntas híbridas PA6–Eucalypto nas configurações de chanfro simples e duplo, apresentadas separadamente para a junta como um todo, para o componente polimérico e para o componente madeira. Para cada componente, são incluídos os resultados correspondentes às duas faces da junta.

Observa-se que as respostas globais das juntas, para ambas as configurações de chanfro, situam-se entre os comportamentos dos componentes individuais, apresentando rigidez e deformação máxima intermediárias. Esse resultado evidencia o acoplamento mecânico entre madeira e polímero e a eficiência da transferência de tensões na interface. Observa-se também que a rigidez da madeira é aproximadamente uma ordem de grandeza superior à do

polímero, confirmando seu papel predominante na rigidez inicial do sistema, enquanto o polímero contribui principalmente para a acomodação de deformações. As curvas correspondentes às duas faces, tanto para cada componente quanto para a junta como um todo, mostram elevada concordância entre si. Pequenas diferenças observadas nas curvas da madeira podem ser atribuídas à sua heterogeneidade intrínseca, associada à anisotropia e à distribuição não uniforme de vasos. A forte sobreposição das curvas indica excelente reprodutibilidade das medições por DIC e sugere comportamento mecânico essencialmente simétrico entre as faces, sem evidências de gradientes significativos de deformação ao longo da espessura da junta, o que indica ausência de efeitos relevantes de *secondary bending* durante o ensaio.

As Figuras 4.11 e 4.12 apresentam, respectivamente, as deformações longitudinais e as deformações equivalentes normalizadas obtidas por DIC em cada uma das faces dos componentes das juntas híbridas PA6–Eucalipto com configurações de chanfro simples e duplo, calculadas a partir da última imagem adquirida imediatamente antes da falha da junta e obtidas a partir dos extensômetros virtuais de deformação (Figura 3.6). As deformações apresentadas nas Figuras 4.11 e 4.12 foram parametrizadas dividindo-se o valor de cada elemento pelo valor médio correspondente de cada componente da junta. Esse procedimento foi adotado devido à diferença significativa de rigidez entre os materiais, uma vez que a rigidez da madeira de eucalipto é aproximadamente uma ordem de grandeza superior à da PA6 (Figura 4.10) e, conseqüentemente, as deformações na madeira são cerca de uma ordem de grandeza inferiores. Essas deformações parametrizadas constituem uma espécie de fator de concentração de deformações, permitindo comparar de forma direta a distribuição relativa das deformações em cada componente da junta e identificar regiões de concentração ou redistribuição de deformações ao longo da interface. Na configuração de chanfro simples, observa-se, para ambas as deformações, longitudinal e equivalente, uma distribuição mais gradual e relativamente homogênea ao longo da interface, tanto no componente polimérico quanto no substrato de madeira. Esse comportamento indica uma transferência de carga mais progressiva entre os materiais ao longo da região do chanfro. Em contraste, na configuração de chanfro duplo verifica-se uma concentração mais

pronunciada das deformações, tanto longitudinal quanto equivalente, na região do vértice superior do chanfro. Os mapas de deformação evidenciam gradientes mais abruptos nessa região, sugerindo que a transferência de carga ocorre de forma mais localizada. Adicionalmente, nota-se que os campos de deformação na madeira apresentam uma distribuição espacial mais restrita, refletindo sua maior rigidez, enquanto no componente de PA6 as deformações se estendem por uma região mais ampla acima da interface, evidenciando o papel do polímero na acomodação da deformação global da junta e na redistribuição das tensões transferidas ao substrato de madeira.

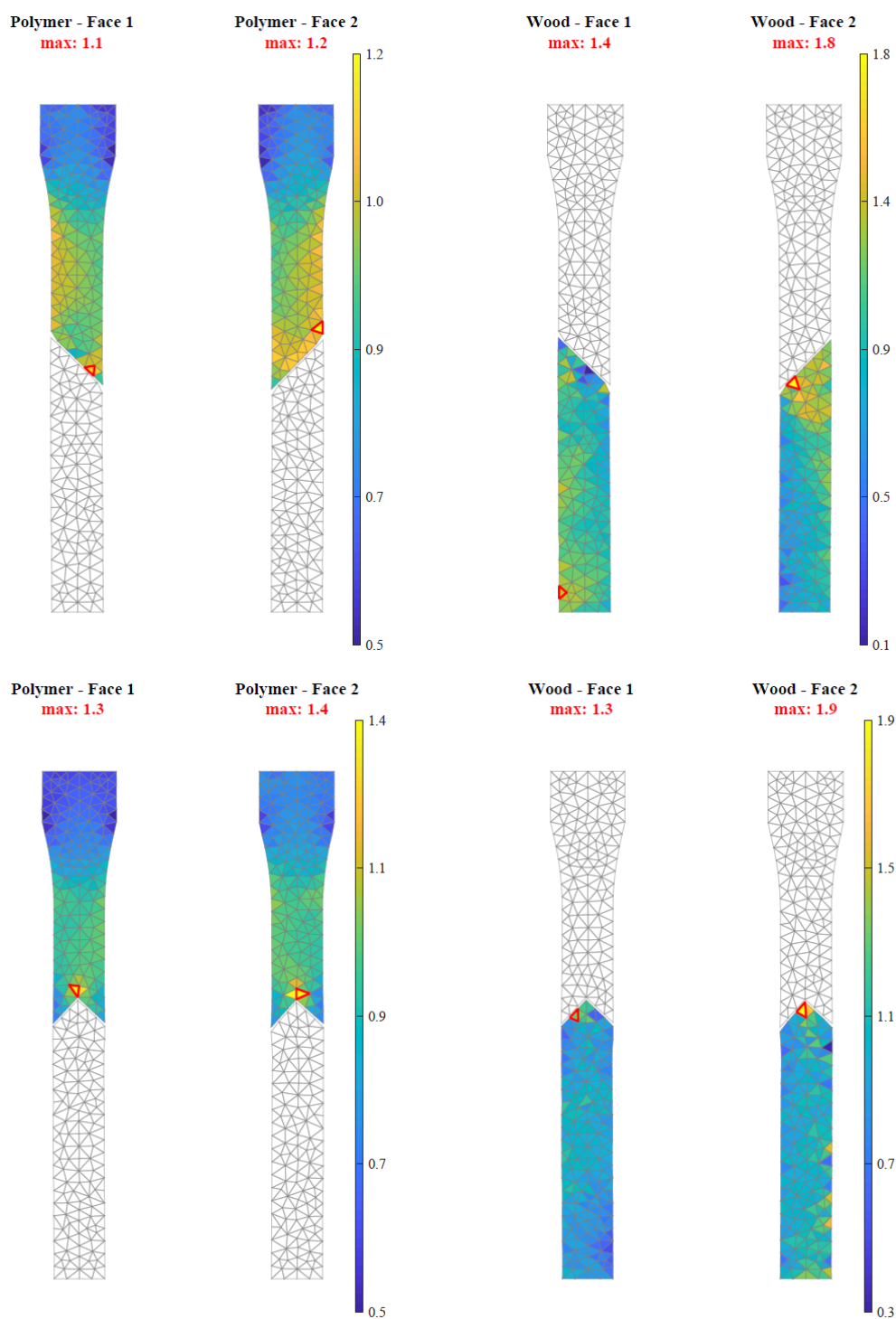


Figura 4.11: Deformações longitudinais normalizadas obtidas por DIC em cada uma das faces dos componentes das juntas híbridas PA6–Eucalipto com configurações de chanfro simples e duplo. Os valores foram parametrizados dividindo-se o valor de cada elemento pelo valor médio correspondente de cada componente da junta.

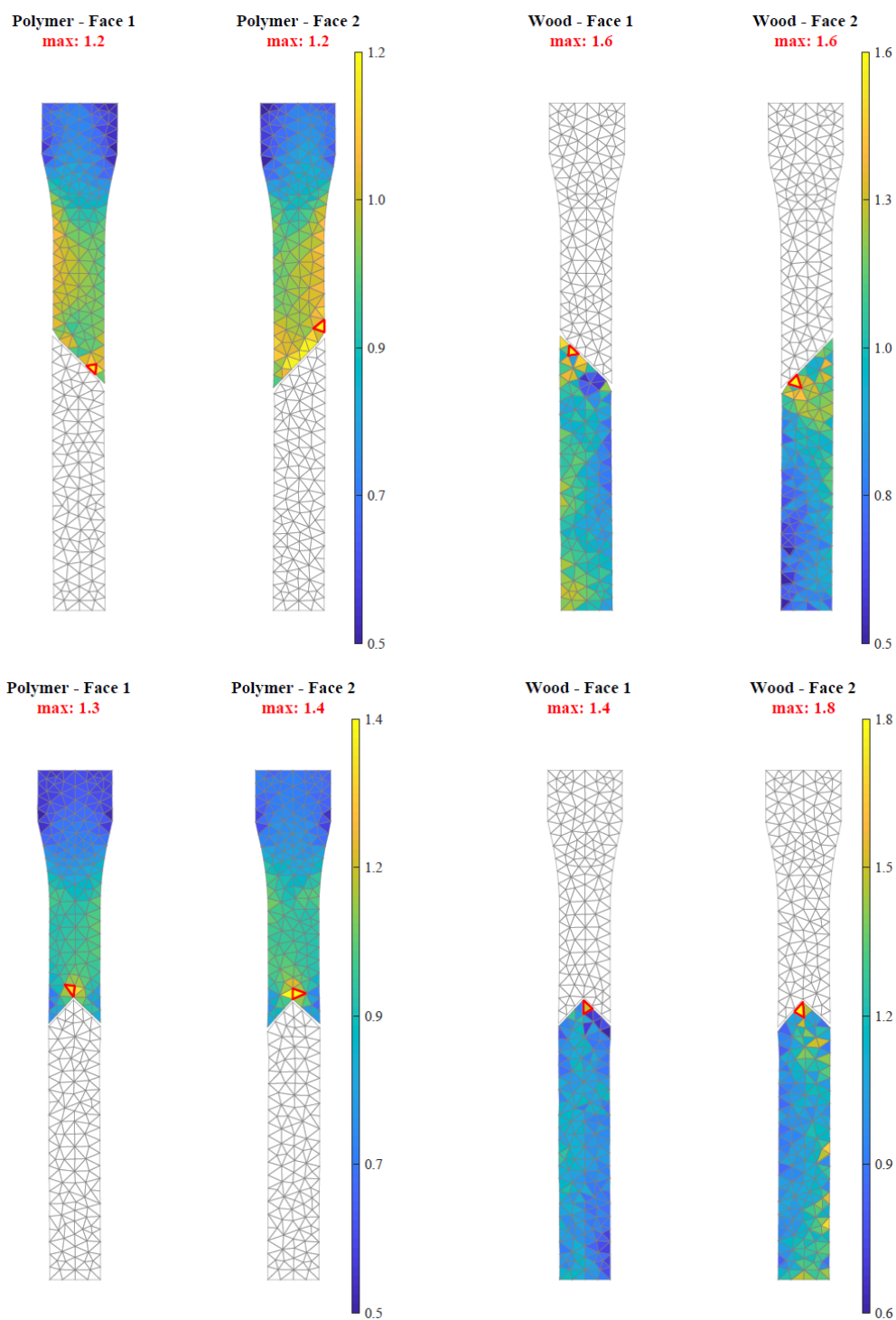


Figura 4.12: Deformações equivalentes normalizadas obtidas por DIC em cada uma das faces dos componentes das juntas híbridas PA6–Eucalipto com configurações de chanfro simples e duplo. Os valores foram parametrizados dividindo-se o valor de cada elemento pelo valor médio correspondente de cada componente da junta.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, juntas híbridas compostas por poliamida 6 (PA6) e madeira de *Eucalyptus grandis* foram produzidas de forma bem-sucedida por sobremoldagem por injeção com adesão direta, utilizando geometria do tipo *scarf* com chanfros simples e duplo de 45°.

As análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microtomografia por raios X (μ CT) evidenciaram uma interface polímero-madeira bem definida, caracterizada pela penetração da PA6 em vasos abertos da madeira formando protrusões poliméricas com dimensões da ordem de 50 μ m, responsáveis pela promoção do intertravamento mecânico. Destaca-se que a escolha da madeira de *Eucalyptus grandis* foi um fator relevante para o desempenho observado, uma vez que sua estrutura naturalmente porosa e de relativa baixa densidade favoreceu o preenchimento das cavidades pelo polímero, contribuindo para a eficiência da ancoragem mecânica na interface.

Os ensaios mecânicos apresentaram baixa dispersão experimental e resultaram em resistências ao cisalhamento de $8,1 \pm 0,6$ MPa para a configuração de chanfro simples e $7,3 \pm 1,0$ MPa para o chanfro duplo, valores comparáveis aos reportados na literatura para juntas sobrepostas polímero-madeira produzidas por diferentes técnicas de união. A análise fractográfica revelou um modo de falha predominantemente misto, envolvendo a exposição do preenchimento da PA6 dos vasos da madeira, bem como falhas coesivas localizadas tanto no substrato de madeira quanto no polímero.

Análises por correlação de imagens digitais (DIC) demonstraram um acoplamento mecânico eficiente entre os componentes da junta, evidenciando que a madeira governa a rigidez global do sistema, enquanto o polímero atua predominantemente na acomodação das deformações. A análise dos campos de deformação mostrou que a geometria com chanfro simples promove uma distribuição de deformações mais uniforme ao longo da interface, enquanto o chanfro duplo resulta em concentrações de deformação no cume do chanfro, o que está em concordância com o desempenho mecânico observado.

De forma geral, os resultados confirmam a viabilidade técnica da sobremoldagem por injeção como método de fabricação de estruturas híbridas PA6–*Eucalyptus grandis* e evidenciam a importância da geometria da junta e da

morfologia da madeira na definição do comportamento mecânico e dos mecanismos de falha dessas estruturas.

6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Com base nos resultados e limitações deste estudo, são sugeridos os seguintes direcionamentos para trabalhos futuros:

- Avaliar diferentes métodos de corte e preparação superficial da madeira, com o objetivo de minimizar a formação de camadas fracas e o colapso de fibras nos vasos.
- Investigar a influência dos extrativos da madeira de forma mais aprofundada, incluindo tratamentos de extração química, bem como sua correlação quantitativa com o desempenho mecânico das juntas.
- Estudar o efeito de parâmetros de injeção, como temperatura do polímero, pressão de injeção, velocidade de preenchimento e tempo de recalque, na penetração do polímero e na formação do travamento mecânico.
- Avaliar a durabilidade das juntas híbridas sob carregamento de fadiga.
- Avaliar a durabilidade das juntas sob ação de envelhecimento hidrotérmico.
- Avaliar o ataque químico adequado para retirada dos extrativos ou ceras da madeira que possam impactar na adesão interfacial com o polímero.
- Estudar a possibilidade de dissolução da madeira, com objetivo de observar a superfície do polímero na interface, previamente ao ensaio de tração das juntas.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Kohl, Daniel, Philipp Link, and Stefan Böhm. "Wood as a technical material for structural vehicle components." *Procedia CIRP* 40 (2016): 557-561.
- [2] Disponível em: <https://iba.org/arvores-plantadas>. Acesso em 13/12.
- [3] Stadlmann, Alexander, et al. "Interfacial adhesion and mechanical properties of wood-polymer hybrid composites prepared by injection molding." *Polymers* 13.17 (2021): 2849.
- [4] Ramesh, M.; Rajeshkumar, L.; Sasikala, G.; Balaji, D.; Saravanakumar, A.; Bhuvaneswari, V.; Bhoopathi, R. A Critical Review on Wood-Based Polymer Composites: Processing, Properties, and Prospects. *Polymers* 2022, 14, 589. <https://doi.org/10.3390/polym14030589>.
- [5] C. Chen, Y. Kuang, S. Zhu, I. Burgert, T. Keplinger, A. Gong, T. Li, L. Berglund, S. J. Eichhorn, L. Hu. Structure-property-function relationships of natural and engineered wood. *Nature Reviews Materials*, vol. 5, p. 642-666, 2020.
- [6] Gacitúa, William, and Michael Wolcott. "Morphology of wood species affecting wood-thermoplastic interaction: Microstructure and mechanical adhesion." *Maderas. Ciencia y tecnología* 11.3 (2009): 217-231.
- [7] Klock, U., Muñiz, G. D., HERNANDEZ, J. A., & Andrade, A. D. (2005). *Química da madeira*. Fupef, Curitiba.
- [8] KOLLMAN, F. P. Principles of wood sciences and technology. **I. Solid Wood**, p. 257-274, 1968.
- [9] Pedrazzi, C., Dick, G., Coldebella, R., Gentil, M., Giesbrecht, B. M., & da Rosa, R. C. QUÍMICA DA MADEIRA 1º edição. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Departamento de Ciências Florestais, 2019.
- [10] Fahlén, J. & Salmén, L. Cross- sectional structure of the secondary wall of wood fibers as affected by processing. *J. Mater. Sci.* 38, 119–126 (2003).

- [11] ADLER, Erich. Lignin chemistry—past, present and future. **Wood science and technology**, v. 11, n. 3, p. 169-218, 1977.
- [12] PEREIRA, J. C. D., et al. "Características anatômicas, físicas e mecânicas da madeira de cinco espécies de Eucalyptus." *Revista Árvore*, vol. 35, no. 2, 2011, pp. 233-240.
- [13] BODIG, J., & JAYNE, B. A. "Mechanics of Wood and Wood Composites." Van Nostrand Reinhold, 1982.
- [14] ZAJĄCZKOWSKA, Urszula et al. Leaf photosynthetic capacity, trunk wood structure and stem xylem sap flow in 700-years old *Quercus robur* L.: a pilot study upon oak 'Bartek', a natural monument in Poland. *Silva Fennica*, v. 56, n. 3, 2022.
- [15] TARCÍSIO LIMA, José; DE OLIVEIRA RIBEIRO, Alessandra; REZENDE PINTO NARCISO, Carolina. Microfibril angle of *Eucalyptus grandis* wood in relation to the cambial age. *Maderas. Ciencia y tecnología*, v. 16, n. 4, p. 487-494, 2014.
- [16] DUARTE, F. A. S.; TOMAZELLO FILHO, M. Avaliação da densidade básica e aparente da madeira de árvores de *Betula pendula*, *Eucalyptus globulus* e de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla*. *Anais do Simpósio de Ciência e Tecnologia da Madeira do Estado do Rio de Janeiro*, 2009.
- [17] Oliveira, G. H. M., Awan, A., Auer, P., Egger, P. M., Canto, L. B., Domitner, J., & Amancio-Filho, S. T. (2026) Direct-joining of short carbon fiber-reinforced polyamide 6 composite with wood by additive manufacturing. *Progress in Additive Manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/s40964-026-01632-9>
- [18] LOBÃO, Moisés Silveira et al. Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades. *Revista Árvore*, v. 28, p. 889-894, 2004.

- [19] SZÜCS, Carlos Alberto et al. Estruturas de madeira. UFSC, Florianópolis, 2015.
- [20] Forest Products Laboratory (US). *Wood handbook: wood as an engineering material*. Vol. 113. The Laboratory, 1999.
- [21] Disponível em: <https://www.istockphoto.com/jp/tree-trunk-cross-section>. Acesso em 08/08/2024.
- [22] XIONG, Jun et al. Feedback control of variable width in gas metal arc-based additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 76, p. 11-20, 2022.
- [23] Vasconcelos, R. L., Oliveira, G. H., Amancio-Filho, S. T., & Canto, L. B. (2023). Injection overmolding of polymer-metal hybrid structures: A review. *Polymer Engineering & Science*, 63(3), 691-722.
- [24] Nguyen S., Perez C. J., Desimone M., Pastor J. M., Tomba J. P., Carella J. M.: Adhesion control for injection overmolding of elastomeric propylene copolymers on polypropylene. Effects of block and random microstructures. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 46, 44–55 (2013).
- [25] BOROS, Róbert; RAJAMANI, P. Kannan; KOVACS, Jozsef Gabor. Combination of 3D printing and injection molding: Overmolding and overprinting. *Express Polymer Letters*, v. 13, n. 10, 2019.
- [26] GRUJICIC, Mica. Injection Overmolding of Polymer–Metal Hybrid Structures. *Joining of Polymer-Metal Hybrid Structures: Principles and Applications*, p. 277-305, 2018.
- [27] PARODI, Emanuele; PETERS, Gerrit WM; GOVAERT, Leon E. Structure-properties relations for polyamide 6, Part 2: Influence of processing conditions during injection moulding on deformation and failure kinetics. **Polymers**, v. 10, n. 7, p. 779, 2018.
- [28] HORN, R., & TRACZ, S. "Surface Modification for Improved Adhesion in Polymer-Wood Composites." *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 82, no. 10, 2001, pp. 2495-2502.

- [29] Gogos, C. G., Huang, C. F., & Schmidt, L. R. (1986). The process of cavity filling including the fountain flow in injection molding. *Polymer Engineering & Science*, 26(20), 1457-1466.
- [30] Disponível em: <https://www.ptonline.com/articles/understanding-fountain-flow-in-injection-molding>. Acesso em 15/02/2026.
- [31] Gardner, D. J., Blumentritt, M., Wang, L., & Yildirim, N. (2015). Adhesion theories in wood adhesive bonding. *Progress in adhesion and adhesives*, 125-168.
- [32] C.R. Frihart, Adhesive groups and how they relate to the durability of bonded wood. *J. Adhesion Sci. Technol.* 23, 601–617 (2009).
- [33] Frihart, C. R., & Hunt, C. G. (2010). Adhesives with Wood Materials: Bond Formation and Performance. In: Wood Handbook – Wood as an Engineering Material (Chapter 10). General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- [34] A.N. Gent and C.W. Lin, Model studies of the effect of surface roughness and mechanical interlocking on adhesion. *J. Adhesion* 32, 113–125 (1990).
- [35] CANTO, Leonardo B. *Estruturas Híbridas e Polímero-Metal* [Slides]. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2024. Não disponível para compartilhamento.
- [36] PIZZl, A. Wood Adhesives: Chemistry and Technology. CRC Press, 2013.
- [37] H.A. Essawy and H.A. Mohamed, Poly (amidoamine) dendritic structures, bearing different end groups as adhesion promoters for urea-formaldehyde wood adhesive system. *J. Appl. Polym. Sci.* 119, 760–767 (2011).
- [38] HEMINGWAY, R. W., HILLIS, W. E., & SELL, J. *Wood Adhesives: Chemistry and Technology*. CRC Press, 1987.

- [39] Muniz, F. R., Santucci, B. S., Aguiar, A. M., de Matos, J. W., & de Siqueira, L. (2023). QUALIDADE DA MADEIRA DE CLONES POLIPLOIDES DE EUCALIPTO. *O PAPEL*, 84(10), 58-65.
- [40] PAN, B. et al. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. *Measurement Science and Technology*, v. 20, n. 6, 2009.
- [41] SUTTON, M. A.; ORTEU, J.-J.; SCHREIER, H. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*. New York: Springer, 2009.
- [42] Disponível em: https://plastics-rubber.basf.com/global/en/performance_polymers/products/ultramid.html#text-1569176721. Acessado em 24/07/2024.
- [43] Evora, Maria C. et al. Comparação de técnicas FTIR de transmissão, reflexão e fotoacústica na análise de poliamida-6, reciclada e irradiada. *Polímeros*, v. 12, p. 60-68, 2002.
- [44] VARGAS, Rafael et al. Multi-window setup for thermomechanical experiments assisted by DIC up to 900° C. *Materials Research*, v. 27, p. e20240072, 2024.
- [45] LECLERC, Hugo et al. Correli 3.0. Iddn. fr, v. 1, n. 000, 2015.
- [46] Lubliner, J. (2008). *Plasticity Theory*. Mineola: Dover Publications.
- [47] Mendelson, A. (1968). *Plasticity: Theory and Application*. New York: Macmillan.
- [48] Hart-Smith, L. J. (2004). *Effect of secondary bending on strength prediction of composite single shear lap joints*. *Composites Science and Technology*, 65(6), 953–965.
- [49] EKH, Johan; SCHÖN, Joakim. Effect of secondary bending on strength prediction of composite, single shear lap joints. *Composites science and technology*, v. 65, n. 6, p. 953-965, 2005.

- [50] Lachowicz, H., Wojtan, R. & Kulak, P. Impact of location and forest habitat type on values of selected parameters and structural indices of wood fibres of silver birch (*Betula pendula* Roth.) in Poland. *Eur. J. Wood Prod.* **83**, 108 (2025).
- [51] Lozjanin, Radoslav, et al. "Anatomical Characteristics and Assessment of Wood Fiber Quality of Mature Pedunculate Oak (*Quercus robur* L.) Trees Grown in Different Environmental Conditions." *South-east European forestry: SEEFOR* 15.1 (2024): 51-57.
- [52] GARDNER, J. A. F.; HILLIS, W. E. The influence of extractives on the pulping of wood. In: *Wood extractives and their significance to the pulp and paper industries*. Academic Press, 1962. p. 367-403.