

**COMPORTAMENTO EXPERIMENTAL DE CONECTORES DE CISALHAMENTO
DO TIPO PERFOFRP REFORÇADOS COM FIBRAS DE CURAUÁ**

WALLAS BORGES ARAÚJO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**COMPORTAMENTO EXPERIMENTAL DE CONECTORES DE CISALHAMENTO
DO TIPO PERFOFRP REFORÇADOS COM FIBRAS DE CURAUÁ**

WALLAS BORGES ARAÚJO

ORIENTADOR: RODRIGO DE MELO LAMEIRAS
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

Brasília - DF
Setembro de 2023

**COMPORTAMENTO EXPERIMENTAL DE CONECTORES DE CISALHAMENTO
DO TIPO PERFOFRP REFORÇADOS COM FIBRAS DE CURAUÁ**

WALLAS BORGES ARAÚJO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO POR:

Prof. Rodrigo de Melo Lameiras, *Dr.* (ENC-UnB)
(Orientador)

Prof. Marcos Honorato de Oliveira, *Dr.* (ENC-UnB)
(Examinador Interno)

Prof. Glaucia Maria Dalfre, *Dr.* (UFSCAR)
(Examinador Externo)

Brasília – DF, 26 de setembro de 2023

FICHA CATALOGRÁFICA

ARAÚJO, WALLAS BORGES

Comportamento experimental de conectores de cisalhamento do tipo PERFOFRP reforçados com fibras de curauá. [Distrito Federal] 2023.

xxvi, 169 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2023).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Fibras Vegetais/Naturais;

2. Curauá;

3. Conector de Cisalhamento

I. ENC/FT/UnB

4. Ensaio *Push-out*;

5. Painéis de Parede Sanduíche;

6. Polímero Reforçado com Fibras (FRP)

II. Título (Mestre)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ARAÚJO, W. B. (2023). Comportamento experimental de conectores de cisalhamento do tipo PERFOFRP reforçados com fibras de curauá. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 169 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Wallas Borges Araújo

TÍTULO: Comportamento experimental de conectores de cisalhamento do tipo PERFOFRP reforçados com fibras de curauá.

GRAU: Mestre ANO: 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Wallas Borges Araújo
e-mail: wallasb85@gmail.com

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, aos meus amados pais Adelmir de Oliveira Araújo e Belonísia Cristina Borges Araújo, a minha amada avó Valdirene Alves de Sousa e à minha amada noiva Cintia Klésia Batista de Sousa. Obrigado pelo apoio inestimável ao longo desta jornada. Amo muito vocês!

AGRADECIMENTOS

Agradeço de coração a todas as pessoas que tornaram este mestrado possível:

Primeiramente, agradeço a Deus, a fonte de vida e sabedoria, por me guiar ao longo desta jornada.

Ao meu dedicado orientador, Rodrigo de Melo Lameiras, expresso minha profunda gratidão. Sua orientação, paciência e valiosas contribuições foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais, Adelmir de Oliveira Araújo e Belonísia Cristina Borges Araújo, dedico um agradecimento especial. Seu amor incondicional e apoio constante tornaram possível não apenas a conclusão deste mestrado, mas também todas as outras conquistas que alcancei ao longo da vida. À minha noiva, Cíntia Klésia Batista de Sousa, agradeço por seu carinho, amor e companheirismo inabaláveis ao longo desta jornada desafiadora. À minha avó, Valdirene Alves de Souza, que é uma fonte de força, coragem e união em nossa família. Agradeço por sua inspiração.

À minha família, em especial, aos meus irmãos Wallison Guilherme e Juliana Borges, aos meus primos Pedro Paulo, Maria Betânia, Júlia Sabrina, Maria Eduarda e Maria Cecília, aos meus tios Pedro Borges, Romênia Ramalho, Rauslhey Carneiro e Betânia Borges, ao meu cunhado Ítalo Tiago, à minha cunhada Emilly Medeiros e ao meu avô Hilton de Jesus e a minha tia Sirene Souza, meu sincero agradecimento. O apoio e incentivo de todos vocês foram fundamentais para esta conquista.

Agradeço de maneira especial ao meu amigo e colega de trabalho, John Kennedy, por sua valiosa amizade e pela prontidão em oferecer ajuda sempre que necessário. Sua parceria constante e valiosos insights foram muito importantes. Também gostaria de expressar minha gratidão ao meu conterrâneo, Lincoln Araújo, por sua generosidade em compartilhar diálogos valiosos e pelas contribuições inestimáveis. A contribuição de vocês foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Aos amigos e colegas do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC), expresso minha gratidão pelas risadas, aventuras e lágrimas compartilhadas ao longo desta jornada desafiadora. Em particular, quero agradecer a Paulo Fernando, Jonas Falcão, Fernanda Medeiros, Pedro Paulo, Larissa Mota, Éder Leonardo, Mateus Galvão, Geovanna Andrade, Layane Silva, Raí Luz, Jéssica Siqueira, Iago Almeida, Calos Valdson, Augusto Pippi, Izabel Castro, Yuri Sotero, Mara Monalisa, Ana Luiza e a todos os outros meus amigos e colegas que não foram mencionados aqui. De toda maneira, agradeço a todos vocês que

estiveram ao meu lado, compartilhando conhecimento e experiências, tornando esta jornada acadêmica mais enriquecedora.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus chefes e amigos de trabalho, com destaque especial para Bruna Rodrigues e Cíntia Liz. Agradeço a ambos por acreditarem em mim, por me proporcionarem oportunidades valiosas e por oferecerem um apoio constante ao longo da minha jornada. Além disso, desejo expressar também a minha gratidão a um grupo de amigos especiais que me acompanharam ao longo deste desafiador percurso, oferecendo apoio tanto no ambiente de trabalho quanto em nossa convivência fora dele. A Amanda Romano, Francieli Vieira, Ayomikun Oluleke, Mateus Nunes, Érica Nóbrega, Geyza Gomes, Rui Vieira, Tamara de Souza, Waleska Terra, Yann Uatanabi, Bruno Castro, Camila Padovan, Pedro Henrique, Jorge Sarkis, Breno Figueiredo, Carla Bozzi, Geovany Barroso, Ígor Oliveira, Juliana Alarcón, Mateus Lima, Leonardo Moraes, e a todos os outros cujo apoio foi essencial. Vocês desempenharam um papel crucial nesta jornada e por isso, meu sincero agradecimento a cada um de vocês.

Aos coordenadores de laboratório, Prof. Marcos Honorato, Prof. Elton Bauer, Prof. Fábio Castro e Prof^a. Sônia Bao, agradeço pelo suporte valioso. Aos técnicos de laboratório, Sr. Magno, Patrícia e Gabriel, expressei minha gratidão por toda a assistência nas atividades de laboratório.

Aos professores que compuseram a banca de avaliação, Prof. Marcos Honorato e Prof^a. Gláucia Maria, agradeço por aceitarem o convite e por suas valiosas contribuições que certamente enriquecerão o texto final desta dissertação.

A todos, meu mais sincero agradecimento. O apoio de vocês foi fundamental para esta conquista.

Com gratidão,

Wallas Borges Araújo

RESUMO

Este estudo apresenta um avanço significativo no desenvolvimento de soluções sustentáveis para conectores de painéis sanduíche de parede pré-moldados. Ao contrário de pesquisas anteriores que se concentraram em resolver o problema gerado pelas pontes térmicas causadas pelos conectores metálicos, o que prejudica a eficiência energética das habitações, este trabalho pioneiro teve como objetivo avaliar o comportamento mecânico de conexões utilizando conectores de Polímero Reforçado com Fibras Curtas de Curauá (CuFRP). Uma das principais inovações consistiu na substituição das fibras de vidro, amplamente utilizadas, por fibras vegetais de curauá, com o objetivo de reduzir o impacto ambiental associado à produção desses conectores. Essas fibras são provenientes de fontes renováveis e requerem baixo consumo energético em seu processo de obtenção. É importante ressaltar que nenhum estudo anterior investigou o uso de fibras vegetais na fabricação desses conectores, tornando esta pesquisa pioneira nesse sentido. O comportamento das conexões foi determinado e comparado com conexões produzidas com conectores perfurados de polímero reforçado com fibras de vidro (PERFOGFRP), levando em consideração a capacidade de carga e a ductilidade. Os resultados dos ensaios *push-out* demonstraram que as conexões com conectores perfurados de CuFRP, ou melhor, conectores PERFOCuFRP apresentaram resistências ao cisalhamento variando de 84,82% a 41,17% das resistências obtidas com os conectores PERFOGFRP. Além disso, essas conexões apresentaram maior deslocamento correspondente a carga de pico e menor rigidez em comparação com conexões similares testadas anteriormente. Embora apresentem capacidades de carga e rigidezes inferiores, as conexões feitas com conectores do tipo PERFOCuFRP podem ser uma alternativa viável aos conectores atualmente utilizados, desde que haja adaptações no dimensionamento. Por exemplo, enquanto um painel sanduíche de 8,00 m x 3,00 m requer o uso de 0,52 m de conectores PERFOGFRP para atingir a mesma capacidade resistente. Por outro lado, se forem utilizados conectores PERFOCuFRP, o mesmo painel exigirá 0,62 m de conectores. Isso representa um aumento de 20% na quantidade de conectores necessários quando se opta pela utilização dos conectores estudados no presente trabalho em vez dos fabricados com GFRP.

Palavras-chave: Fibras Vegetais/Naturais; Curauá; Conector de Cisalhamento; Ensaio *Push-out*; Painéis de Parede Sanduíche; Polímero Reforçado com Fibras (FRP).

ABSTRACT

This study represents a significant advancement in the development of sustainable solutions for precast wall sandwich panel connectors. Unlike previous research that focused on addressing the issue of thermal bridges caused by metal connectors, which impairs the energy efficiency of buildings, this pioneering work aimed to evaluate the mechanical behavior of connections using connectors made of Short Curauá Fiber Reinforced Polymer (CuFRP). One of the main innovations involved replacing widely used glass fibers with plant-based curauá fibers, with the goal of reducing the environmental impact associated with the production of these connectors. These fibers come from renewable sources and require low energy consumption in their extraction process. It's important to note that no previous study investigated the use of plant-based fibers in the manufacturing of these connectors, making this research groundbreaking in this regard. The behavior of the connections was determined and compared with connections produced using perforated Glass Fiber Reinforced Polymer connectors (PERFOGFRP), considering load-carrying capacity and ductility. The *push-out* test results demonstrated that connections with perforated CuFRP connectors, or rather, PERFOCuFRP connectors, exhibited shear strengths ranging from 84.82% to 41.17% of the strengths obtained with PERFOGFRP connectors. Furthermore, these connections displayed higher displacement corresponding to peak load and lower stiffness compared to similar connections tested previously. Although they exhibit lower load capacities and stiffness, connections made with PERFOCuFRP connectors can be a viable alternative to the currently used connectors, provided that adaptations in design are made. For instance, while an 8.00 m x 3.00 m sandwich panel requires the use of 0.52 m of PERFOFRP connectors to achieve the same load-carrying capacity, if PERFOCuFRP connectors are used, the same panel would require 0.62 m of connectors. This represents a 20% increase in the quantity of required connectors when opting for the connectors studied in this work as opposed to those manufactured with GFRP.

Keywords: Natural/Vegetable Fibers; Curauá; Shear Connector; *Push-out* Test; Sandwich Wall Panels; Fiber-Reinforced Polymer (FRP).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Painéis Sanduíche: a) painel em produção e esquema do posicionamento do conector PERFOFRP no painel (dimensões em mm); b) painel pré-fabricado içado na fase de construção. Adaptado de Lameiras <i>et al.</i> (2021).....	19
Figura 2 - Representação esquemática do processo de infusão à vácuo (SILVA, 2016)	24
Figura 3 - a) Manta de fibra de vidro, com fibras picadas e dispersas aleatoriamente; b) Tecido de fibra de vidro, com fibras contínuas e orientadas. Adaptado de Advanced Vacuum (2015)	25
Figura 4 - a) Curauá de cor roxa com folhas roxas-avermelhadas e b) Curauá de cor branca com folhas verde claras (SOLTAN <i>et al.</i> , 2017)	40
Figura 5 - Cisalhamento longitudinal em um painel sanduíche submetido à flexão. Adaptado de Naito <i>et al.</i> (2012)	47
Figura 6 – Conectores de cisalhamento para painéis de parede sanduíche: (a) grade de GFRP; (b) pino composto de GFRP; (c) pino não composto de GFRP; (d) barra de GFRP; (e) barra de BFRP; (f) treliça retangular de aço galvanizado; (g) treliça triangular de aço galvanizado; (h) clipe em formato “M” de aço galvanizado; (i) clipe em formato de “C” de aço galvanizado; (j) grade de CFRP; (k) treliça triangular de aço 1008. Adaptado de Silva (2020) e Naito (2012).	48
Figura 7 – Configuração do ensaio de <i>push-out</i> . Adaptado de Lameiras (2015).....	57
Figura 8 – Conectores de cisalhamento de GFRP perfurados e configuração do ensaio de <i>push-out</i> : (a) conector perfurado em formato de placa plana; (b) conector perfurado em formato de placa corrugada; (c) conector perfurado em formato de tudo hexagonal; (d) sistema de ensaio; (e) conector com rupturas inclinadas na região de contato com isolamento. Adaptado de Huang e Dai (2019).	59
Figura 9 – Sistema de produção de compósitos de baixo custo por meio de infusão de resina à vácuo: (a) materiais para infusão de resina à vácuo sobre bancada; (b) Sistema de infusão de resina à vácuo parcialmente pronto para uso. Adaptado de Silva (2020).....	60
Figura 10 – Configuração do ensaio de <i>push-out</i> . Adaptado de Silva (2020).....	61
Figura 11 – Procedimento Experimental. Fonte Autor (2023).....	67
Figura 12 - a) fibras de curauá em seu estado natural conforme recebimento e b) dessemanhadas. Fonte: Autor (2023)	68

Figura 13 – Etapas de processamento inicial das fibras: (a) materiais para tratamento químico; (b) tratamento químico em solução de 5% (m/v) de NaOH; (c) lavagem das fibras em água destilada e (d) separação das fibras para imersão em tanque de água destilada. Fonte: Autor (2023)	70
Figura 14 – Espalhamento de fibras em água destilada para fabricação das mantas de fibras de curauá. Fonte: Autor (2023)	71
Figura 15 – Processo de fabricação das mantas de fibras longas. Fonte Autor (2023)	71
Figura 16 – Sistema de infusão de resina à vácuo. Fonte: Autor (2023).....	73
Figura 17 – etapas de montagem da bolsa de infusão para fabricação do compósito laminado. Fonte: Autor (2023).....	76
Figura 18 – Ensaio para a determinação da resistência à tração. Fonte: Autor (2023)	79
Figura 19 – Representação esquemática da determinação do módulo de elasticidade e da deformação da ruptura	80
Figura 20 - Processo de avaliação da qualidade de produção e classificação das chapas	82
Figura 21 - Dimensões e geometria do corpo de prova para ensaio de tração de resina poliéster. Adaptado de ASTM D638 (2022)	85
Figura 22 - Ensaio para a determinação da resistência à tração. Fonte: Autor (2023).	85
Figura 23 - Conector de cisalhamento com fibras de curauá dispostas aleatoriamente (medidas em mm). Fonte: Autor (2023).....	87
Figura 24 - Modelos representativos de painéis de parede tipo sanduíche confeccionados para ensaio <i>push-out</i> (medidas em mm). Adaptado de Silva (2020) e Huang e Dai (2019)....	88
Figura 25 – (a) Placas de EPS com conectores embebidos e; (b) formas de madeira para concretagem dos espécimes de concreto. Fonte: Autor (2023).....	89
Figura 26 – Configuração do ensaio <i>push-out</i> (medidas em mm). Fonte: Autor (2023)	91
Figura 27 – Curva tensão <i>versus</i> deformação das amostras retiradas das chapas: a) “CH14”; b) “CH24”; c) “CH15”; d) “CH25”; e) “CH35”; f) “CH16”; g) “CH26”. Fonte: Autor (2023)	94
Figura 28 - Curva tensão <i>versus</i> deformação das amostras retiradas dos laminados de CuLFRP: a) “CHFT”; b) “CHFNT”. Fonte: Autor (2023)	95
Figura 29 - Curva tensão <i>versus</i> deformação das amostras de resina poliéster. Fonte: Autor (2023).....	95

Figura 30 - Gráficos de: a) tensão última à tração; b) módulo de elasticidade; c) proporção de fibras das chapas e; d) deformação na ruptura dos compósitos CuFRP e resina RP. Fonte: Autor (2023).....	100
Figura 31 - Gráficos de: a) tensão última à tração; b) módulo de elasticidade; c) proporção de fibras e; d) deformação na ruptura dos compósitos CuLFRP e resina RP. Fonte: Autor (2023).....	101
Figura 32 – Histogramas de distribuição normal das propriedades de tensão última à tração (a), (b) e (c); módulo de elasticidade (d), (e) e (f); proporção de fibras (g), (h) e (i). Fonte: Autor (2023).....	108
Figura 33 – Valores médios das propriedades das chapas separadas por gramatura nominal. a) tensão última à tração; b) módulo de elasticidade e; c) proporção de fibras.	110
Figura 34 - histogramas de distribuição normal das propriedades de tensão última à tração (a); módulo de elasticidade (b) e proporção de fibras (c). Fonte: Autor (2023)	114
Figura 35 - histogramas de distribuição normal das propriedades de tensão última à tração (a); módulo de elasticidade (b) e proporção de fibras (c). Fonte: Autor (2023).	120
Figura 36 - Curvas de carga versus deslocamento de cada espécime de concreto.	130
Figura 37- Curvas de carga <i>versus</i> deslocamento dos espécimes separados por conectores do grupo nominal: GN1 (a); GN2 (b) e GN3 (c). Fonte: Autor (2023)	131
Figura 38 – Padrões de fissuração dos conectores PERFOCuFRP dos espécimes (a) ESC-GN1; (b) ESC-GN2 e (c) ESC-GN3. Fonte: Autor (2023)	135
Figura 39 - Gráfico de carga <i>versus</i> deslocamento relativo das conexões dos conectores PERFOCuFRP e PERFOGFRP com concreto.....	137
Figura 40 – Gráficos da espessura (mm) acompanhado das barras de erro e carregamento último (kN) dos conectores em função da gramatura nominal (g/m^2) dos conectores embebido nos espécimes de concreto.	138
Figura 41 – carregamento último <i>versus</i> gramatura nominal adotada para os conectores	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas de algumas fibras usuais utilizadas como reforço em compósitos.....	28
Tabela 2 - Propriedades típicas de alguns polímeros.	29
Tabela 3 – Resultado do ensaio de tração em resina poliéster	29
Tabela 4 - Propriedades de alguns compósitos laminados.	30
Tabela 5 - Espessura, tensão última à tração e fração volumétrica de GFRP.	32
Tabela 6 – Propriedades mecânicas de compósitos reforçados com fibras vegetais....	35
Tabela 7 - Propriedades mecânicas de algumas fibras vegetais comparada com a fibra de vidro-E.....	36
Tabela 8 - Composição química e absorção de umidade de algumas fibras vegetais. .	37
Tabela 9 – Compósitos reforçados com fibras de curauá.....	45
Tabela 10 - Resultado dos ensaios <i>push-out</i> realizados conforme autoria.	62
Tabela 11 - Espessura, tensão última à tração, proporção de fibras e deformação na ruptura.	96
Tabela 12 - Erros padrões separado por propriedade	101
Tabela 13 – Classificação dos coeficientes de variação entre amostras de uma mesma chapa.....	102
Tabela 14 – Teste de normalidade de Anderson-Darling entre amostras de uma mesma chapa.....	103
Tabela 15 - Espessura, proporção de fibras, tensão última à tração, módulo de elasticidade e coeficientes de variação para chapas de mesma gramatura nominal.....	111
Tabela 16 - classificação dos coeficientes de variação entre amostras de chapas de mesma gramatura nominal	111
Tabela 17 - Teste de normalidade de Anderson-Darling para amostras de chapas de mesma gramatura nominal	112
Tabela 18 - ANOVA realizada para os grupos nominais CH-GN1, CH-GN2 e CH-GN3	115
Tabela 19 - Testes Simultâneos de Tukey para as diferenças de médias do grupo nominal CH-GN2	116
Tabela 20 - Espessura, proporção de fibras, tensão última à tração, módulo de elasticidade e coeficientes de variação para chapas de mesma gramatura nominal.....	118
Tabela 21 - classificação considerando todas as chapas	118

Tabela 22 - Teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov entre amostras de chapas de mesma gramatura nominal	119
Tabela 23 - ANOVA realizada entre amostras de chapas de gramaturas nominais diferentes	121
Tabela 24 – Testes Simultâneos de Tukey entre as médias das chapas CuFRP	122
Tabela 25 - Testes Simultâneos de Tukey entre diferentes grupos nominais.....	123
Tabela 26 - Testes Simultâneos de Tukey entre as médias das chapas CuFRP em um cenário ideal vs. o resultado do cenário obtido.	125
Tabela 27 - Testes Simultâneos de Tukey entre diferentes grupos nominais em um cenário ideal vs. o resultado do cenário obtido	126
Tabela 28: Resultado dos ensaios <i>push-out</i> realizados.....	132
Tabela 29 – Comparativo em termos percentuais entre os resultados dos espécimes	141
Tabela 30 - Tabela de comparativo dos resultados dos ESC-GN3	145
Apêndice A - Resultados individuais dos ensaios de tração nos compósitos.....	165
Apêndice B - Resultados individuais dos ensaios <i>push-out</i>	168

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1. Objetivos gerais	21
1.2. Objetivos específicos	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1. Compósitos poliméricos	23
2.1.1. Fibras sintéticas.....	24
2.1.2. Matrizes	28
2.2. Compósitos poliméricos reforçados com fibras sintéticas	30
2.2.1. Desenvolvimento de compósitos reforçados com fibras de vidro para conectores PERFOFRP	31
2.3. Compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais	33
2.3.1. Fatores de desempenho dos compósitos com fibras vegetais	36
2.3.2. Características fundamentais da fibra vegetal no desempenho do compósito	36
2.3.3. Compósitos poliméricos reforçados com fibras de curauá	39
2.4. Painéis de paredes sanduíche de concreto pré-moldado/protendido	46
2.5. Conectores de cisalhamento	47
2.6. Conectores de cisalhamento reforçado com fibras	48
2.6.1. Conectores de aço	50
2.6.2. Conectores de BFRP	50
2.6.3. Conectores de CFRP	51
2.6.4. Conectores de GFRP	52
2.6.5. Conectores PERFOFRP	56
2.6.6. Conectores PERFOCuFRP	62
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	65
3.1. Primeira etapa	68
3.1.1. Processamento inicial das fibras	68

3.1.2.	Fabricação das mantas de curauá.....	70
3.1.3.	Produção dos compósitos.....	72
3.1.4.	Ensaio de tração dos compósitos	78
3.1.5.	Avaliação da qualidade e classificação dos compósitos.....	81
3.1.6.	Ensaio de tração da resina poliéster.....	84
3.2.	Segunda etapa	86
3.2.1.	Produção de conectores PERFOCuFRP	86
3.2.2.	Confecção dos corpos de prova de concreto.....	87
3.3.	Terceira etapa	90
3.3.1.	Ensaio push-out.....	90
3.3.2.	Padrões de fissuração.....	92
4.	RESULTADOS.....	92
4.1.	Ensaio de tração dos compósitos e da resina.....	92
4.2.	Avaliação da qualidade e classificação dos compósitos.....	102
4.2.1.	Entre amostras de uma mesma chapa	102
4.2.2.	Entre amostras de chapas de mesma gramatura nominal	109
4.2.3.	Entre amostras de chapas de gramaturas nominais diferentes.....	117
4.3.	Ensaio de <i>push-out</i>	126
4.3.1.	Comportamento carregamento versus deslocamento	126
4.3.2.	Capacidade de carga última, deslocamento correspondente ao pico e rigidez inicial.	132
4.3.3.	Padrões de fissuração.....	133
4.3.4.	Efeito da variação da quantidade de fibras no conector	137
4.3.5.	Conectores PERFOCuFRP versus conectores PERFOGFRP	142
5.	CONCLUSÕES.....	149
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	153
	APÊNDICE A.....	165

APÊNDICE B	168
APÊNDICE C	168

1. INTRODUÇÃO

Os painéis de parede de concreto pré-moldado, comumente conhecidos como painéis sanduíche, são compostos por duas camadas externas de concreto, entre as quais é inserida uma camada de isolamento. Estas camadas são interligadas por meio do uso de conectores, que podem ser feitos de polímeros reforçados com fibras ou materiais metálicos, como apresentado na Figura 1. Os conectores metálicos são comumente utilizados neste sistema construtivo para garantir a integridade dos painéis, mas também criam pontes térmicas que reduzem a eficiência energética (MCCALL, 1985; TOMLINSON; FAM, 2014).

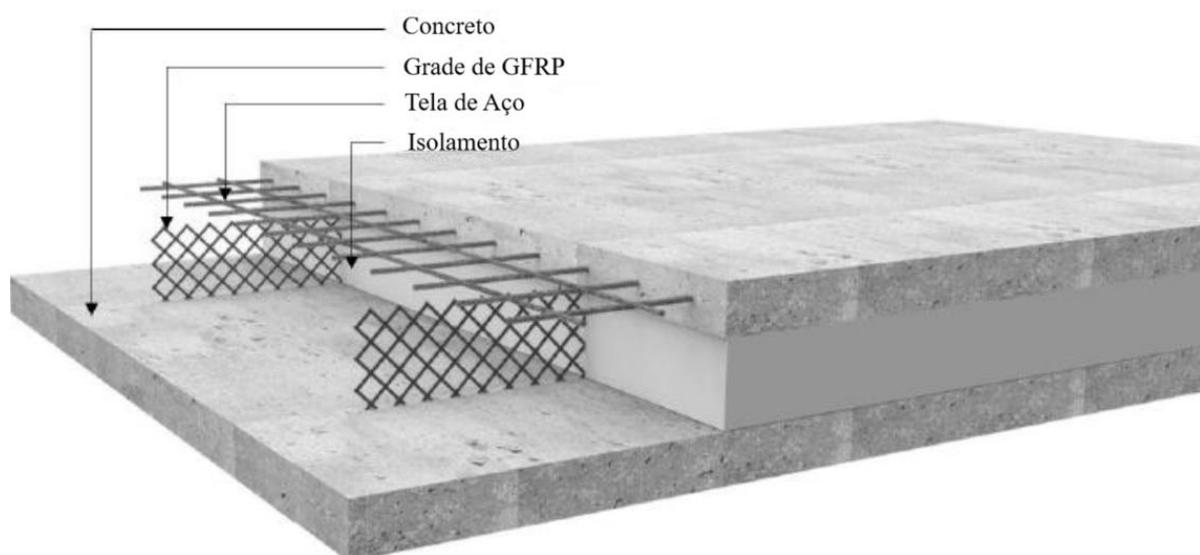


Figura 1 – Painel de parede sanduíche com conector tipo Grade de GFRP. Adaptado de Lameiras (2015) e Kim e You (2015).

Para resolver esse problema, estudos têm sido realizados com conectores de polímero reforçado com fibras, do inglês, *Fibre Reinforced Polymer* (FRP), tais como basalto, do inglês, *Basalt Fibre Reinforced Polymers* (BFRP), carbono, do inglês, *Carbon Fibre Reinforced Polymers* (CFRP) e vidro, do inglês, *Glass Fibre Reinforced Polymers* (GFRP) (LAMEIRAS *et al.*, 2012, 2013a, 2013b, 2015, 2018a, 2018b, 2021; TOMLINSON; TEIXEIRA; FAM, 2016; KAZEM *et al.*, 2018; O'HEGARTY *et al.*, 2019; SILVA; RIBEIRO; XIE *et al.*, 2022; HUANG *et al.*, 2023). Diante disso, uma solução promissora são os conectores de base polimérica, que apresentam baixa condutividade térmica. Entre eles, destacam-se os conectores perfurados, fabricados com polímeros reforçados com fibra de vidro, do inglês, *Fibre Reinforced Polymer Perforated* (PERFOFRP). Os conectores de cisalhamento perfurados de GFRP, conhecidos

como PERFOFRP, foram propostos por Lameiras (2013a, 2013b, 2016, 2018a, 2018b, 2021). Esse conectores consistem em laminados de polímero reforçados com fibra de vidro com perfurações, que aumentam a capacidade de carga e ductilidade da ligação (LAMEIRAS, 2015). Estudos conduzidos pelo programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) da Universidade de Brasília (UnB) mostraram a eficácia desses conectores na eliminação das pontes térmicas e na melhoria da eficiência energética dos painéis sanduíche de concreto (DE OLIVEIRA, 2023). A Figura 2 ilustra um modelo representativo em escala real dos painéis de parede sanduíche.

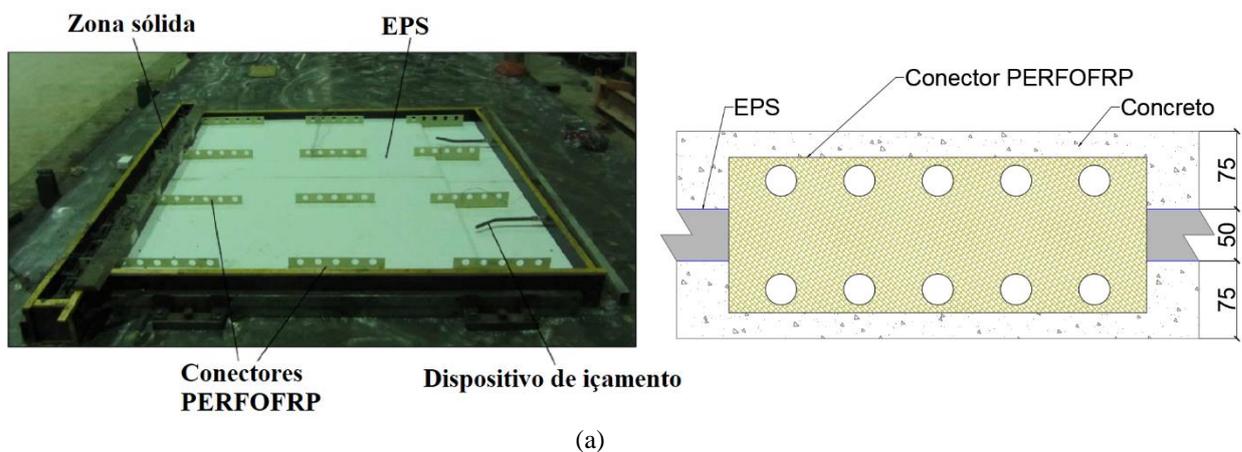


Figura 2 – Painéis Sanduíche: a) painel em produção e esquema do posicionamento do conector PERFOFRP no painel (dimensões em mm); b) painel pré-fabricado içado na fase de construção. Adaptado de Lameiras *et al.* (2021)

Estudos conduzidos por Huang e Dai (2019) investigaram a performance de diferentes tipos de conectores GFRP (chapa plana, chapa ondulada e tubo hexagonal) em aplicações para

painéis de parede sanduíche. Os resultados indicaram um desempenho superior dos conectores perfurados do tipo placa em comparação com os convencionais de aço. Além disso, de acordo com a pesquisa realizada por Silva (2020) e Silva, Ribeiro e Lameiras (2021), ensaios de *push-out* demonstraram que os conectores PERFOFRP exibem menor deslocamento relativo, maior rigidez e resistência ao cisalhamento quando comparados aos conectores não perfurados. Comparativamente, os conectores perfurados apresentam deslocamento relativo variando de -31% a 1%, ganhos de rigidez oscilando entre 9% e 88%, e incrementos na resistência que variam de 8% a 25%, dependendo do diâmetro e espaçamento entre os furos utilizados.

No entanto, a maioria dos estudos sobre conectores FRP tem utilizado materiais de fontes não renováveis, que consomem uma quantidade significativa de energia no processo de produção da fibra, desafiando assim a sustentabilidade dos sistemas construtivos (SALMON *et al.*, 1997; LAMEIRAS *et al.*, 2012, 2013a, 2013b, 2015, 2018a, 2018b, 2021; WOLTMAN; TOMLINSON; FAM, 2013; TOMLINSON; FAM, 2014; HODICKY *et al.*, 2015; TOMLINSON; TEIXEIRA; FAM, 2016; WOLTMAN; NOEL; FAM, 2017; KAZEM *et al.*, 2018; HUANG; DAI, 2019; O'HEGARTY *et al.*, 2019; SILVA, 2020; SILVA; RIBEIRO; XIE *et al.*, 2022; HUANG *et al.*, 2023).

Para reduzir o impacto ambiental, alguns estudos têm sido realizados com fibras vegetais em compósitos, como as fibras de curauá, por apresentarem resistência à tração superior às demais fibras vegetais, tais como as provenientes do coco, sisal e juta. O curauá, uma planta nativa da região amazônica, tem-se mostrado promissora nesse contexto. Sendo assim, os compósitos reforçados com fibras de curauá demonstram melhor desempenho mecânico em comparação com outros compósitos reforçados com fibras vegetais. (ZAH *et al.*, 2007; KU *et al.*, 2011; VENKATARAJAN; ATHIJAYAMANI, 2021). Esses compósitos reforçados com fibras de curauá têm sido estudados em diversas áreas, tais como: indústria naval, automotiva e têxtil (ZAH *et al.*, 2007; NAGAVALLY, 2017). Entretanto, no setor da construção civil, as fibras de curauá ainda são pouco exploradas em componentes estruturais, havendo poucos estudos sobre o reforço de compósitos cimentícios (PICANCO, 2005; D'ALMEIDA; TOLEDO FILHO; MELO FILHO, 2010; SOLTAN *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2018; TEIXEIRA *et al.*, 2019; TEIXEIRA; DE ANDRADE SILVA, 2020). No entanto, até o presente momento, nenhum estudo anterior investigou o uso de fibras vegetais na fabricação de conectores de cisalhamento.

O uso de conectores de cisalhamento reforçados com fibras vegetais de curauá é uma alternativa promissora, uma vez que as fibras de curauá apresentam desempenho mecânico superior às demais fibras vegetais disponíveis, requer menos energia e recursos em seu

processamento quando comparado com alternativas convencionais, são de fonte de origem renovável, e tem o potencial de fomentar a geração de renda para pequenas comunidades locais.

Com base nessas considerações, o presente trabalho apresenta um inovador conector de cisalhamento para painéis de parede sanduíche, fabricados com compósitos poliméricos perfurados reforçados com fibra de curauá. O conector proposto, doravante denominado conectores PERFOCuFRP, tem as vantagens inerentes aos convencionais conectores PERFOFRP, além de ser feito de um material renovável e mais sustentável. Neste trabalho, o comportamento mecânico dos compósitos de polímero reforçado com fibras curtas de curauá (CuFRP) foi avaliado sob ensaios de tração direta e os conectores PERFOCuFRP × conexões de concreto foram avaliados experimentalmente sob ensaios de *push-out*. Este ensaio permitiu avaliar a capacidade de carga, rigidez e modos de falha dos conectores PERFOCuFRP × conexões de concreto. Além disso, os resultados obtidos foram comparados com os resultados de conectores de cisalhamento PERFOGFRP convencionais previamente avaliados pelo grupo de pesquisa *Composite Materials for Resilient and Sustainable Structures* (CMRSS), da Universidade de Brasília (UnB) (SILVA, 2020; SILVA; RIBEIRO; LAMEIRAS, 2021).

1.1. Objetivos gerais

O objetivo geral consiste em estudar o comportamento de conectores PERFOFRP produzidos com fibras de curauá, por meio de ensaios *push-out* com protótipos de painéis de paredes pré-moldadas de concreto com isolamento conectado.

1.2. Objetivos específicos

- Desenvolver um sistema de produção de mantas para infusão de resina à vácuo, utilizando fibras curtas de curauá, por meio de um processo inovador de baixo custo;
- Avaliar o efeito do aumento da quantidade de fibras na resistência à tração e módulo de elasticidade dos compósitos com mantas de fibras curtas de curauá (CuFRP) produzidos por meio do processo de infusão de resina à vácuo;
- Avaliar o efeito do tratamento químico aplicado nas fibras por meio da determinação das propriedades de resistência à tração e módulo de elasticidade dos compósitos produzidos com mantas de fibras longas de curauá (CuLFRP) também produzidos por infusão de resina à vácuo;

- Avaliar a qualidade dos compósitos CuFRP entre amostras constituídas de uma mesma chapa, entre amostras de chapas de mesma gramatura nominal e entre amostras de chapas de gramaturas nominais diferentes.
- Avaliar o comportamento das conexões conector PERFOFRP × concreto moldados com mantas de fibras curtas de curauá (PERFOCuFRP) submetidas ao ensaio de cisalhamento duplo (*push-out*);
- Comparar conectores produzidos no formato de placas fabricado com fibras sintéticas e conectores de mesmo formato fabricado com fibras curtas de curauá (vegetais).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Compósitos poliméricos

Um material compósito (ou composto) é dado pelo conjunto de dois ou mais materiais diferentes, combinados em escala macroscópica, para funcionarem como uma unidade. A combinação dos diferentes materiais proporciona um conjunto de propriedades diferentes dos materiais analisados individualmente.

Os compósitos estruturais são obtidos com a implementação de um reforço (fibra) em uma determinada matriz, resultando em um material sólido e de geometria definida. O processamento dos compósitos, ou moldagem, é determinado pelo tipo de matéria prima, tipo de reforço e matriz, além da geometria do componente que será obtido no final do processo. O processamento pode ser dado pelo tipo de matriz utilizada e pelo tipo de processo empregado para a obtenção do compósito (MOURA; MORAIS; MAGALHÃES, 2010).

Os materiais poliméricos são os mais utilizados para a fabricação de compósitos devido a sua simplicidade de processamento. Esses materiais não exigem elevadas temperaturas e pressões na sua fase de manufatura. Devido a esses fatores, o custo desses materiais se torna relativamente mais baixo, quando comparado com os compósitos de matrizes metálicas ou cerâmicas. Os processos de fabricação dos compósitos correspondem a uma grande parcela do custo do produto final, por esse motivo esses materiais ganham mais atenção na comunidade industrial e científica (NETO; PARDINI, 2006). Diversos são os tipos de processamento materiais compósitos encontrados na literatura. Entre os mais usuais:

- a) Moldagem manual (do inglês, *Hand-Lay-Up*);
- b) Moldagem por aspersão (do inglês, *Spray-Up*);
- c) Moldagem à vácuo (do inglês, *Vacuum Bag*) e;
- d) Pultrusão (do inglês, *Pultrusion*).

Segundo Marinucci (2011), alguns processos de moldagem ainda empregam a tecnologia de fibras pré-impregnadas, do inglês, *Pre-Impregnated (Prepregs)*. As fibras desses materiais são impregnadas, em proporções definidas de massa, com um polímero antes mesmo do processo de moldagem. Entre os métodos mais usuais:

- e) Moldagem em autoclave;
- f) Moldagem por compressão e
- g) Moldagem por transferência de resina, do inglês, *Resin Transfer Molding (RTM)*.

Dentre os métodos mencionados, destaca-se o processo de moldagem a vácuo com o uso de uma bomba, que se destaca por sua eficiência na remoção do excesso de resina e bolhas

de ar. Esse método não compromete as propriedades mecânicas dos compósitos e ainda proporciona um acabamento superior para a peça compósita, o que estimula sua aplicação. A moldagem a vácuo consiste na aplicação de vácuo enquanto a resina é injetada, como ilustrado na Figura 1. É importante ressaltar que o reforço deve ser inserido previamente, com uso de molde ou não, conforme indicam as referências bibliográficas de Lopes (2009), Caldas (2014) e Silva (2020).

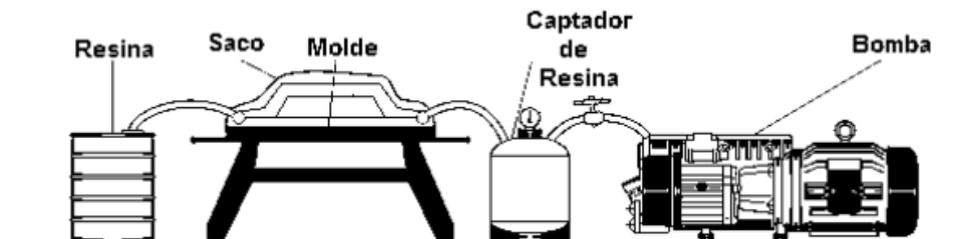


Figura 3 - Representação esquemática do processo de infusão à vácuo (SILVA, 2016)

A resistência mecânica dos compósitos reforçados depende de diversos fatores, tais como o tipo de fibra e matriz utilizada, bem como a orientação, fração volumétrica e adesão superficial das fibras com a matriz (ANGRIZANI *et al.*, 2006; KOOHESTANI *et al.*, 2019). Para compreender de forma mais aprofundada o comportamento dos compósitos poliméricos reforçados com fibras, é fundamental conhecer seus principais constituintes e características que determinam suas propriedades mecânicas.

2.1.1. Fibras sintéticas

Entre os diferentes tipos de fibras sintéticas disponíveis comercialmente, devido às suas diversas aplicações, destacam-se as fibras de vidro, basalto, carbono e aramida. As fibras sintéticas podem ser encontradas em várias formas e configurações, como as mantas de fibra picada, do inglês, *Chopped Strand Mat* (CSM) e como os tecidos de fibra. As mantas de fibra picada (CSM) é caracterizada por ser composta por fibras curtas e com direções aleatórias. Essas fibras são dispersas e aglutinadas em uma matriz, formando uma estrutura não-tecida. Por outro lado, os tecidos de fibra são compostos por fibras longas e com direções definidas. Em alguns tecidos, as fibras longas são costuradas em uma determinada direção, enquanto em outros, as fibras se entrelaçam, passando por cima e por baixo umas das outras. Essa organização estrutural dos tecidos confere-lhes maior resistência mecânica e capacidade de

suportar cargas em direções específicas. A principal diferença entre uma manta de fibra picada (CSM) e os tecidos de fibra reside na composição das fibras e na organização estrutural. A manta é composta por fibras curtas e com direções aleatórias, oferecendo maior flexibilidade e adaptabilidade, enquanto os tecidos são constituídos por fibras longas e com direções definidas, conferindo-lhes maior resistência mecânica e capacidade de suportar cargas em direções específicas (ADVANCED VACUUM, 2015; DIPROFIBER, 2020; FIBERTEX, 2021; E-COMPOSITES, 2023). A Figura 4 ilustra alguns exemplos.

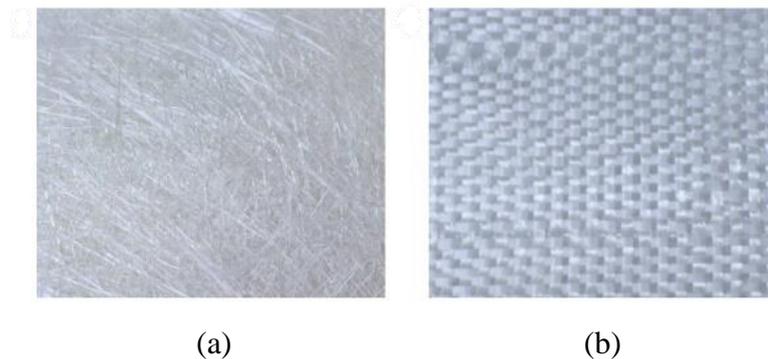


Figura 4 - a) Manta de fibra de vidro, com fibras picadas e dispersas aleatoriamente; b) Tecido de fibra de vidro, com fibras contínuas e orientadas. Adaptado de Advanced Vacuum (2015)

2.1.1.1. Fibras de Vidro

A fibra de vidro é comumente empregada como reforço em materiais compósitos poliméricos devido às suas notáveis vantagens, tais como baixo custo, a elevada resistência à tração, a excelente resistência química e as propriedades isolantes. Os compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro (GFRP) constituem a principal categoria de materiais compósitos. Diversas formas de fibra de vidro, como fibras longas, tecidos, fibras cortadas e mantas de fibras cortadas, têm sido incorporadas à matriz polimérica a fim de aprimorar as propriedades mecânicas e tribológicas dos compósitos. Contudo, é importante mencionar que essas fibras apresentam baixa resistência à abrasão e podem apresentar dificuldades de adesão às resinas. Tendo em vista essas características, a fibra de vidro é amplamente utilizada nos setores naval, químico, militar, aeroespacial e automotivo. (CÂNDIDO; ALMEIDA; REZENDE, 2000; REZENDE; BOTELHO, 2000; NAGAVALLY, 2017; RAHMAN; PUTRA, 2019).

As fibras de vidro são produzidas principalmente por meio da técnica de estiramento de vidro fundido em uma fieira. Após serem estiradas, as fibras de vidro passam por tratamentos superficiais que variam de acordo com sua finalidade. Um tratamento com revestimento têxtil é aplicado para fabricar tecidos sem danificar as fibras, enquanto um revestimento plástico é utilizado para compatibilizar a fibra com diferentes matrizes orgânicas. O teor alcalino é o

principal responsável pela resistência ao envelhecimento das fibras de vidro. Fibras com teores alcalinos inferiores a 14 apresentam alterações menos significativas quando expostas a agentes atmosféricos ou químicos particularmente desfavoráveis (MOURA; MORAIS; MAGALHÃES, 2010). Portanto, existem vários tipos de fibras de vidro utilizadas na indústria, como as fibras do tipo E, S e AR.

A fibra de vidro do tipo E é amplamente utilizada na indústria devido às suas características. Essa fibra é conhecida por ter baixa alcalinidade, boa resistência à tração e relativa rigidez em relação à flexão. Essas propriedades a tornam adequada para diversas aplicações, incluindo a fabricação de barcos, peças automotivas, componentes estruturais na construção civil e na indústria aeroespacial. A fibra de vidro do tipo S, também conhecida como tipo R na Europa, é frequentemente utilizada na indústria aeronáutica e aeroespacial devido à necessidade de fibras mais resistentes. Ela é obtida a partir de uma mistura de óxidos de silício, alumínio, boro, cálcio e magnésio. Essas fibras são reconhecidas por suas propriedades mecânicas e são frequentemente empregadas como reforço para termoplásticos, devido ao seu custo relativamente baixo (VIDRADO, 2010; KEMERICH *et al.*, 2013). A fibra de vidro AR é uma fibra álcali resistente, que contém um nível ótimo de zircônio (ZrO₂) em sua composição. Essa fibra foi desenvolvida especialmente para resistir ao ataque do meio alcalino presente nas matrizes de cimento, fornecendo reforço para reduzir a propagação de fissuras causadas pela retração plástica. As fibras de vidro AR têm boa adesão com matrizes cimentícias e possuem um custo relativamente baixo, tornando-as amplamente utilizadas como armaduras em concretos têxteis (PALED; BENTUR; MOBASHER, 2017; GIESE, 2019).

2.1.1.2. Fibras de Basalto

Os basaltos são rochas vulcânicas superficiais e abundantes, conhecidas por seu alto módulo de elasticidade e excelente resistência térmica. Além dessas propriedades, as fibras produzidas a partir do basalto possuem uma significativa capacidade acústica e atuam como excelentes isoladores de vibração. Devido à sua boa capacidade de isolamento, o basalto é amplamente utilizado na indústria da construção na forma de lã de rocha. Embora as fibras de basalto sejam menos utilizadas como reforço em compósitos poliméricos quando comparadas às fibras de vidro ou carbono, apresentam características vantajosas, como baixo custo, resistência à umidade e excelentes propriedades mecânicas, incluindo resistência à tração. Isso desperta interesse em estudos que exploram sua utilização como cargas de reforço em matrizes poliméricas, cerâmicas e cimentos. Estudos têm sido conduzidos para avaliar a viabilidade e o desempenho desses compósitos a fim de explorar plenamente o potencial das fibras de basalto

em aplicações de reforço. (SZABÓ; CZIGÁNY, 2003; SCHIAVON; REDONDO; YOSHIDA, 2007)

2.1.1.3. *Fibras de Carbono*

A fibra de carbono é amplamente empregada como material de reforço em compósitos poliméricos, proporcionando diversas vantagens. Entre elas, destacam-se sua alta resistência mecânica e rigidez, flexibilidade, resistência química, tolerância a altas temperaturas e leveza. Essas propriedades tornam os compósitos reforçados com fibras de carbono ideais para aplicação nos setores aeronáutico, automotivo, construção civil e indústria metalúrgica (LIMA *et al.*, 2017). Durante o processo de fabricação dos compósitos, é comum realizar um tratamento superficial nas fibras de carbono com o intuito de aprimorar a adesão entre a fibra e a matriz polimérica. Para esse fim, é empregado o uso de ácidos, como ácido clorídrico e nítrico, a fim de aumentar a rugosidade superficial da fibra. Isso resulta em uma melhor aderência entre a fibra e a matriz durante o processamento dos compósitos (BURAKOWSKI; REZENDE, 2001; RAHMAN; PUTRA, 2019). Além do uso de fibras de carbono longas, os compósitos poliméricos reforçados com fibras curtas de carbono têm sido amplamente adotados como materiais estruturais em automóveis, setor aeroespacial, marinha e outras aplicações industriais. De acordo com Menbari *et al.*, (2016) esses materiais também apresentam vantagens destacáveis, além das mencionadas anteriormente, como a facilidade de fabricação. No entanto, a adesão da interface fibra-matriz, a quantidade de fibra, a relação de aspecto e a orientação em relação à direção de carregamento são fatores críticos que influenciam o desempenho desses materiais.

2.1.1.4. *Fibras de Aramida*

As fibras de aramida são amplamente utilizadas como reforço em compósitos poliméricos devido às suas notáveis propriedades mecânicas. Essas fibras são um grupo de fibras sintéticas derivadas de poliamidas aromáticas, conhecidas comercialmente como Kevlar. Apresentam características interessantes, como baixa densidade, boa tenacidade, alta resistência ao impacto, resistência mecânica e rigidez, além de resistência térmica e elétrica. Essas características tornam as fibras de aramida uma escolha atraente para reforçar compósitos poliméricos, pois podem aumentar significativamente a resistência e rigidez dos materiais, sem adicionar peso excessivo (BERNARDI, 2003; SILVA; KOEHLER; AMICO, 2019).

Existem diferentes tipos de fibras de aramida, sendo duas delas o Kevlar 29 e o Kevlar 49. O Kevlar 29 é amplamente utilizado em diversas aplicações, como equipamentos de proteção individual, cordas, cabos, capacetes e blindagem veicular. Por sua vez, o Kevlar 49 apresenta uma resistência ainda maior que o Kevlar 29 e é frequentemente empregado em aplicações estruturais que requerem alta resistência, como componentes aeroespaciais e automotivos. É importante ressaltar que o custo das fibras de aramida é relativamente alto, o que pode limitar sua utilização em certas aplicações. Além disso, é necessário garantir uma boa adesão entre as fibras de aramida e a matriz polimérica para obter um desempenho otimizado do compósito (DUPONT, 2023; NAGLIS; D'ALMEIDA, 1998).

Em síntese, para as diversas aplicações possíveis, dos diversos tipos de fibras utilizados na indústria, existem aquelas mais acessíveis para uma solução específica, para um dado problema designado, correlacionado ou não com as propriedades mecânicas (alguns dependem intrinsecamente da temperatura de trabalho, por exemplo, e não diretamente com a resistência).

A

Tabela 1 apresenta as propriedades mecânicas de alguns materiais sintéticos em formato de fibra.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas de algumas fibras usuais utilizadas como reforço em compósitos.

<i>Fiber</i>	<i>Diâmetro (µm)</i>	<i>Densidade (kg/m³)</i>	<i>Resistência à Tração (MPa)</i>	<i>Resistência Específica (MPa × m/kg)</i>	<i>Módulo de Elasticidade (GPa)</i>	<i>Alongamento na Ruptura (%)</i>
<i>Vidro-E</i>	3,0 - 20,0	2540	1800 - 3450	0,71 - 1,36	70 - 83	4,8
<i>Vidro-S</i>	8,0 - 13,0	2490 - 2550	2600 - 2800	1,02 - 1,12	85,5 - 86	5,4
<i>Vidro-AR</i>	-	2700	1700	0,63	75	-
<i>Kevlar 29</i>	12	1440 - 1770	2750 - 3620	1,55 - 2,51	58 - 62	4,4
<i>Kevlar 49</i>	12	1220 - 1440	3450 - 3792	2,40 - 3,11	131 - 179	2,9
<i>Carbono</i>	-	-	1500 - 4800	-	228 - 724	-
<i>Basalto</i>	-	2750	4840	1,76	89	-

Fonte: Araújo *et al.* (2015); Mendonça (2003); Neto e Pardini (2006); Silva e Aquino (2008).

2.1.2. Matrizes

As fibras isoladas são incapazes de suportar um estado multiaxial de tensões. Elas suportam somente as tensões na direção axial das fibras. Assim, a integridade do compósito dependerá do desempenho da matriz utilizada como aglutinante e do tipo de fibra utilizada para transmitir as tensões (HARRIS, 1999; LORANDI; CIOFFI; ORNAGHI JR, 2016). Para a fabricação dos compósitos reforçados pode-se utilizar três tipos de matrizes: a) metálicas; b) cerâmicas e c) as resinas poliméricas (ou plásticas). A principal diferença de aplicabilidade da matriz polimérica das demais se dá na limitação quanto a exposição à elevadas temperaturas

(MENDONÇA, 2003). Os materiais plásticos são classificados em dois grandes grupos: a) termoplásticos e; b) termofixos. A Tabela 2 ilustra as propriedades típicas de alguns polímeros.

Tabela 2 - Propriedades típicas de alguns polímeros.

<i>Materiais</i>	<i>Densidade (kg/m³)</i>	<i>Módulo de Elasticidade à Tração (GPa)</i>	<i>Ruptura a tração (MPa)</i>	<i>Alongamento na Ruptura (%)</i>
<i>Termofixos</i>				
<i>Poliéster</i>	1100 - 1400	2100 - 4400	34 - 100	2,00
<i>Epóxi</i>	1213	2700 - 3380	29 - 130	-
<i>Poliamidas</i>	1460	3500 - 4500	120	-
<i>Fenólicos</i>	1320 - 1450	-	50 - 55	0,4 - 0,8
<i>Silicone</i>	1850 - 2810	-	17 - 34	-
<i>Termoplásticos</i>				
<i>Peek</i>	1300	400	92	-
<i>Polisufone</i>	1250	2800	75	-

Fonte: Mendonça (2003).

Os polímeros termoplásticos (polietileno, poliestireno, acrílicos, policloreto de vinila, etc) são reprocessáveis, isto é, quando aquecidos podem ser moldáveis tornando-os reaproveitáveis. Os materiais termofixos (poliéster, epóxi, fenólicos, silicones, etc.), por outro lado, não amolecem ou fundem quando submetidos ao calor, esses materiais tendem a se decompor quando submetidos a certos limites de temperatura (MARINUCCI, 2011). Dentre os materiais termofixos, a resina de poliéster se destaca. Essa resina pertence a uma família de polímeros que se formam a partir da reação de ácidos orgânicos dicarboxílicos e glicóis. Quando esses reagentes reagem, originam-se moléculas de cadeia longa e linear (NETO; PARDINI, 2006). Algumas das propriedades dessa resina podem ser observadas na Tabela 3, a qual descreve os resultados de ensaios de tração realizados em estudos que realizaram a caracterização mecânica de compósitos de matriz poliéster.

Tabela 3 – Resultado do ensaio de tração em resina poliéster

<i>Autores</i>	<i>Resistência à tração (MPa)</i>	<i>Módulo de Elasticidade (GPa)</i>	<i>Deformação na ruptura (%)</i>
Cerchiaro (2016)	24.83 ± 9.36	0.48 ± 0.13	6.71 ± 2.53
Neto e Antônio (2016)	32.33 ± 1.73	0.647 ± 0.036	5.00 ± 0.01
Silva (2018)	25.37 ± 1.41	1.89 ± 87.55	0.013 ± 0.001

Fonte: Cerchiaro (2016); Neto e Antônio e Silva (2018).

Como observado, os compósitos poliméricos termofixos e termoplásticos possuem propriedades distintas. Os termofixos apresentam maior resistência à tração, rigidez e

estabilidade dimensional. Eles suportam cargas e tensões mais elevadas sem deformações permanentes. Em termos gerais, os termofixos têm um módulo de elasticidade maior devido às ligações químicas intermoleculares fortes e à estrutura tridimensional. Por outro lado, os termoplásticos possuem cadeias poliméricas que permitem maior deformação elástica. Eles tendem a possuir maior alongamento na ruptura devido à mobilidade molecular. Em termos gerais, os termofixos são mais rígidos e resistentes, enquanto os termoplásticos são mais flexíveis e elásticos.

2.2. Compósitos poliméricos reforçados com fibras sintéticas

Os materiais compósitos são aplicados na indústria conforme as necessidades para cada tipo de aplicação (MUNTEANU *et al.*, 2010). Os compósitos poliméricos reforçados com fibras apresentam boas propriedades mecânicas em direções preferenciais. Essa peculiaridade demanda combinações de forma a desenvolver características particulares nas múltiplas direções combináveis, conforme as necessidades impostas pelo carregamento na qual a peça está inserida (BAKIS *et al.*, 2003). Os compósitos podem possuir fibras contínuas, longas ou curtas, variando de 5mm a 25mm de comprimento. As fibras podem ser dispostas de maneira unidirecional; bidirecional na forma de tecido; ou aleatórias com fibras contínuas ou picotadas (MENDONÇA, 2003).

Nesse sentido, os compósitos poliméricos reforçado com fibras são materiais fibrosos combinados com uma matriz. No geral, as propriedades de resistência da matriz são inferiores às propriedades do reforço fibroso. Dessa forma, espera-se que o compósito possua valores de resistência intermediários, dependendo das proporções utilizadas de cada material constituinte do compósito (MOURA; MORAIS; MAGALHÃES, 2010). No processo de polimerização da resina também é comum o acréscimo de aditivos (catalizadores, estabilizadores etc) em conjunto com as fibras para auxiliar nos diversos propósitos na qual a mesma foi predestinada (MENDONÇA, 2003). A Tabela 4 apresenta as propriedades mecânicas da resina poliéster sem reforço e de alguns compósitos laminados com fibras sintéticas.

Tabela 4 - Propriedades de alguns compósitos laminados.

<i>Material</i>	<i>V/M³</i> <i>(%)</i>	<i>Módulo E1/E2¹</i> <i>(MPa)</i>	<i>Ruptura X/Y²</i> <i>(MPa)</i>	<i>Densidade ρ</i> <i>(kg/m³)</i>	<i>E1/ρ¹ (MPa ×</i> <i>m/kg)</i>	<i>X/ρ (MPa ×</i> <i>m/kg)</i>
<i>Vidro-E/Poliéster</i> <i>Uniaxial</i>	15/27	12560/2960	295/43	1400	9	0,21
<i>Vidro-E/Poliéster</i> <i>Aleatório</i>	15/27	7450	85	1400	5,3	0,061

<i>Vidro-E/Poliéster Uniaxial</i>	30/48	23100/4290	543/43	1600	14,4	0,34
<i>Vidro-E/Poliéster Aleatório</i>	30/48	12700	-	1600	7,9	-

¹E1 e E2 representam os módulos de elasticidade nas direções 0° e 90° respectivamente;

²X e Y representam a resistência de ruptura a 0° e a 90° respectivamente;

³V e M é o volume e a massa de fibras com relação ao compósito respectivamente;

As fibras de vidro utilizadas apresentam as propriedades de E=72400 MPa, $\nu=0,2$, $\rho=2540 \text{ kg/m}^3$ e $\sigma=2700 \text{ MPa}$. Os valores de resistência apresentados em tabela são aqueles cuja matriz rompeu, mas não as fibras.

Fonte: Mendonça (2003).

2.2.1. Desenvolvimento de compósitos reforçados com fibras de vidro para conectores PERFOFRP

Lameiras (2015) produziu laminados reforçados com fibra de vidro (GFRP), também pelo processo de infusão de resina à vácuo, dos quais três seriam do tipo *Chopped Strand Mat* (CSM): dois com gramaturas de 2250 g/m² (CSM 1 e 2) e um com gramatura de 2500 g/m² (CSM 3). A partir desses laminados, extraíram-se amostras de 250 × 25 mm para a obtenção da tensão última e módulo de elasticidade; e amostras de 25 × 25 mm para a obtenção da fração volumétrica.

Para o cálculo da fração volumétrica de fibras de vidro, Lameiras (2015) separou amostras de 25 × 25 mm, nas quais foram pesadas e submetidas ao calor. Após a perda de massa, com a volatilização da resina, pôde-se calcular o teor volumétrico de fibras de vidro dos laminados, seguindo as orientações da norma ASTM D2584 (2018). No programa experimental realizado por Silva (2020), produziu-se GFRPs, pelo processo de infusão de resina à vácuo, em três lotes distintos (A, B e C). Todos os laminados foram preparados com gramatura de 2250 g/m². Para cada chapa retirou-se amostras de dimensões de 250 × 25 mm para a realização da caracterização. No total 59 amostras foram submetidas ao ensaio de tração nos quais obteve-se a leitura de carga. Dessas amostras, separou-se 12 amostras aleatórias para aferir as deformações com uso de extensômetros, fixados no centro do material compósito, acoplado ao sistema de aquisição de dados, de acordo com as recomendações da ASTM D3039/D3039M (2017).

Para o cálculo da fração volumétrica de fibras de vidro, Silva (2020) também separou amostras de 25 × 25 mm para a obtenção das medidas. O teor volumétrico de fibras no laminado foi determinado com base na ASTM D2584 (2018). Na Tabela 5 observa-se os resultados de espessura, tensão última à tração, fração volumétrica e módulo de elasticidade dos compósitos de fibra de vidro fabricados para aplicação em conectores de cisalhamento para painéis de parede sanduíche de outros trabalhos contidos na literatura.

Tabela 5 - Espessura, tensão última à tração e fração volumétrica de GFRP.

Autores	Chapa	Espaço Amostral	Espessura (mm)		Fração volumétrica (%)		Tensão última à tração (MPa)		Módulo de Elasticidade (GPa)	
			Média (mm)	CoV (%)	Média (%)	CoV (%)	Média (MPa)	CoV (%)	Média (GPa)	CoV (%)
Silva (2020)	Lote A	-	2,36	1,66	40,11	1,74	175,27	8,35	12,46	4,39
	Lote B	-	2,33	5,42	38,23	1,77	165,43	6,90	12,28	8,82
	Lote C	-	2,28	2,75	39,18	1,57	157,14	8,52	14,30	11,31
	Média	-	2,32	3,50	39,04	1,69	164,24	7,88	13,35	8,17
Lameiras (2015)	CSM 1	6	2	13,30	40,90	0,60	252,54	8,50	14,64	7,40
	CSM 2	8	2	19,70	40,80	0,60	199,49	7,90	14,35	6,10
	CSM 3	8	2,5	5,40	42,20	0,60	201,97	4,40	12,65	3,70
	Média	-	2,17	12,80	41,30	0,60	218,00	6,93	13,88	5,73

Fonte: Lameiras (2015) e Silva (2020).

A Tabela 5, acima, apresenta o resultado dos trabalhos de Silva (2020) e de Lameiras (2015). Os parâmetros analisados incluem espessura, fração volumétrica, tensão última à tração e módulo de elasticidade. O espaço amostral dos lotes de Silva (2020) foram de 12, 23 e 24 amostras para a obtenção dos dados de espessura, tensão última à tração e fração volumétrica de fibras. Para o módulo elasticidade longitudinal, obteve-se uma quantidade reduzida de amostras devido a limitação da quantidade de extensômetros utilizadas no ensaio. O tamanho amostral dos Lotes A, B e C desse parâmetro foram de 3, 4 e 5 amostras, respectivamente. O espaço amostral utilizado por Lameiras (2015) foram de 6, 8 e 8 para as propriedades analisadas na Tabela 5, acima.

Ao observar a comparação entre os lotes, especificamente no estudo de Silva (2020), nota-se que os Lotes A, B e C apresentam diferenças em termos de espessura média. Essa variação, no entanto, é acompanhada por coeficientes de variação (CoV) relativamente altos. Isso sugere que pode haver inconsistências no processo de fabricação ou que as amostras utilizadas possuem variações intrínsecas. Além disso, a fração volumétrica exibe uma variação menos significativa entre os lotes, indicando maior consistência nesse aspecto. No que diz respeito à tensão última à tração nos diferentes lotes, observa-se alguma variabilidade, sendo que o Lote A apresenta a maior tensão média. No entanto, é importante notar que o coeficiente de variação é relativamente alto, sugerindo que os resultados podem ser influenciados por fatores externos. O módulo de elasticidade também varia entre os lotes, mas com coeficientes de variação menores em comparação com a espessura e tensão última à tração. Isso deve-se ao fato da menor quantidade de corpos de prova no qual extraiu-se os resultados. Mas, também,

pode indicar que o módulo de elasticidade é menos sensível às variações no processo de fabricação.

No estudo de Lameiras (2015), as amostras CSM 1, CSM 2 e CSM 3 apresentam espessuras semelhantes, com coeficientes de variação relativamente baixos. A fração volumétrica é consistente entre os materiais, mostrando uniformidade na amostragem. A tensão última à tração varia pouco entre os materiais, com coeficientes de variação baixos. Entretanto, CSM 1 se destaca com a maior tensão média em comparação com os outros materiais. Quanto ao módulo de elasticidade, ele varia entre os materiais, com CSM 1 tendo o valor médio mais alto e CSM 3 o mais baixo. Os coeficientes de variação também são relativamente baixos para esse parâmetro. Cabe destacar ainda que o espaço amostral utilizado por Lameiras (2015) era menor que o espaço amostral utilizado por Silva (2020). Isso demonstra que os dados analisados podem ser mais, ou menos sensíveis, às variações no processo de fabricação.

Ao comparar os resultados dos dois autores, nota-se que os dados de Silva (2020) geralmente apresentam coeficientes de variação mais altos em comparação com os de Lameiras (2015), porém, com um espaço amostral maior que o de Lameiras (2015). Isso sugere que os resultados de Silva podem ser mais sensíveis a variações ou que a amostragem de Lameiras (2015) pode não ser representativa o suficiente. Por outro lado, de acordo com a Tabela 5, acima, os resultados de Lameiras (2015) parecem ser mais consistentes com coeficientes de variação mais baixos na maioria dos parâmetros.

2.3. Compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais

Os materiais compósitos reforçados com fibras estão ganhando espaço entre os materiais convencionais de construção. Esses materiais oferecem várias vantagens, entre elas: alta resistência, baixo peso, resistência à corrosão e baixo custo de manutenção. Apesar de todas as vantagens encontradas nos materiais compósitos, a engenharia demanda de maneira concomitante a necessidade de desenvolver e aplicar materiais que favoreçam a sustentabilidade. Isso inclui a criação de materiais de origem renovável ou recicláveis, por meio de processos mais ecológicos e inovadores (AZWA *et al.*, 2013; SRINIVAS; LAKSHUMU NAIDU; RAJU BAHUBALENDRUNI, 2017).

Conforme os dados fornecidos pela ABRELPE (2020), entre os anos de 2010 e 2019, a quantidade gerada de RCD coletada *per capita* cresceu de 174,4 kg para 213,5 kg por habitante/ano. Essa situação sugere esforços para reduzir esse problema. Materiais compósitos com fibras vegetais, em substituição das fibras sintéticas, pode ser uma ótima alternativa de solução com vista a grandiosidade do problema. Isso pode favorecer em grande escala o meio

ambiente, já que, a decomposição do vidro é um processo bastante demorado (o vidro é um material inerte, o que dificulta a sua digestão por micro-organismos decompositores).

Os compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais, além de oferecer vantagens como baixo custo, boas propriedades mecânicas e características não abrasivas, também são ecológicos e renováveis. As fibras vegetais são substitutas das fibras sintéticas convencionais como vidro, aramida (kevlar) e carbono (KU *et al.*, 2011; FARUK *et al.*, 2014; OMRANI; MENEZES; ROHATGI, 2016; SHI *et al.*, 2021).

Apesar de todas as vantagens, é importante destacar que alguns fatores afetam as propriedades finais do compósito, como por exemplo, o tipo de fibra vegetal a ser utilizado (juta, sisal, coco, curauá dentre outras), o tipo de processamento, a distribuição e orientação na matriz polimérica (aleatória, unidirecional, bidirecional etc), o comprimento das fibras distribuídas no compósito e a interação com a matriz polimérica (PARDINI, 2006; ANGRIZANI *et al.*, 2006; SOARES *et al.*, 2007; FARUK *et al.*, 2012; TEIXEIRA, 2019; CHEGDANI *et al.*, 2020; NETO; ALSUBARI *et al.*, 2021;). A resistência à tração dos compósitos poliméricos reforçados com fibra vegetal também aumenta com a fração volumétrica de fibra até um valor máximo ou ótimo, quando a resistência começa a cair (KU *et al.*, 2011). A Tabela 6 ilustra diversos estudos com as características e propriedades mecânicas de vários compósitos reforçados com fibras vegetais.

Tabela 6 – Propriedades mecânicas de compósitos reforçados com fibras vegetais.

<i>Compósitos</i>	<i>Fração de Fibra (%)</i>	<i>Disposição/Orientação/Tamanho</i>	<i>Processamento</i>	<i>Concentração/Tratamento</i>	<i>Tempo de Agitação/Temperatura</i>	<i>Resistência a Tração (MPa)</i>	<i>Módulo de Elasticidade (MPa)</i>	<i>Alongamento Ruptura (%)</i>
<i>Epóxi/bambu</i>	-	Unidirecional	Moldagem por compressão	-	-	176	-	-
<i>Epóxi/coco</i>	30%	Manta/1,5cm	Moldagem por compressão	-	-	17,7	-	-
<i>Epóxi/juta</i>	-	Tecido	Laminação Manual	-	-	44,7	-	-
<i>Curauá/Poliéster</i>	20%	Unidirecional	-	5% NaOH	-	180,00	16,8	-
<i>Poliéster/Curauá</i>	22,20%	Mantas	Moldagem por Compressão	-	-	34,70	4,04	-
<i>Epóxi/Juta</i>	-	Tecido	Laminação Manual	5% NaOH	6h/Ambiente	51,35	1758	3.42
<i>Poliéster/Alfa</i>	-	Manta/0,4~6cm	Lay-Up Manual	10% NaOH	24h/28°C	-	-	-
<i>PHBV/Curauá</i>	20%	Manta/2,5cm	Extrusão/Injeção	5% NaOH	2h/50°C	30	3600	-
<i>Epóxi/Capim-Sapê</i>	≥10%	Unidirecional	Moldagem por compressão	5% NaOH	1h/70°C	43,53±3,63	3060	1,43 (%)
<i>Poliéster/Miriti</i>	30%	Unidirecional	Moldagem por compressão	5% NaOH	80min/Ambiente	96,64±17,71 (CV 18%)	5,80±0,78 (CV 13%)	-
<i>Poliéster/Bagaço de Cana-de-Açúcar</i>	15%	Manta	Moldagem por compressão	10% NaOH	24h/Ambiente	27,7 ± 0,5	856 ± 70	-

Fonte: Beltrami, Scienza e Zattera (2014); Pires (2009); Rokbi *et al.* (2011); Silva e Aquino (2008); Suely e Santos (2010) e Teixeira (2019).

2.3.1. Fatores de desempenho dos compósitos com fibras vegetais

Todos os fatores mencionados são determinantes para o desempenho dos compósitos. Isso cabe tanto para os materiais reforçados com fibras sintéticas como também para os materiais reforçados com fibras vegetais. Nesse sentido, cabe descrever de modo sucinto algumas propriedades e características dos materiais constituintes, assim como, alguns trabalhos determinantes para avaliar a variação das características fundamentais desenvolvidas no componente.

2.3.2. Características fundamentais da fibra vegetal no desempenho do compósito

A principal desvantagem das fibras vegetais encontra-se na qualidade altamente variável de suas propriedades. No entanto, devido ao seu baixo peso específico, de modo geral, elas podem alcançar resistências e rigidezes específicas comparáveis às das fibras de vidro, assim como, o módulo de elasticidade e alongamento correspondente à ruptura. A aplicação dessas fibras torna-se interessante devido ao seu baixo custo, quando comparado as fibras de vidro ou outras fibras sintéticas (ZAH *et al.*, 2007). A Tabela 7 compara alguma das principais fibras vegetais (inclusive a de curauá) utilizadas em compósitos.

Tabela 7 - Propriedades mecânicas de algumas fibras vegetais comparada com a fibra de vidro-E.

Fibra	Diametro μm	Massa Específica (kg/m^3)	Resistência à Tração (MPa)	Resistência Específica (MPa·m/kg)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Alongamento na Ruptura (%)
Sisal	50 - 300	1260 - 1500	126 - 800	0,08 - 0,63	3,8 - 62,0	2,0 - 14
Coco	40 - 450	1180 - 1520	95 - 220	0,06 - 0,19	2,5 - 13,7	3,3 - 5,1
Juta	200	1300 - 1500	287 - 800	0,19 - 0,62	10,0 - 100	1,3 - 2,8
Malva	-	1410	160	0,11	17,4	5,2
Rami	-	1510	393 - 900	0,26 - 0,60	7,3 - 44	1,8 - 5,3
Piçava	-	1050	108,5 - 147,3	0,10 - 0,14	1,07 - 5,6	5,9
Algodão	-	1500 - 1600	287 - 597	0,18 - 0,40	5,5 - 12,6	3,0 - 10,0
Linho	-	1400 - 1500	345 - 1500	0,23 - 1,07	27,6 - 80	1,2 - 3,2
Curauá	97	920 - 1400	125 - 1404	0,09 - 1,53	20 - 80	3,7 - 6,0
Vidro-E	-	2540	1800 - 3450	0,71 - 1,36	70 - 83	2,5 - 4,8

Fonte: Araujo *et al.* (2015); Li, Tabil e Panigrahi (2007); Mendonça (2003); Neto e Pardini (2006); Silva e Aquino (2008); Soltan *et al.* (2017) e Taj, Munawar e Khan (2007).

A Tabela 7 aponta propriedades de resistência a tração e módulo de elasticidade das fibras vegetais superiores ao da resina polimérica pura, como ilustrado na Tabela 2. Por outro lado, de modo geral, essas fibras possuem propriedades inferiores quando comparado com as fibras sintéticas, conforme apresentado na Tabela 1.

O desempenho final dos polímeros reforçados com fibras vegetais é grandemente influenciado pela qualidade da interação entre as fibras vegetais lignocelulósicas e a resina da matriz polimérica. As fibras vegetais são compostas principalmente por três componentes: celulose, hemicelulose e lignina. Componentes como a hemicelulose e a lignina têm impacto negativo na compatibilidade e adesão entre as fibras e o polímero. Além disso, a composição química das fibras varia consideravelmente conforme o tipo de fibra, o que diretamente afeta as propriedades relacionadas à adesão da fibra à matriz. (BESSA *et al.*, 2017). A Tabela 8 apresenta a composição química e absorção de umidade de algumas fibras vegetais, inclusive as fibras de curauá.

Tabela 8 - Composição química e absorção de umidade de algumas fibras vegetais.

<i>Fibras</i>	<i>Celulose (%)</i>	<i>Hemicelulose (%)</i>	<i>Lignina (%)</i>	<i>Pectina (%)</i>	<i>Absorção de Umidade (%)</i>
<i>Sisal</i>	47 - 78	10,0 - 24,0	8,0 - 13,1	10	11
<i>Coco</i>	36 - 53	0,15 - 0,25	38,3 - 45	3,0 - 4,0	10
<i>Juta</i>	45 - 71,5	13,6 - 22,1	12,0 - 26	0,2	12 - 12,6
<i>Malva</i>	-	-	-	-	-
<i>Rami</i>	68,6 - 91	3,0 - 16,7	0,5 - 0,7	1,9	12,0 - 17,0
<i>Piaçava</i>	43,05 - 43,41	8,07 - 8,61	49,54 - 50,56	-	-
<i>Algodão</i>	-	-	-	-	-
<i>Linho</i>	-	-	-	-	-
<i>Curauá</i>	70,7 - 73,6	9,9 - 21,1	7,5 - 11,1	-	7,9

Fonte: Araujo *et al.* (2015); Li, Tabil e Panigrahi (2007); Pires *et al.* (2012); Silva e Aquino (2008) e Soltan *et al.* (2017).

A dificuldade de compatibilidade entre as fibras (hidrofílicas) e a matriz (hidrofóbicas) é uma das principais desvantagens e desafios do uso desses compósitos. Essas influenciam principalmente nas propriedades de tração do componente (BESSA *et al.*, 2017; KU *et al.*, 2011; MOHANTY; MISRA; DRZAL, 2001). Dessa forma, é muito comum a aplicação de métodos de modificação da superfície da fibra vegetal para melhorar a consequente interação fibra-matriz.

Diversos são os tipos de tratamento para a modificação da superfície da fibra com o intuito de melhorar a adesão entre as fibras e a matriz polimérica. Os métodos de modificação são divididos basicamente em físicos, químicos e biológicos. Entre os métodos físicos, merece destaque para os tratamentos por corona e plasma e entre os métodos químicos e biológicos, destacam-se os tratamentos por silano, alcalino, acetilação, acoplamento maleado e tratamento enzimático (FARUK *et al.*, 2012; KOOHESTANI *et al.*, 2019).

O tratamento alcalino (ou mercerização) é um dos métodos de modificação química da superfície das fibras vegetais mais utilizados. Conforme apresenta Li, Tabil e Panigrahi (2007), a mercerização é bastante usual para auxiliar no reforço de compósitos com fibras vegetais em polímeros termofixos e termoplásticos. Esse tratamento é responsável pela ruptura das ligações de hidrogênio presentes na fibra, aumento da rugosidade superficial e redução da capacidade de absorção de água dos compósitos. Conforme comenta Del Pino *et al.*, (2021), o tratamento alcalino leva a ruptura do grupo hidroxila (OH) da estrutura das fibras aumentando a rugosidade da superfície da fibra. Os tratamentos superficiais auxiliam na extração parcial de lignina e hemicelulose, além de remover gorduras e cinzas da superfície.

O tratamento alcalino ideal é bastante eficiente e possui baixo custo. Ele está relacionado diretamente com a concentração de soluto, tempo e temperatura de tratamento. Esses fatores desempenham um papel fundamental para atingir um bom desempenho do tratamento, visto que, concentrações elevadas de reagente alcalino também pode despolimerizar a celulose presente na fibra e deslignificar a fibra de maneira excessiva afetando o resultado final (MISRA; DRZAL, 2001; CHANDEKAR; CHAUDHARI; WAIGAONKAR, 2020; MOHANTY).

Alguns estudos destacam a importância da definição da concentração da solução, tempo de imersão da fibra na solução e melhor componente químico utilizado para o tratamento alcalino, afim de obter as melhores propriedades mecânicas do componente (ROKBI *et al.*, 2011; BOUMAAZA; TEIXEIRA, 2019; KOOHESTANI *et al.*, 2019; BELAADI; BOURCHAK, 2020). Del Pino *et al.*, (2021) estudou um compósito formado por epóxi/curauá fabricado por “prensagem a frio” com fibras tratadas. Em sua pesquisa utilizou-se três concentrações distintas de NaOH (2, 5 e 10%) nos tempos de imersão na solução de 2, 4 e 10 horas. Os melhores resultados de tração e flexão apontaram para os materiais tratados com 5% de NaOH por 4 horas.

Diversos outros estudos com modificação da superfície das fibras vegetais podem ser encontrados na literatura (FARUK *et al.*, 2012; KOOHESTANI *et al.*, 2019). Algum desses são superiores ao tratamento realizado com hidróxido de sódio, porém, ele destaca-se devido ao seu baixo custo e disponibilidade. Isso justifica a sua implementação na presente pesquisa. De modo geral, todos os tratamentos superficiais citados conferiram melhorias na adesão interfacial entre os materiais constitutivos do compósito.

O tratamento alcalino das fibras de curauá consiste na disposição das fibras em solução de hidróxido de sódio (NaOH) em concentrações definidas. Teixeira (2019) realizou o tratamento químico em solução de NaOH em uma concentração de 5% (massa/volume),

aquecida a uma temperatura de 50°C, pelo período de 2 h. Após esse tempo as fibras de curauá foram lavadas em água destilada até a neutralização do pH. Depois desse processo as fibras necessitam ser secas em estufa - ou em temperatura ambiente - com a finalidade de eliminar a sua umidade para os posteriores ensaios de caracterização das fibras e produção dos compósitos (DEL PINO *et al.*, 2021).

2.3.3. *Compósitos poliméricos reforçados com fibras de curauá*

As propriedades das fibras vegetais não só variam conforme a sua origem e tratamento aplicado, mas também depende de onde as fibras foram retiradas (do caule ou da folha da planta), da qualidade da planta, da idade e dos processos de extração para a coleta das fibras (MOHANTY; MISRA; DRZAL, 2001). Nesse sentido, faz-se necessário conhecer um pouco melhor a planta de curauá e seus processos de manufatura.

As fibras desta planta já eram conhecidas entre os povos indígenas, onde eram utilizadas para a fabricação de cordas, redes e outros produtos artesanais. Ela é nativa da região amazônica, especificamente na região oeste do estado do Pará (Brasil), onde iniciaram-se as primeiras plantações comerciais (SILVA; AQUINO, 2008). O processo de extração das fibras de curauá envolve várias etapas, desde a colheita das folhas até a decorticação para a obtenção das fibras. Após esse processo as fibras são lavadas em tanques com água e secas ao ar (SOLTAN *et al.*, 2017).

Existe apenas uma única espécie da planta de curauá (*Ananás erectifolius*) e ela pode ser encontrada na natureza em diversas variedades. Entre essas a mais comum é a de cor roxa com folhas roxas-avermelhadas e a branca com folhas verde claras (Figura 5). Cada planta de curauá produz de 20 a 24 folhas por ano, ou seja, são 2 kg de fibra produzidos por planta. O caule e as folhas dessa planta chegam a atingir 1,5 metros de comprimento e é possível produzir 3600kg de fibra seca anualmente em uma área de 1ha. O processo de obtenção da fibra consiste no desfibramento das folhas seguidos por secagem, amaciamento e clareamento de forma manual ou mecânica. A primeira colheita do curauá ocorre após um ano do plantio e uma folha da planta pesa cerca de 100g e rende de 7 a 10% de fibra seca (SILVA; AQUINO, 2008; SOLTAN *et al.*, 2017). Por conseguinte, o curauá possui grande potencial para aplicações renováveis nas diversas áreas da engenharia.

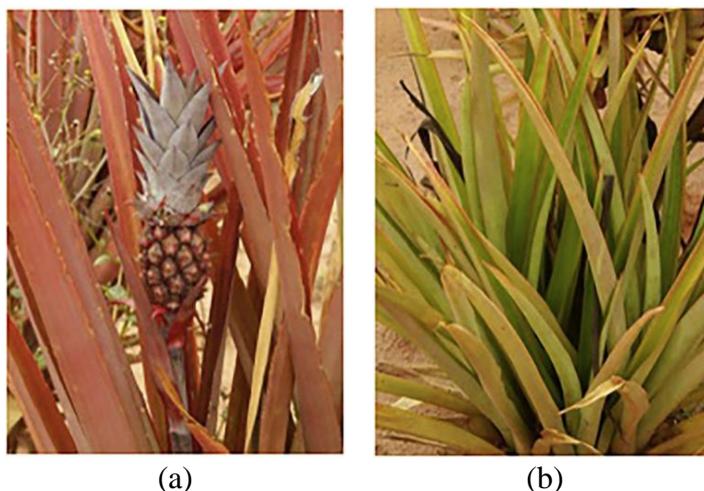


Figura 5 - a) Curauá de cor roxa com folhas roxas-avermelhadas e b) Curauá de cor branca com folhas verde claras (SOLTAN *et al.*, 2017)

A fibra da planta de curauá demonstra ser bastante promissora devido as suas boas propriedades combinadas com o seu baixo preço. As características de tensão e resistência a flexão destas fibras são superiores às de outras fibras vegetais já estudadas (ZAH *et al.*, 2007). A Tabela 7 ilustra as propriedades mecânicas de algumas fibras utilizadas em compósitos inclusive as de curauá.

No geral, pode-se observar, Tabela 7, que as fibras de curauá apresentam uma resistência à tração e um módulo de elasticidade superiores em comparação com outras fibras vegetais. Embora as fibras de curauá tenham um diâmetro menor, sua resistência à tração se aproxima mais da resistência à tração das fibras de vidro-E em comparação com as outras fibras vegetais. De acordo com Silva e Aquino (2008), a resistência mecânica das fibras lignocelulósicas é determinada principalmente pelo teor de celulose presente nessas fibras vegetais. Na Tabela 8, é possível observar que os teores de celulose das fibras vegetais.

Como indicado na Tabela 7, as fibras de curauá apresentam melhores propriedades mecânicas, quando comparadas com as propriedades outras fibras vegetais. Isto pode ser justificado pela maior quantidade de celulose existente, conforme ilustrado na Tabela 8. Esse componente traduz maior resistência e rigidez para as fibras (LI; TABIL; PANIGRAHI, 2007). Sendo assim, torna-se conveniente apresentar alguns estudos que demonstram a eficácia da aplicação das fibras de curauá, e respectivos tratamentos químicos, em diversas áreas da engenharia, para demonstrar o potencial emprego em conectores de cisalhamento para painéis de parede sanduíche.

Na pesquisa conduzida por Spinacé *et al.* (2009), as fibras de curauá foram moídas em moinho de facas e submetidas a diversos tipos de tratamento. Elas foram caracterizadas quanto

as propriedades mecânicas e térmicas, umidade absorção de água, morfologia superficial, espectroscopia FTIR, densidade e difração de raios-X. Os ensaios constataram que as principais mudanças ocorreram nas características referentes ao teor de umidade e nas propriedades mecânicas com o aumento da rugosidade superficial das fibras, o que é vantajoso para a adesão mecânica em compósitos. Na pesquisa desenvolvida por Harnnecker, Santos Rosa e Lenz (2012), comprovou-se que a adição de 20% em peso de fibras de curauá tratadas promoveu um aumento de 75% da resistência a tração e 56% da resistência a flexão com relação a resistência obtida do polímero de poliéster puro.

No estudo publicado por Borsoi, Scienza e Zattera (2013) foram avaliadas as propriedades mecânicas, reológicas e morfológicas de matrizes puras e recicladas de compósitos com 20% em peso de fibras de curauá. A adição das fibras aumentou as resistências de tração e módulo de elasticidade dos compósitos, além do aumento da estabilidade térmica e viscosidade de fusão.

Na pesquisa conduzida por Soltan *et al.* (2017) estudou-se a eficácia de um compósito de base cimentícia reforçado com fibras de curauá para possíveis aplicações em revestimento de fachadas em edifícios. Essa fibra, por apresentar leveza, baixa condutividade térmica e tenacidade, combinadas a boas ductilidade e resistência à tração, tornou-se uma ótima alternativa para aplicações em compósitos cimentícios moldáveis de endurecimento por deformação.

Libera Junior *et al.* (2021) estudou o comportamento mecânico de diferentes compósitos reforçados com fibras curtas de curauá, tratadas com NaOH, moldados por diferentes métodos. Os resultados demonstraram impactos positivos do tratamento, com ganho de 25,3% de resistência a tração para curauá NaOH/epóxi com relação aos compósitos de fibras não tratadas e também com relação à resina pura. Os materiais moldados também ganharam resistência com relação a resina pura utilizada.

No âmbito da construção civil, outros estudos também foram realizados utilizando as fibras de curauá. Estudos elaborados com materiais a base de matriz cimentícia para aplicações em argamassa reforçada, concreto de alto desempenho e revestimento de fachadas (TEIXEIRA *et al.*, 2019); VELOSO *et al.*, 2021; FERRARA *et al.*, 2021; MANIGANDAN *et al.*, 2021). Na geotecnia as fibras de curauá são investigadas para a implementação em reforço de solos em obras de terraplenagem (SILVEIRA, 2021). As fibras de curauá também estão presentes em diversos outros estudos que demandam a sua aplicação, como por exemplo, na produção de materiais náuticos (MINILLO *et al.*, 2021). Diversas outras aplicações podem ser demandadas para compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais, especialmente as de curauá. Com

nisso, fez-se um breve levantamento de pesquisas na área de desenvolvimento de compósitos reforçados com fibras de curauá para investigar o tipo de resina, disposição, tamanho e orientação das fibras, tipo de tratamento utilizado, tipo de processo de produção do compósito e principais resultados obtidos das principais propriedades mecânicas como resistência a tração, módulo de elasticidade e alongamento correspondente à ruptura dos compósitos reforçados com fibras de curauá para diversas aplicações.

No estudo conduzido por Giacomini, Neis e Leão (2000) foram abordadas as propriedades mecânicas de compósitos reforçados com fibras vegetais, incluindo as fibras de curauá. No estudo, as características do molde utilizado na pesquisa resultaram em uma produção não uniforme e homogênea das amostras, afetando negativamente as propriedades mecânicas do material. Na pesquisa, foi sugerido que um novo molde fosse fabricado considerando as discussões apresentadas no estudo e que o teor de fibras fosse aumentado para acima de 30%. Em outro estudo, conduzido por Silva (2010), foi apresentada uma metodologia para a produção de mantas compostas por fibras curtas de curauá. Nessa pesquisa, foram analisadas diversas variáveis, como o pré-tratamento das fibras (sejam elas in natura, secas e lavadas e secas), o comprimento das fibras e as frações volumétricas, com o objetivo de determinar as propriedades mecânicas dos compósitos obtidos. A técnica utilizada para moldagem dos compósitos foi a compressão a quente.

Lopes (2011) incluiu fibras de curauá alinhadas e contínuas em compósitos com matrizes de poliéster e epóxi. Os compósitos produzidos com resina de poliéster resultaram em um considerável aumento da resistência mecânica e rigidez em teores de fibras de até 40% em volume. Na pesquisa foi observado um aumento linear das propriedades de tração em função do aumento da fração volumétrica de fibras de curauá nos compósitos. De fato, compósitos de poliéster com frações volumétricas de 10% e 40% apresentaram uma diferença significativa na resistência à tração, com um aumento de 67,10% para o último caso. Para os compósitos produzidos com Epóxi com frações volumétricas de 5% e 35% também apresentaram uma diferença significativa na resistência à tração, com um aumento de 64,40% para o último caso.

Spinacé *et al.*, (2011) estudaram compósitos de polietileno de alta densidade (PEAD) e polipropileno (PP) reforçados com fibras de curauá e sisal. Na pesquisa realizada por esses autores foi demonstrado que os compósitos com fibras de curauá apresentaram maior resistência mecânica em tração e flexão em relação aos compósitos com fibras de sisal, ambos processados nas mesmas condições. Os compósitos reforçados com fibras de curauá superaram os compósitos com fibras de sisal em ambos os tipos de matrizes (PP e PEAD). Especificamente, a resistência à tração e à flexão dos compósitos de curauá foi superior em

aproximadamente 10,3%, 30,8%, 7,8% e 14,6% quando comparados com os compósitos de PP e PEAD, respectivamente. A superioridade dos compósitos com fibras de curauá foi atribuída às propriedades mecânicas distintas dessa fibra, enquanto a fragilidade da fibra de sisal levou à sua quebra durante a moagem, reduzindo a eficiência de reforço no compósito.

Em uma pesquisa conduzida por Beltrami, Cristine Scienza e Zatter (2014) foi demonstrado que o tratamento alcalino das fibras de curauá promoveu modificações químicas evidentes. Os compósitos contendo fibras tratadas com solução de 5% de NaOH apresentaram significativo aumento na resistência à tração e módulo de elasticidade de tração, quando comparados aos compósitos com fibras não tratadas. Os compósitos com fibras tratadas com solução de 5% NaOH apresentaram aumento de 3% na resistência à tração, 24% no módulo de elasticidade de tração e 30% na resistência à flexão, quando comparados aos compósitos com fibras sem tratamento. Foi demonstrado ainda que o tratamento com solução de menor concentração (1% NaOH) não proporcionou melhora efetiva na adesão da fibra à matriz polimérica, e o tratamento de maior concentração (10% NaOH) enfraqueceu a estrutura das fibras, diminuindo as propriedades mecânicas dos compósitos. Portanto, o tratamento alcalino com solução de 5% NaOH foi o mais indicado, melhorando a adesão da fibra à matriz e otimizando o desempenho mecânico dos compósitos. Teixeira (2019) também demonstrou em sua pesquisa sobre o desenvolvimento de compósitos a partir de fibras de curauá, foi constatado que o tratamento químico utilizando solução de 5% de NaOH se mostrou como uma opção promissora ao comparar com compósitos com fibras sem nenhum tipo de tratamento superficial. Os compósitos que receberam tratamento químico com 5% de NaOH demonstrou superioridade de 7,7% dos compósitos resultantes para a resistência à tração dos compósitos.

Oliveira (2015) desenvolveu compósitos contendo fibras contínuas e alinhadas de curauá. O estudo se concentrou em analisar o impacto da variação do ângulo das fibras no compósito, o teor volumétrico das fibras e a eficácia do tratamento alcalino aplicado a essas fibras. Os resultados demonstraram que as fibras de curauá tratadas em solução de 5% de NaOH apresentaram compósitos com maior resistência à tração em comparação com os compósitos de curauá não tratados, devido a uma melhor interação com a matriz. Na propriedade de tração dos compósitos o tratamento superficial da fibra de curauá proporcionou um aumento da resistência de 12,5 % e de 6 % no módulo de elasticidade. Além disso, a variação do ângulo de reforço mostrou a significativa influência da orientação das fibras na resistência e no módulo de elasticidade dos compósitos reforçados com fibras de curauá.

Rodrigues, Souza e Fujiyama (2015) fabricaram compósitos reforçados com fibras vegetais pelo processo de infusão de resina à vácuo, no qual foi demonstrado ser um método

eficiente para a produção de compósitos. Isso permitiu a produção de compósitos com alto teor de fibra e propriedades mecânicas satisfatórias. Em sua pesquisa, os compósitos obtidos a partir de fibras de curauá apresentaram frações volumétricas de fibras de até 38%, com baixa porosidade. Além disso foi demonstrado que um nível mais alto de vácuo melhoraria significativamente a resistência à tração dos compósitos reforçado com fibras alinhadas de curauá. Na Tabela 9 é apresentado os valores de tensão e módulo de elasticidade obtidos na pesquisa de Rodrigues, Souza e Fujiyama (2015) para o compósito reforçado com fibras de curauá produzido com o maior nível de vácuo e maior fração volumétrica.

Outros autores como Zah *et al.*, (2007) também demonstraram que a substituição de fibras de vidro por fibras de curauá implica em diversas vantagens sociais, pois as fibras de curauá, além de favorecer a sustentabilidade, é um fator de geração de renda para pequenas comunidades. A Tabela 9, abaixo, apresenta alguns dos resultados de pesquisas que utilizaram fibras de curauá no reforço de compósitos.

Tabela 9 – Compósitos reforçados com fibras de curauá

Autor	Compósitos	Fração de Fibra (m/m)	Disposição/Orientação/Comprimento das Fibras	Processamento	Concentração/Tratamento	Resistência a Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Alongamento Ruptura
		22,20%			-	34,70	4,04	-
Giocomi (2000)	Poliéster/Curauá	28,40%	Mantas	Moldagem por Compressão	-	53,10	5,00	-
		29,40%			-	40,00	3,64	-
Zah <i>et al.</i> , (2007)	-	-	Mantas	-	-	46,58	3,78	-
Silva (2010)	Poliéster/Curauá	20%	Mantas/ 5 cm	Moldagem por Compressão a Quente	Lavagem e Secagem	50,00	2,93	-
Lopes (2011)	Poliéster/Curauá	40%	Contínuas e Alinhadas	Moldagem Manual (hand-lay-up)	Limpeza e Secagem	103,22 ± 14,03	1,31 ± 0,26	6,90 ± 1,36 (%)
Spinacé <i>et al.</i> , (2011)	Poliétileno/Curauá	20%	Mantas	-	-	31,58 ± 0,55	3,15 ± 0,35	4,04 ± 0,25
	PEAD/Curauá	20%	Mantas	-	-	29,70 ± 0,34	2,83 ± 0,58	2,9 ± 0,31
Oliveira (2015)	Curauá/Poliéster	20%	Contínuas e Alinhadas	Moldagem por Compressão	5% NaOH	180,00	16,8	-
Beltrami (2014)	PHBV/Curauá*	20%	Manta/2,5cm	Extrusão/Injeção	5% NaOH	30,00	3,60	-
Rodrigues, Souza e Fujiyama (2015)	Poliéster/Curauá	38%	Contínuas e Alinhadas	Infusão à Vácuo	-	86,71 ± 2,09	3,883 ± 0,233	2,8 ± 0,1 (%)
Teixeira (2019)	Poliéster/Curauá	-	Manta/4 a 6cm	Laminação Manual	5% NaOH	14 ± 5,5	0,91	1,12±0,52 (%)

Fonte: Giocomi (2000); Zah *et al.*, (2007); Silva (2010); Lopes (2011); Spinacé *et al.*, (2011); Oliveira (2015); Silva (2008); Beltrami (2014); Rodrigues, Souza e Fujiyama (2015); Teixeira (2019).

Conforme o exposto, tornam-se necessário mais estudos para descrever a eficiência do comportamento estrutural de materiais compósitos reforçados com fibras de curauá. Os conectores de cisalhamento, utilizados em componentes da construção civil, como em painéis de parede sanduíche, por exemplo, aparenta ser uma aplicação promissora, devido as boas características mecânicas deste material. Isso viabiliza a sua utilização nas diversas áreas da engenharia e indústria.

2.4. Painéis de paredes sanduíche de concreto pré-moldado/protendido

Os painéis de concreto pré-moldados/protendidos são compostos por duas camadas de concreto separadas por uma camada de isolamento térmico. Esses painéis desempenham duas funções principais nas construções: fechamento vertical e isolamento térmico. Além disso, muitos desses painéis possuem função estrutural, ou seja, são responsáveis por transmitir a carga vertical dos pavimentos inferiores para as fundações, bem como suportar as cargas laterais geradas pelo vento e terremotos. Esses painéis são versáteis e podem ser utilizados em diferentes tipos de estruturas, como estruturas metálicas, estruturas de concreto armado e estruturas pré-moldadas/protendidas (PCI COMMITTEE REPORT, 2011). A indústria desse sistema construtivo favorece requisitos e diretrizes básicas para o desenvolvimento de uma “construção verde”, promove desempenho térmico justificável, com isolamento incorporado entre camadas de concreto, e velocidade aceitável nos processos construtivos (NAITO *et al.*, 2012). A união das camadas de concreto é desempenhada por conectores, responsáveis por manter as duas paredes de concreto unidas e garantir o painel intacto durante as etapas de içamento das peças e demais condições de serviço. Os conectores passam de uma camada de concreto para outra atravessando a camada de isolamento (LEE; PESSIKI, 2006; NAITO *et al.*, 2012; PCI COMMITTEE REPORT, 2011).

A posição do isolamento entre as paredes de concreto cria uma ruptura térmica contínua. Porém, os conectores, interrompem a continuidade da camada de isolamento, gerando pontes térmicas. Dependendo do tipo de material de fabricação dos conectores, a eficiência energética do sistema construtivo pode ser reduzida devido a sua elevada condutividade térmica, que podem ultrapassar a taxa de transmissão de calor do próprio material isolante (LEE; PESSIKI, 2006). O desempenho térmico do painel é reduzido devido às grandes quantidades de calor conduzidas pelos conectores de cisalhamento, e também das regiões sólidas de concreto que porventura penetram no isolamento.

Esses painéis devem ser capazes de suportar as ações provenientes do vento, gravitacionais, variações de temperatura e abalos sísmicos. No caso dos painéis pré-fabricados,

também devem ser capazes de suportar as ações decorrentes da fase de içamento e transporte das peças (AZEVEDO, 2013). Efeitos de flexão são demandados no momento de levantamento e transporte dos painéis gerando esforços de compressão, tração e cisalhamento no interior dos painéis. Isso exige conexões entre o interior e as camadas externas de concreto. Nesse momento os painéis devem se comportar como um elemento misto e os conectores devem desempenhar o seu papel de transmitir os esforços de cisalhamento (NAITO *et al.*, 2012). A Figura 6 ilustra a demanda da ação composta gerada pela flexão. Nisso surgem tensões de cisalhamento longitudinais, resistidas pelos conectores, na direção perpendicular ao carregamento.

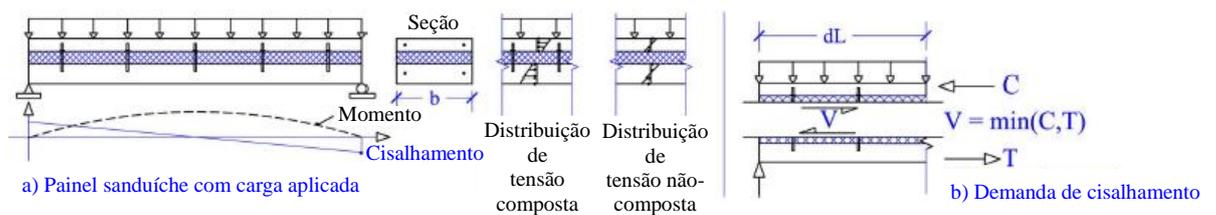


Figura 6 - Cisalhamento longitudinal em um painel sanduíche submetido à flexão. Adaptado de Naito *et al.* (2012)

2.5. Conectores de cisalhamento

Os painéis de parede sanduíche pré-fabricados e protendidos exigem o uso de conectores de cisalhamento para transferir a carga entre as camadas de concreto e assegurar a ação composta. Esses conectores devem ser projetados para suportar aos carregamentos, levando em consideração a resistência do material e do concreto ao cisalhamento (LOU *et al.*, 2022). Os conectores de cisalhamento são comumente feitos de concreto (zonas sólidas de concreto ligando as camadas), aço e polímeros reforçados com fibras (FRP). Os conectores de aço e de FRP geralmente são fabricados na forma de treliças, pinos, grades, hastes, placas e outras configurações possíveis (PCI COMMITTEE REPORT, 2011), como ilustrado na Figura 7. De acordo com Naito (2012) dentre os principais incluem aço carbono, aço inoxidável, aço carbono galvanizável, polímero reforçado com fibras de carbono (CFRP), polímeros reforçados com fibras de vidro (GFRP), polímero reforçado com fibra de basalto (BFRP) e polímeros reforçado com fibras de vidro (GFRP). Para testar a eficiência dos conectores de cisalhamento em painéis de parede sanduíche, vários experimentos e estudos foram realizados com a utilização de conectores de cisalhamento em painéis de parede sanduíche.

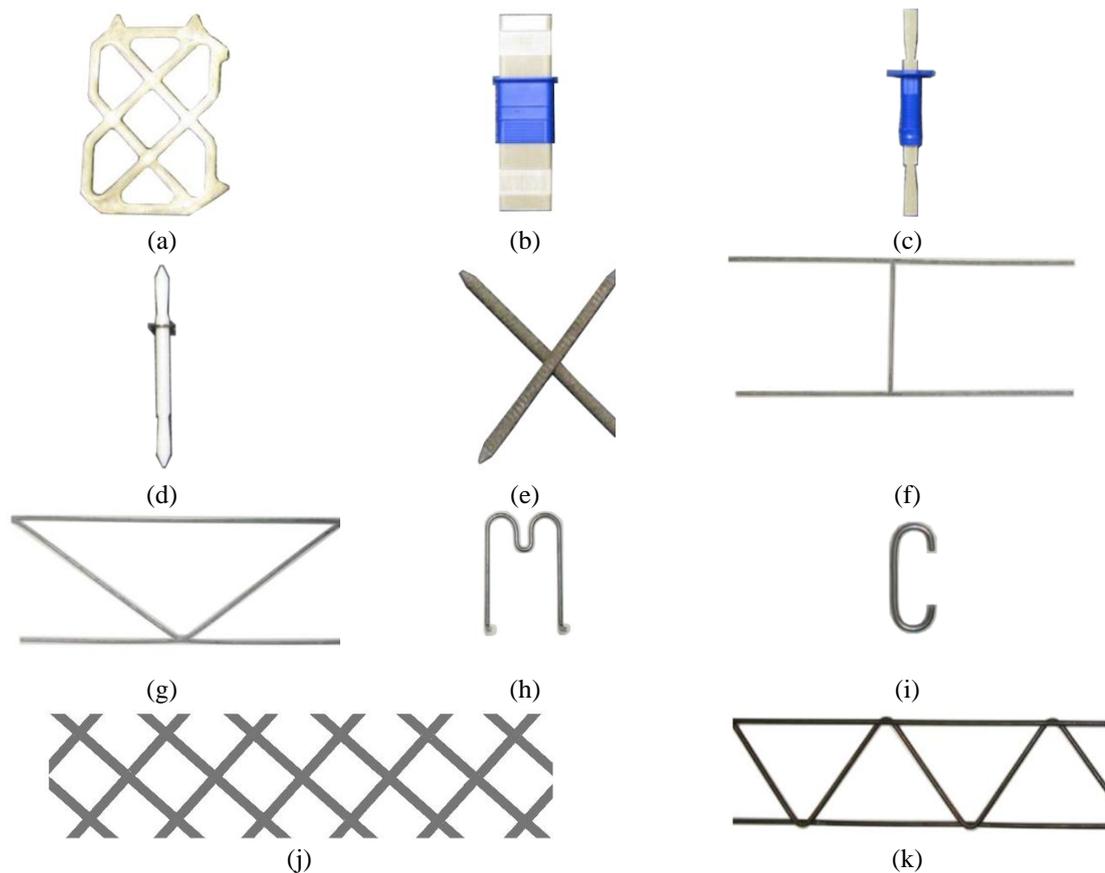


Figura 7 – Conectores de cisalhamento para painéis de parede sanduíche: (a) grade de GFRP; (b) pino compósito de GFRP; (c) pino não compósito de GFRP; (d) barra de GFRP; (e) barra de BFRP; (f) treliça retangular de aço galvanizado; (g) treliça triangular de aço galvanizado; (h) clipe em formato “M” de aço galvanizado; (i) clipe em formato de “C” de aço galvanizado; (j) grade de CFRP; (k) treliça triangular de aço 1008. Adaptado de Silva (2020) e Naito (2012).

Com base na proposta da pesquisa, é relevante destacar os estudos em painéis de parede pré-moldada de concreto com isolamento incorporado, com ênfase na análise do comportamento mecânico dos conectores submetidos a cisalhamento duplo em ensaios do tipo *ensaios push-out*, conforme as prescrições da EN 1994-1-1 (2004). Diante da diversidade de estudos realizados nessa área, com os diversos tipos de conectores utilizados para esse fim, foi realizado um breve levantamento do desenvolvimento dessa área de pesquisa, conforme apresentado na próxima seção.

2.6. Conectores de cisalhamento reforçado com fibras

Com o objetivo de realizar uma revisão sistemática da literatura por meio de técnicas de bibliometria sobre os conectores reforçados com fibras (FRP) para painéis estruturais de concreto, indexou-se artigos publicados das bases de dados da *Web of Science* e *Scopus*.

Definiu-se como *string* de pesquisa a expressão: ("concrete sandwich" OR "sandwich wall panel*" OR "precast concrete" OR "sandwich panel*") AND ("connect*" OR "shear tie*" OR "shear connect*") AND ("FRP" OR "fibre* reinforced* polymer*" OR "fiber reinforced* polymer*"). Em ambas as bases de dados, a busca foi realizada no espaço temporal de 2012 a 2023, englobando as áreas de conhecimento de "Engineering Civil", "Construction Building Technology", "Mechanics, Materials Science Composites" e "Engineering Mechanical" na primeira base de dados, já na segunda, atribuiu-se as áreas de "Engineering Civil" e "Materials Science". Cabe destacar que os operadores lógicos, assim como o espaço temporal e áreas de conhecimento foram utilizados de modo a restringir a busca encontrada nas bases de dados utilizadas. Dessa maneira, foram encontrados 141 resultados na base de dados do *Web of Science*, com 1538 citações e 216 resultados na base de dados da *Scopus*, com 2051 citações sobre o tema.

Com base nos registros encontrados, foi realizada uma análise dos registros encontrados para selecionar os artigos que correspondiam ao campo de pesquisa adotado neste trabalho para a construção da revisão da literatura. O critério de seleção utilizado foi a escolha de artigos relevantes e que realizaram, principalmente, ensaios experimentais em painéis de parede sanduíche de concreto com isolamento incorporado, analisando o comportamento mecânico dos conectores de cisalhamento. Essa análise teve como objetivo garantir a confiabilidade e validade dos resultados obtidos na pesquisa, selecionando apenas os artigos que estivessem diretamente relacionados ao campo de estudo. Uma vez realizada a análise dos trabalhos, construiu-se a revisão da literatura

Naito *et al.* (2012) avaliaram a força relativa e a resposta mecânica de quatorze tipos de conectores diferentes, incluindo o tipo de material utilizado e configurações geométricas com a realização dos testes identificou-se uma variação considerável de resistência, rigidez e deformabilidade entre os espécimes. No estudo desenvolveu-se, por meio dos testes, relações constitutivas tri-lineares para aproximar a resposta à flexão de painéis de parede sanduíche. Em uma de suas conclusões provou-se que a rigidez dos componentes está sensivelmente relacionada com a geometria do conector. Constatou-se também que o conector do tipo treliça rígida demonstraram-se mais rígidos que os conectores do tipo pino que trabalham na flexão. No que se refere à utilização do isolamento constatou-se maiores ganhos de resistência ao cisalhamento (cerca de 21%) com uso de EPS (mais rugoso) ao invés de XPS usados em conjunto com conectores do tipo CFRP.

Com base no estudo realizado por Naito *et al.* (2012) e na constatação da grande variedade de conectores de cisalhamento existentes, bem como na afirmação de O'Hegarty e

Kinnane (2020) de que os ensaios de flexão e de cisalhamento (*push-out*) são os mais comuns, organizou-se os tópicos desta seção de acordo com os estudos realizados com conectores constituídos de diferentes materiais, em ordem cronológica crescente.

2.6.1. Conectores de aço

Na pesquisa conduzida por Goudarzi *et al.*, (2016) foi estudado o comportamento de conectores de chapa de aço dobrada a frio em forma de “Z”. Nesse caso os flanges da peça ficariam embutidas dentro das camadas de concreto de uma extremidade a outra. Os conectores foram investigados por meio de testes experimentais de cisalhamento com quatro tipos de placa em forma de “Z” para avaliar o efeito da largura e espessura desses conectores frente a resistência ao cisalhamento e rigidez. Dessa forma, constatou-se que o aumento da largura desses conectores apresentara melhorias na resistência ao cisalhamento e rigidez de maneira mais efetiva que o aumento da espessura. Esses conectores também se apresentaram estruturalmente mais eficientes que os conectores de treliça de aço e no formato de grade.

2.6.2. Conectores de BFRP

No estudo conduzido por Tomlinson, Teixeira e Fam (2016) foi apresentado o resultado de testes de 38 painéis sanduíche de concreto com conectores de cisalhamento de polímero reforçado com fibras de basalto (BFRP) e aço, variando ângulo do conector, diâmetro, direção de carga e ligação com o isolamento. Foi desenvolvido um modelo analítico simples e as conclusões obtidas foram: o aumento do diâmetro do conector aumentou a capacidade de carga última e a rigidez em todos os ângulos de inserção testados; o aumento do ângulo de inserção do conector aumentou a capacidade de carga última e a rigidez para conectores de BFRP e aço de diâmetros moderados a grandes (6 e 8 mm) em compressão ou tração diagonal; conectores de BFRP são menos resistentes em compressão, mas a diferença de resistência diminui com o aumento do diâmetro; conectores de aço apresentam resistência duas vezes maior do que os de BFRP em compressão; o isolamento aumentou a resistência ao cisalhamento em 173%; e o modelo teórico apresentou valores previstos próximos aos testados, com a razão K diminuindo com o aumento do diâmetro e do ângulo do conector. Diante disso, o estudo investigou a influência do ângulo e diâmetro do conector e da aderência da espuma no desempenho dos painéis de sanduíche pré-fabricados de concreto isolados, comparando os conectores de BFRP e aço.

Tomlinson e Fam (2016) analisaram o desempenho de uma parede isolada de concreto parcialmente composta, projetada para suportar cargas combinadas de flexão e axial, utilizando conectores de cisalhamento e reforço longitudinal de polímero de fibra de basalto (BFRP). Os painéis de parede foram submetidos a cargas axiais variando de 0 a 900 kN aplicadas apenas na camada estrutural e em seguida, submetidos à flexão em quatro pontos até a falha. A ação composta pelo critério de resistência reduziu de 47% para 3% à medida que a carga axial aumentou de 150 para 900 kN, enquanto a ação composta pelo critério de rigidez foi muito menor, de 8% a 2,5%. As paredes testadas apresentaram entre 60% e 89% da resistência em relação a um painel de parede similar reforçado com aço e com a mesma proporção de reforço, e essa porcentagem aumentou com a carga axial.

Em outra pesquisa realizada por publicado por Tomlinson e Fam (2016b), foi apresentado um modelo numérico para prever a resposta de flexão de painéis de concreto pré-moldados parcialmente compostos e isolados. O modelo foi verificado em relação aos dados experimentais e utilizado para realizar um estudo paramétrico sobre o impacto de diferentes aspectos do sistema de diferentes conexões. Dessa forma, o modelo apresentado correspondeu aos resultados experimentais, podendo ser utilizado para quantificar o grau de ação composta do painel ou projetar os conectores. O estudo também demonstrou que o aumento da taxa de reforço da conexão de cisalhamento usando conectores maiores ou mais espaçados aumenta demasiadamente a resistência e a rigidez do painel.

Em um estudo mais recente publicado por Huang *et al.* (2023) foi proposto um novo tipo de conector BFRP em forma de barra inserida diagonalmente em painéis de concreto pré-moldados com núcleo isolante, do inglês, *Precast Concrete Sandwich Panels* (PCSPs), com o objetivo de alcançar tanto a conveniência na construção quanto o comportamento parcialmente composto. Nos experimentos, os resultados indicaram que o conector BFRP do tipo barra pode oferecer um sistema de ancoragem confiável no concreto, bem como rigidez e capacidade suficientes para alcançar um PCSP parcialmente composto.

2.6.3. Conectores de CFRP

No estudo conduzido por Hodicky *et al.* (2015), foi realizado uma investigação experimental do comportamento de 46 protótipos de painéis sanduíche usando conectores de grades de polímero reforçado com fibras de carbono (CFRP) e espuma rígida como mecanismo de resistência ao cisalhamento. Os parâmetros examinados incluíram o espaçamento entre as linhas da grade CFRP e a espessura da espuma rígida. Os modos de falha observados foram fissuração e/ou deslizamento por cisalhamento da espuma rígida e ruptura ou encurvamento da

grade CFRP. Os painéis com grade CFRP tiveram maior resistência ao fluxo de cisalhamento do que os painéis com grades verticais de BFRP e GFRP, com reduções de 5-10% e 10-25%, respectivamente.

O'Hegarty *et al.* (2019) compararam resultados experimentais com os resultados de simulações numéricas para avaliar a interação entre as camadas em painéis sanduíche de concreto pré-moldado com concreto reforçado com fibras de alto desempenho, observando, especialmente, a função dos conectores de cisalhamento e isolamento na formação da ação composta. A espessura da camada externa (fina) teve um impacto significativo na capacidade de carga, e a adição conectores CFRP teve um efeito limitado na ação composta.

2.6.4. Conectores de GFRP

Apesar da eficiência estrutural dos conectores de aço e concreto. Esses conectores são ineficientes no que condiz a eficiência térmica do sistema. A boa condutividade térmica desses materiais promove o surgimento de pontes térmicas entre as camadas de concreto e isolamento. Segundo Woltman, Tomlinson e Fam (2013) os conectores de cisalhamento de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP) são ótimas alternativas para reduzir o problema das pontes térmicas ocasionados pela boa condutividade dos conectores de aço e concreto. Esses autores ensaiaram experimentalmente 50 espécimes de painéis de parede sanduíche compostos por duas camadas de concreto e isolamento incorporado na configuração de cisalhamento duplo. Na pesquisa foram testados três tipos de conectores GFRP com diferentes extremidades e diâmetros, revestidos com areia, no formato de hastes, e comparados com conectores convencionais de aço e polímero. Os componentes demonstraram-se satisfatórios quanto ao atrito com a camada de isolamento e resistência ao cisalhamento quando comparado com os conectores convencionais de polímero, porém inferior aos conectores de aço. A variação da geometria e tamanho não influenciaram em sua resistência. No estudo também foi constatado uma contribuição significativa da adesão entre a camada de concreto e isolamento, quantificada em aproximadamente 28%, porém com bastante variabilidade.

No estudo conduzido por Lameiras *et al.* (2013) foi proposto o uso de conectores laminados de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRPs) para um painel sanduíche (inovador) para construção de casas modulares pré-fabricadas, composto por camadas de concreto autoadensável reforçado com fibras de aço, do inglês, *Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete* (SFRSCC). Para avaliar o comportamento das conexões, foram realizados programas experimentais com diferentes tipos de conectores GFRP, dos quais foram produzidos e estudados. Os conectores perfurados foram considerados os mais atraentes, por

sua simplicidade, economia de materiais e boa capacidade de carga. Os resultados indicaram que, apesar das restrições impostas pela espessura relativamente pequena das camadas de SFRSCC, os conectores embutidos forneceram a maior capacidade de carga.

Na segunda parte de seu estudo, Lameiras *et al.* (2013b) foi proposta uma investigação numérica do comportamento estrutural do painel sanduíche, cujo foi avalizado até um nível relativamente elevado de dano, através da simulação do comportamento não-linear dos materiais das camadas SFRSCC devido à iniciação e propagação de trincas. Os resultados mostram que é possível adotar um arranjo com apenas conectores verticais discretos de 0,40 m, mantendo o nível de tensão do estado limite última (ULS) nas camadas SFRSCC e nos conectores GFRP confortavelmente abaixo da resistência correspondente desses materiais. Os resultados obtidos também sugerem que a configuração de painéis composta por camadas de SFRSCC de espessuras inferiores a 60 mm pode apresentar problemas práticos na realização da conexão embutida.

Chen *et al.* (2015) investigaram a utilização de conectores de laminado de FRP em painéis sanduíche de concreto. Foram realizados ensaios de flexão e análises por elementos finitos em oito painéis, incluindo seis painéis sanduíche com diferentes tipos de conectores de cisalhamento. No estudo, os resultados demonstraram que os painéis sanduíche pode ser usado para aplicações com base nos critérios de resistência estática e deflexão imediata, mas outros fatores, como a fluência, precisam ser considerados para as aplicações na engenharia.

Choi, Kim e You (2016) também estudaram o comportamento estrutural de painéis de parede de concreto com isolamento térmico incorporado, reforçados com conectores de cisalhamento de grades GFRP, quando submetidos a cargas cíclicas induzidas pelo vento. Foram ensaiados quatro espécimes em escala real, sendo dois submetidos a carregamento monotônico antes do teste cíclico para estabelecer um plano de carregamento. Os espécimes foram projetados e verificados para atender aos critérios de segurança e de serviço. Assim, confirmou-se que o tratamento superficial realizado no isolamento de poliestireno extrudado, do inglês, *Extruded Polystyrene* (XPS) foi significativamente benéfico para o comportamento composto dos painéis frente aos carregamentos.

Woltman, Noel e Fam (2017) avaliaram a eficiência térmica de painéis sanduíche de concreto pré-moldado, do inglês, *Precast Concrete Sandwich Panels* (CSPs) com conectores de cisalhamento GFRP. Foram realizados testes experimentais em dez espécimes, e os resultados mostraram que CSPs reforçados com GFRP podem fornecer resistência térmica equivalente ou melhor em comparação com CSPs reforçados com aço, devido à menor condutividade térmica do GFRP.

Na pesquisa experimental realizada por Choi, Jang e Yun (2019) foi investigado o comportamento de sistemas de paredes de concreto pré-fabricado, do inglês, *Precast Concrete Sandwich Panels* (PCSPs) com conectores de cisalhamento GFRP do tipo grade. As variáveis do estudo incluíram o material utilizado no isolamento, a espessura do isolamento e o espaçamento do conector. Os resultados mostraram que a resistência da ligação da interface entre as camadas de concreto e isolamento, e a capacidade de fluxo de cisalhamento tende a diminuir com o aumento da espessura do isolamento.

He *et al.*, (2020) investigaram o comportamento de conectores GFRP em forma de “I”, com dimensões de 76x38x6,35mm, moldados via pultrusão com resina epóxi, para aplicações em painéis de parede sanduíche com isolamento incorporado, do inglês, *Insulated Precast Concrete Sandwich Wall Panels* (IPCSWPs). Os conectores foram ancorados nos painéis com vergalhões de aço no sentido transversal para melhorar a fixação nos painéis de concreto. As camadas de fibra de vidro foram propostas em direções multiaxiais para melhorar as propriedades mecânicas do conector em múltiplas direções. As fibras foram orientadas na direção longitudinal, na direção multiaxial de $\pm 45^\circ$ e na direção $0^\circ/90^\circ$ (no flange) para favorecer o desempenho quanto a capacidade de carga do material frente as solicitações. As duas últimas configurações representaram 25 e 10% composição total de fibras, respectivamente. Esses materiais apresentaram elevada rigidez e capacidade de carga, com baixa condutividade térmica. As aplicações do conector na engenharia foram sugeridas por meio de formulações obtidas por meio de análises numéricas e experimentais para estimar a sua capacidade de carga e rigidez.

Huang *et al.* (2020) investigaram o uso de conectores GFRP em formato de cruz em painéis de parede composta de concreto, do inglês, *Precast Concrete Sandwich Panels* (PCSPs). No experimento realizado por esse autor foi demonstrado capacidades consideráveis de arrancamento e cisalhamento para o conector proposto. A falha dos espécimes de PCSP foi governada pela falha do conector GFRP, sem esmagamento de concreto.

Na pesquisa realizada por Egbon e Tomlinson (2021) foi analisado a contribuição de chanfros (trapezoidais e retangulares) em sistemas de painéis sanduíche com diferentes tipos de isolamento (EPS, PIR, XPS) e barras rígidas em forma de X de GFRP (9,5 mm e 16 mm) como conectores de cisalhamento, por meio de testes experimentais. Dentre as conclusões obtidas, afirmou-se que os chanfros são eficazes em aumentar a resistência e rigidez das conexões de cisalhamento com isolamento XPS. No entanto, os chanfros são menos eficazes em painéis feitos com PIR e EPS, já que esses tipos de isolamento aderem adequadamente ao concreto durante os ensaios.

No estudo conduzido por Huang *et al.* (2021) foi avaliado o desempenho estrutural de painéis pré-fabricados de concreto sanduíche com conectores GFRP do tipo pino. Foi proposta uma parede estrutural nervurada, no qual o desempenho foi investigado. Os resultados indicaram que os painéis com conectores de GFRP do tipo pino poderiam ser projetados como não-compostos. Além disso, a parede estrutural nervurada proposta mostrou um bom potencial para alcançar um painel leve e manter um desempenho estrutural considerável em comparação com a parede convencional.

Na pesquisa conduzida por Lameiras *et al.* (2021) foi descrito um programa experimental para analisar o comportamento sísmico de painéis pré-fabricados de parede sanduíche de concreto reforçado com fibras, do inglês, *Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete* (SFRSCC). Os painéis foram compostos por duas camadas externas de SFRSCC, conectores de GFRP e núcleo de EPS. Os painéis foram submetidos a testes cíclicos, com e sem abertura, para avaliar seu comportamento sob cargas laterais. Os resultados indicaram que os painéis apresentaram modo de falha dominado por flexão e que, sem abertura, o dano se concentrava nas regiões inferiores, sem ocorrer trincas de cisalhamento. Para aumentar a capacidade e a tenacidade da flexão nas regiões críticas, foi sugerido o uso de conectores FRP de maior capacidade. A abertura realizada nos painéis afetou negativamente a resistência em 27%, porém a rigidez inicial não foi afetada pela abertura. Os protótipos testados conseguiram suportar cargas laterais elevadas e o painel sem abertura suportou 106 kN/m.

Choi *et al.* (2022) avaliaram o efeito do tipo e da disposição (unidirecionais e bidirecionais) das grades de GFRP no desempenho de painéis de parede sanduíche, do inglês, *Insulated Concrete Sandwich Wall Panels* (ICSWPs). Em sua pesquisa, amostras foram submetidas a ensaios de flexão para determinar as cargas de fissuração, as rigidezes e as resistências. As variáveis dos ensaios foram os tipos e as quantidades das grades de GFRP. As conclusões da pesquisa demonstraram que o arranjo unidirecional pode ser uma opção favorável de projeto de ICSWPs, atendendo aos critérios de projeto necessários e simplificando o processo de fabricação.

Chen *et al.* (2022) analisaram as propriedades mecânicas de conectores FRP ancorados em concreto durante 14 dias de cura, utilizando ensaios e simulações com o software ABABQUS. Foi estudado três tipos de conectores GFRP tipo pino de diferentes seções. Nos resultados apresentados pelos ensaios e simulações numéricas (erro inferior a 10%) concluiu-se que o espaçamento entre as peças de conexão teve uma influência significativa na capacidade de carga dos painéis, sendo inversamente proporcional à carga final em uso normal. A profundidade de ancoragem dos conectores influenciou significativamente a capacidade de

carga ao cisalhamento do conector, e a análise da camada de isolamento térmico mostrou que quanto mais espessa a camada de isolamento térmico, menor a capacidade de carga de cisalhamento da amostra.

2.6.5. Conectores PERFOFRP

Na pesquisa conduzida por Lameiras (2015), um painel estrutural composto por duas camadas de concreto do tipo sanduíche com isolamento incorporado, que proporciona resistência térmica, foi desenvolvido. Esses painéis foram confeccionados utilizando concreto autoadensável e reforçados com fibras de aço (SFRSCC). O concreto tinha resistência média à compressão variando entre 58 MPa e 65 MPa e o aço tinha resistência média variando entre 1244 e 1443 MPa. Isso permitiu a redução da espessura das camadas de concreto, eliminando a necessidade de cobertura exigida pelo aço convencional. A transferência de tensões cisalhantes foi viabilizada por meio de conectores de cisalhamento do tipo GFRP perfurado (PERFOFRP), fabricados por infusão de resina poliéster à vácuo. Os orifícios nos conectores têm a função de fornecer um travamento mecânico, assegurado pelos pinos de concreto formados pelo concreto autoadensável e pelos furos no laminado. O comportamento dos conectores PERFOFRP em relação ao cisalhamento foi investigado através de ensaios de *push-out*, arrancamento e corte longitudinal realizados nos painéis.

A pesquisa foi conduzida por uma série de ensaios em conectores de cisalhamento fabricados com GFRP. Os ensaios de *push-out* foram realizados com base na metodologia descrita pela EN 1994-1-1 (2004), utilizando uma máquina universal que controlava o deslocamento a uma taxa de 0,10 mm/min. Foram utilizados seis transdutores de deslocamento Linear Variável (LVDTs), posicionados para medir o escorregamento relativo entre os conectores e as camadas de concreto. Os conectores e a configuração do ensaio de *push-out* podem ser visualizados na Figura 8. Entre as chapas de polímero utilizadas foram fabricados conectores com mantas de fibra de vidro picada (CSM). Esses conectores foram identificados como CSM, compostos por cinco camadas de CSM, cada uma com 450 g/m². Os conectores tinham dimensões de 12,5 cm de largura por 35 cm de altura e eram posicionados de forma a proporcionar 100 mm de frente de concreto, 60 mm de embutimento e 50 mm de elevação nas regiões de concreto. A concretagem dos corpos de prova foi realizada de forma horizontal, com cada parte concretada isoladamente, utilizando SFRSCC. Não foram utilizados isolantes térmicos devido à metodologia de ensaio, portanto, a contribuição da aderência entre o isolante e o concreto não foi considerada.

Os corpos de prova eram compostos por duas camadas externas de concreto, com dimensões de 400 mm (largura) \times 400 mm (altura) \times 60 mm (espessura), unidas aos perfis metálicos por meio dos conectores, que eram perfurados e aparafusados ao aço. Foram empregados dois perfis metálicos no formato de "U," do padrão *European Standard Channels* (UPN), denominados UPN 140, com altura de 140 mm, comprimento de 350 mm e massa linear de 16 kg/m. Esses perfis foram unidos em oposição para formar um perfil em formato de "I." Os conectores PERFOFRP foram inseridos na região de união entre os perfis U e aparafusados de forma firme.

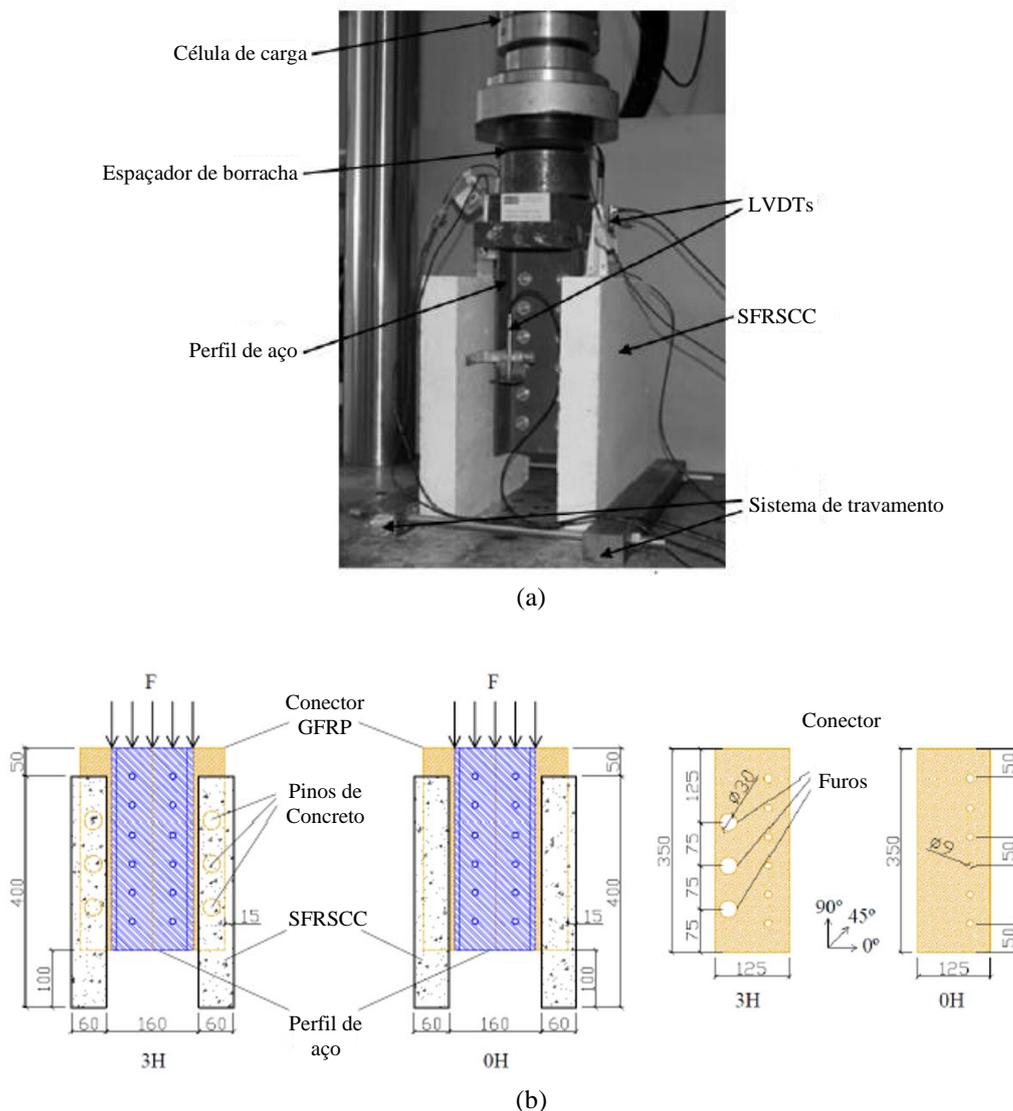


Figura 8 – Configuração do ensaio de *push-out*. Adaptado de Lameiras (2015)

Com vista a análise dos resultados da pesquisa conduzida por Lameiras (2015), a qual envolveu a utilização de conectores perfurados em GFRP de CSM e cujos resultados são apresentados na Tabela 10, foi constatado que os conectores denominados "PERFOFRP" demonstraram uma notável aderência ao concreto nos ensaios realizados. Portanto, pode-se afirmar que a resistência ao cisalhamento das conexões nos espécimes sem frentes e pinos de concreto equivale a aproximadamente 38% da resistência ao cisalhamento observada nas conexões que incluem as frentes e pinos de concreto. É importante ressaltar que as conexões desprovidas dos pinos de concreto, os quais são resultantes dos furos nas chapas, independentemente do impacto das frentes de concreto, representam aproximadamente 22% da resistência dos conectores ao cisalhamento.

Huang e Dai (2019) investigaram três tipos de conectores GFRP perfurados nos formatos de chapa plana (semelhante aos conectores PERFOFRP), chapa corrugada e tudo hexagonal, por meio de ensaio *push-out*, para utilização em painéis de parede sanduíche, com isolamento de XPS, conforme apresentado na Figura 9. Foi realizado ensaios *push-out* (com três camadas de concreto ligados por conectores e dois isolamentos entre camadas) para avaliar o desempenho dos conectores no cisalhamento quanto ao deslocamento relativo, modos de ruptura, forças cisalhantes, espessura e geometria do laminado. O concreto tinha resistência média à compressão variando entre 35,4 MPa e 46,6 Mpa. Os pesquisadores empregaram blocos de concreto compostos por três camadas de concreto, cada um com uma espessura de 75 mm e incorporando armaduras de 12.5 mm para o aço longitudinal e 10.0 mm para o aço transversal. Entre as camadas de concreto, foram inseridas duas camadas de isolamento de poliestireno extrudido, do inglês, *Extruded Polystyrene* (XPS) com uma espessura de 50 mm. Os conectores foram fabricados utilizando fibras orientadas de vidro como reforço por meio de infusão de resina poliéster à vácuo. A ruptura dos materiais empregado por esses autores ocorreu por cisalhamento longitudinal com a ruptura das fibras por tração. O aumento da espessura dos componentes contribuiu para reduzir a flambagem e deformação e o material no formato hexagonal apresentou-se comportamento bidirecional, desempenhando melhores resultados aos longos das duas direções no plano. Por sua vez, He *et al.*, (2020) em uma investigação experimental e numérica apresentaram um novo conector GFRP em forma de I para painéis de parede sanduíche. Eles foram submetidos a ensaios de cisalhamento quase estáticos no plano para avaliar o seu desempenho e descrevê-lo numericamente. Isso possibilitou determinar a capacidade de carga e rigidez dos conectores para o projeto dos painéis.

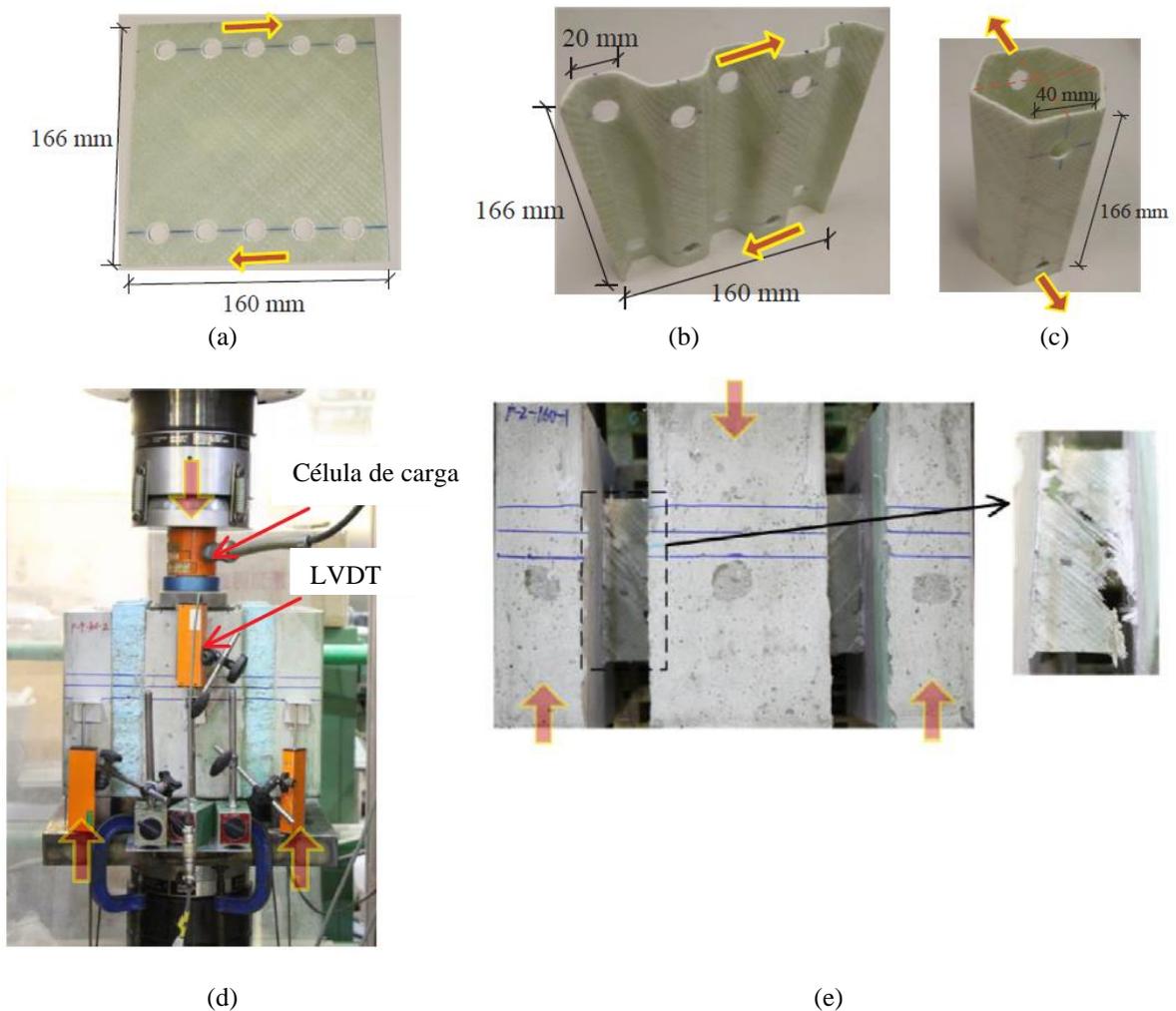


Figura 9 – Conectores de cisalhamento de GFRP perfurados e configuração do ensaio de *push-out*: (a) conector perfurado em formato de placa plana; (b) conector perfurado em formato de placa corrugada; (c) conector perfurado em formato de tudo hexagonal; (d) sistema de ensaio; (e) conector com rupturas inclinadas na região de contato com isolamento. Adaptado de Huang e Dai (2019).

Após a realização dos ensaios de *push-out* nas conexões foi constatado por Huang e Dai (2019) que o modo de falha predominante em todos os conectores analisados foi o cisalhamento longitudinal, resultando na ruptura das fibras de vidro submetidas à tração, como evidenciado na Figura 9(e). No início da aplicação da força, tanto a chapa plana quanto a chapa corrugada demonstraram uma resistência ao cisalhamento e rigidez semelhantes. Adicionalmente, também foi observado que, apesar da baixa espessura dos laminados, variando de 1,30 mm a 1,50 mm, a chapa plana exibiu uma menor deformação em comparação com a chapa corrugada. Isso se deveu ao fenômeno de flambagem observado exclusivamente no último caso. Além disso, foi constatado que o aumento da espessura dos laminados se mostrou eficaz tanto na prevenção da flambagem quanto na melhoria da deformabilidade do material.

Silva (2020) conduziu um estudo experimental, por meio de ensaio de *push-out*, com o objetivo de avaliar o comportamento mecânico dos conectores PERFOFRP em espécimes de painéis de parede sanduíche de concreto. Conforme descrito por Silva (2020), os corpos de prova foram produzidos de acordo com a geometria proposta no trabalho de Huang e Dai (2019), no entanto, as propriedades dos materiais compósitos foram ajustadas para se aproximar das características dos compósitos fabricados por Lameiras (2015). O concreto produzido tinha resistência média à compressão de 37,5 MPa. O autor descreveu detalhadamente o processo de fabricação e avaliação desses conectores, utilizando o método de moldagem por infusão de resina poliéster à vácuo com um sistema de produção de baixo custo. O sistema de infusão de resina à vácuo utilizado por Silva (2020) pode ser visualizado na Figura 10.



Figura 10 – Sistema de produção de compósitos de baixo custo por meio de infusão de resina à vácuo: (a) materiais para infusão de resina à vácuo sobre bancada; (b) Sistema de infusão de resina à vácuo parcialmente pronto para uso. Adaptado de Silva (2020)

Os painéis, nos quais os conectores foram incorporados, foram submetidos ao ensaio *push-out* para análise do comportamento mecânico da conexão, conforme visualizado na Figura 11. Após os ensaios, os conectores foram removidos do concreto para análise dos padrões de fissuração. Observou-se que todas as conexões apresentaram padrões de fissuração semelhantes. Os conectores com furos de 12,70 mm apresentaram o melhor desempenho mecânico. Os espécimes com esses conectores embebidos foram denominados de “SP-12.70-1.75”. Além disso, constatou-se uma relação entre o diâmetro do furo e o espaçamento entre os furos, indicando que um espaçamento de 22,22 mm para o diâmetro de 12,70 mm resultaria em maior capacidade de carga em comparação com as outras conexões estudadas e com as conexões do grupo de controle (sem furos). Os resultados também revelaram que os conectores PERFOFRP apresentaram menores deslocamentos relativos, maior rigidez e resistência ao

cisalhamento em comparação com os conectores do grupo de controle. A duplicação da fileira de furos nos conectores resultou em um aumento pouco significativo na capacidade máxima. Não foi observada uma tendência de aumento da resistência com o aumento da resistência do concreto. Além disso, verificou-se que a aderência entre o concreto e o isopor ocorreu apenas após a ruptura das conexões, devido às características de deformabilidade dos materiais.

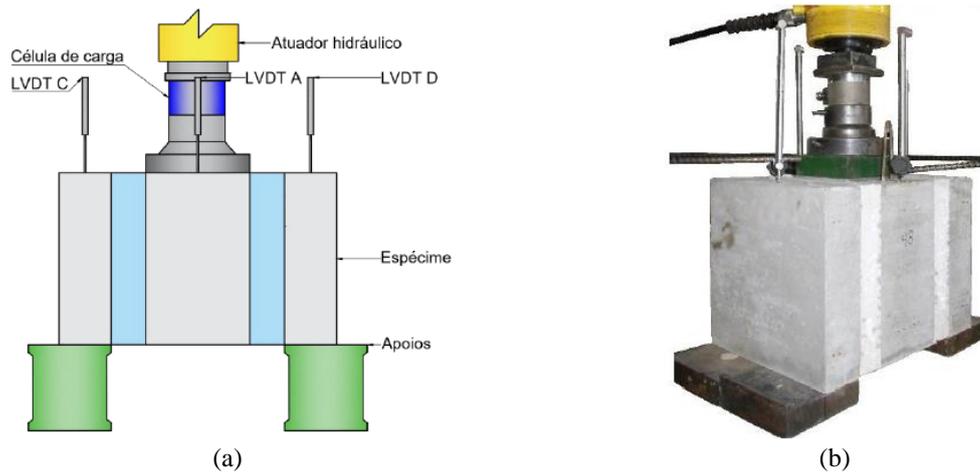


Figura 11 – Configuração do ensaio de *push-out*. Adaptado de Silva (2020)

Com vista aos conectores mencionados (aço, concreto e polímeros reforçados com vidro, carbono etc.) e sua viabilidade nas aplicações em painéis de parede sanduíche, um grande problema pode ser visualizado na perspectiva ambiental. O vidro, por exemplo, apesar de solucionar o problema das pontes térmicas gerada pelas conexões, desfavorece o meio ambiente no quesito: sustentabilidade. Esse material, por ser inerte, demora muitos anos para se decompor. Por outro lado, materiais renováveis, de baixa condutividade térmica e propriedades mecânicas satisfatórias, podem resolver esse problema. Nisso, além de solucionar o problema das pontes térmicas, também podem satisfazer os requisitos ambientais.

Com posse da descrição dos ensaios *push-out* e também da descrição dessa metodologia aplicada em painéis de parede sanduíche, propõe-se avaliar experimentalmente o desempenho dos conectores de cisalhamento reforçados com fibras de curauá. Na Tabela 10 observa-se os resultados de capacidade de carga, deslocamentos e rigidez inicial dos conectores perfurados de GFRP no formato de chapas fabricados para aplicação em conectores de cisalhamento para painéis de parede sanduíche dos trabalhos citados neste item 2.6.5.

Tabela 10 - Resultado dos ensaios *push-out* realizados conforme autoria.

Autorias	Espécime	Qtd.	$Q_{lo,u}$		$S_{lo,u}$		K_f	
			Média (kN)	CoV (%)	Média (mm)	CoV (%)	Média (kN/mm)	CoV (%)
Silva (2020)	SP-12.70-1.75	2	32,23	5,7	1,28	24,5	26,36	19
	SP-12.70-2.00	3	31,91	9,6	1,15	20,7	28,37	11,4
	SP-12.70-2.50	2	30,35	0,9	1,171	52,6	35,93	53,2
	SP-12.70-3.00	3	28,24	22,8	1,04	10,1	28,07	17,2
	SP-CLT	3	22,21	4,8	1,37	37,4	17,57	29,7
Lameiras (2015)	0H-CSM-WO	2	29,35	8	0,76	9	38,88	0,48%
	0H-CSM-EB	2	66,60	9	2,30	19	29,74	27,54%
	3H-CSM-WO	2	40,10	17,00	1,17	29,00	34,92	13,00%
	3H-CSM-EB	2	76,90	13	1,57	20	49,50	7,00%
Huang e Dai (2019)	F-100-2	2	15,8	10,5	8,00	31,13%	15,10	6,30%
	F-100-4	2	35,9	6,1	18,80	1,89%	19,00	20,5
	F-160-2	2	30,40	12,40	6,00	48,73%	28,10	13,50
	F-160-4	2	66,40	0,50	21,30	32,53%	40,80	6,00

Fonte: Silva (2020), Lameiras (2015) e Huang e Dai (2019).

A identificação dos espécimes de Silva (2020) foi “SP-XY-r” no qual SP representa espécime; XY significa o diâmetro (D) e espaçamento adotado para os furos; r identifica o corpo de prova e; CLT identifica as amostras do grupo de controle. A nomenclatura adotada para os espécimes de concreto com as conexões abordadas por Lameiras (2015) inclui: “0H” sem furos e; “3H” com 3 furos alinhados, com diâmetros (D) de 30 mm, espaçados de 75 mm de distância entre o centro dos furos ($2,5 \times D$); “CSM” significa manta de fibra picada de vidro (*Fiberglass Chopped Strand Mat*) e “WO” e “EB” identificam a presença ou não de concreto dos espécimes na frente do conector, conhecido com efeito *end-bearing*.

A nomenclatura adotada por Huang e Dai (2019) leva em consideração o comprimento do conector plano e a quantidade de camadas de fibra de vidro. “F” significa placa plana; “100” ou “160” significa o comprimento do conector em milímetros e; “2” ou “4” significa o número de camadas de fibra de vidro. A gramatura das camadas de fibra de vidro adotadas para os conectores era de 855 g/m². As fibras eram alinhadas biaxialmente nas direções de $\pm 45^\circ$ na matriz de resina epóxi.

2.6.6. Conectores PERFOCuFRP

Até o presente momento, todos os estudos foram conduzidos com materiais provenientes de fontes não renováveis (SALMON *et al.*, 1997; WOLTMAN; TOMLINSON; FAM, 2013; LAMEIRAS, 2015; HODICKY *et al.*, 2015; TOMLINSON; FAM, 2016; WOLTMAN; NOEL; FAM, 2017; HUANG; DAI, 2019; O’HEGARTY *et al.*, 2019; SILVA,

2020). Embora materiais como basalto, carbono e vidro sejam abundantes na natureza, sua produção de fibras não é sustentável e demanda considerável energia no processo de produção das fibras desses materiais. Apesar de exibirem boas características mecânicas e de desempenho térmico para painéis de parede sanduíche, sua aplicação é questionável do ponto de vista ambiental devido a esses fatores.

Nesse contexto, surge a possibilidade de utilizar fibras vegetais como alternativa às sintéticas, pois são renováveis e requerem menor consumo energético durante a produção. Algumas tentativas foram feitas para reduzir o impacto ambiental das fibras sintéticas em painéis sanduíche. Por exemplo, Mak, Fam e MacDougall (2015) investigaram a viabilidade do uso de fibras de linho como substitutas das fibras de vidro em painéis com isolamento incorporado. Os resultados mostraram que painéis com mantas de fibras de linho podem ter desempenho estrutural equivalente aos de mantas de fibra de vidro, mas requerem mantas mais espessas.

Outros pesquisadores têm se dedicado ao estudo de compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais, substituindo as fibras de vidro (BLEDZKI; GASSAN, 1999; KU *et al.*, 2011; RAJAK *et al.*, 2019; DE AZEVEDO *et al.*, 2021; VENKATARAJAN; ATHIJAYAMANI, 2021; DE AZEVEDO *et al.*, 2021; KANNAN; THANGARAJU, 2023). No entanto, ainda não foram encontrados estudos na literatura que buscassem reduzir o impacto ambiental causado pelos conectores constituídos de fibras sintéticas.

Nesse sentido, as fibras de curauá despontam como uma opção promissora, pois apresentam resistência à tração superior em comparação com outras fibras vegetais. Além disso, os compósitos reforçados com fibras de curauá exibem melhor desempenho mecânico do que os reforçados com outras fibras vegetais (ZAH *et al.*, 2007; KU *et al.*, 2011; VENKATARAJAN; ATHIJAYAMANI, 2021), o que ressalta a importância de pesquisas nessa área.

No âmbito da construção civil, as fibras de curauá têm sido estudadas para diversas aplicações, como materiais de matriz cimentícia para argamassa reforçada, reforço de solos em obras de terraplenagem, compósitos de espuma rígida de poliuretano utilizados em indústrias marítimas e aeronáuticas, como painéis sanduíche estruturais, e compósitos cimentícios para elementos estruturais, como tabuleiros de pontes, colunas e vigas (CARVALHO *et al.*, 2021; CZŁONKA *et al.*, 2021; FERRARA *et al.*, 2021; SILVEIRA; CASAGRANDE, 2021; ZUKOWSKI *et al.*, 2022).

Apesar de existirem estudos sobre o uso de fibras de curauá como reforço em compósitos poliméricos, ainda são limitados os estudos que abordam sua aplicação em

componentes da construção (PICANCO, 2005; PINTO, 2008; ALMEIDA JÚNIOR *et al.*, 2012; ALMEIDA *et al.*, 2013; MARTEL, 2019; SALGADO, 2019). Diante dessa lacuna, o conector proposto apresenta uma solução inovadora por meio de um estudo experimental que avalia a viabilidade do uso de conectores de polímero perfurado reforçado com fibras curtas de curauá (PERFOCuFRP) como conectores de cisalhamento em painéis sanduíche de concreto. Esses conectores possuem formato de chapas e apresentam vantagens em relação aos conectores mencionados anteriormente, pois além de serem de fontes renováveis, possuem geometria simples de fácil produção e proporcionam melhor resistência ao cisalhamento devido à criação de pinos de ancoragem, promovida pela passagem do concreto pelos furos do laminado de polímero. Diante dessa constatação, o estudo propõe a criação de um conector inovador, feito a partir de fontes renováveis, para uso em painéis sanduíche de concreto.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi conduzido no Laboratório de Estruturas (LABEST) e no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM), ambos pertencentes à Faculdade de Tecnologia (FT) da Universidade de Brasília (UnB). A pesquisa experimental consistiu em três etapas principais, conforme demonstrado no esquema representado na Figura 12. Os laminados utilizados receberam a designação "CH", que indica que são laminados cortados com dimensões médias de 25×250 mm, sendo referidas como chapas de polímero reforçado com fibras *curtas* de curauá, ou a chapas de polímero reforçado com fibras *longas* de curauá, ou melhor, chapas CuFRP ou chapas de CuLFRP. Essa nomenclatura (prefixo "CH") reflete os valores médios obtidos para cada parâmetro estudado das chapas, seja referente a um único laminado ou a laminados de um mesmo grupo nominal.

Além disso, para as chapas de CuFRP o nome acompanha a numeração do laminado e a gramatura nominal escolhida, por exemplo, o primeiro algarismo representa a numeração do laminado (laminado 1 ou laminado 2); o segundo algarismo representa a quantidade de mantas equivalentes de 450 g/m^2 , podendo ser 4, 5 ou 6. A fim de identificar individualmente cada amostra de laminado cortado de CuFRP, foi atribuído o nome com o prefixo "CP", que representa "corpo de prova", seguido por uma letra do alfabeto.

A nomenclatura das amostras originária dos laminados cortados fabricados com mantas de fibras longas de curauá leva em conta a realização do tratamento químico ou não das fibras de curauá, por exemplo: "FTX" tem significado de amostra de CuLFRP com fibras tratadas de número X e; "FNTX" significa amostra de CuLFRP com fibras não tratadas de número "X".

Já as amostras de resina poliéster são identificadas com o nome "RPX", que significa amostra de resina poliéster de número "X".

Para identificar os conectores nos espécimes de concreto, adotou-se uma nomenclatura específica exemplificada pelo conector "CO-16-A". Nesse caso, "CO" refere-se ao conector PERFOCuFRP; os algarismos intermediários representam o número do laminado que o conector foi extraído (laminado 1 ou laminado 2) e o segundo algarismo representa a quantidade de camadas equivalentes de CSM de 450 g/m^2 . Já a letra "A" identifica o próprio conector, uma vez que foram extraídos quatro conectores de cada laminado (A, B, ..., H).

Os espécimes de concreto analisados no ensaio *push-out* são compostos por dois conectores de cisalhamento incorporados na camada de concreto. A utilização de uma nomenclatura específica auxilia na identificação dos conectores e na análise dos padrões de fissuração após a ruptura. A nomenclatura adotada leva em conta o nome do espécime, com o

prefixo "ESC" que significa "espécime de concreto". Os números intermediários do nome correspondem ao número do laminado e sua gramatura, enquanto as duas últimas letras identificam os conectores incorporados no espécime de concreto. Por exemplo, o nome "ESC-16-AB" indica um espécime de concreto com os conectores CO-16-A e CO-16-B, extraídos do laminado 1 com uma gramatura nominal de $6 \times 450 \text{ g/m}^2$ (2700 g/m^2).

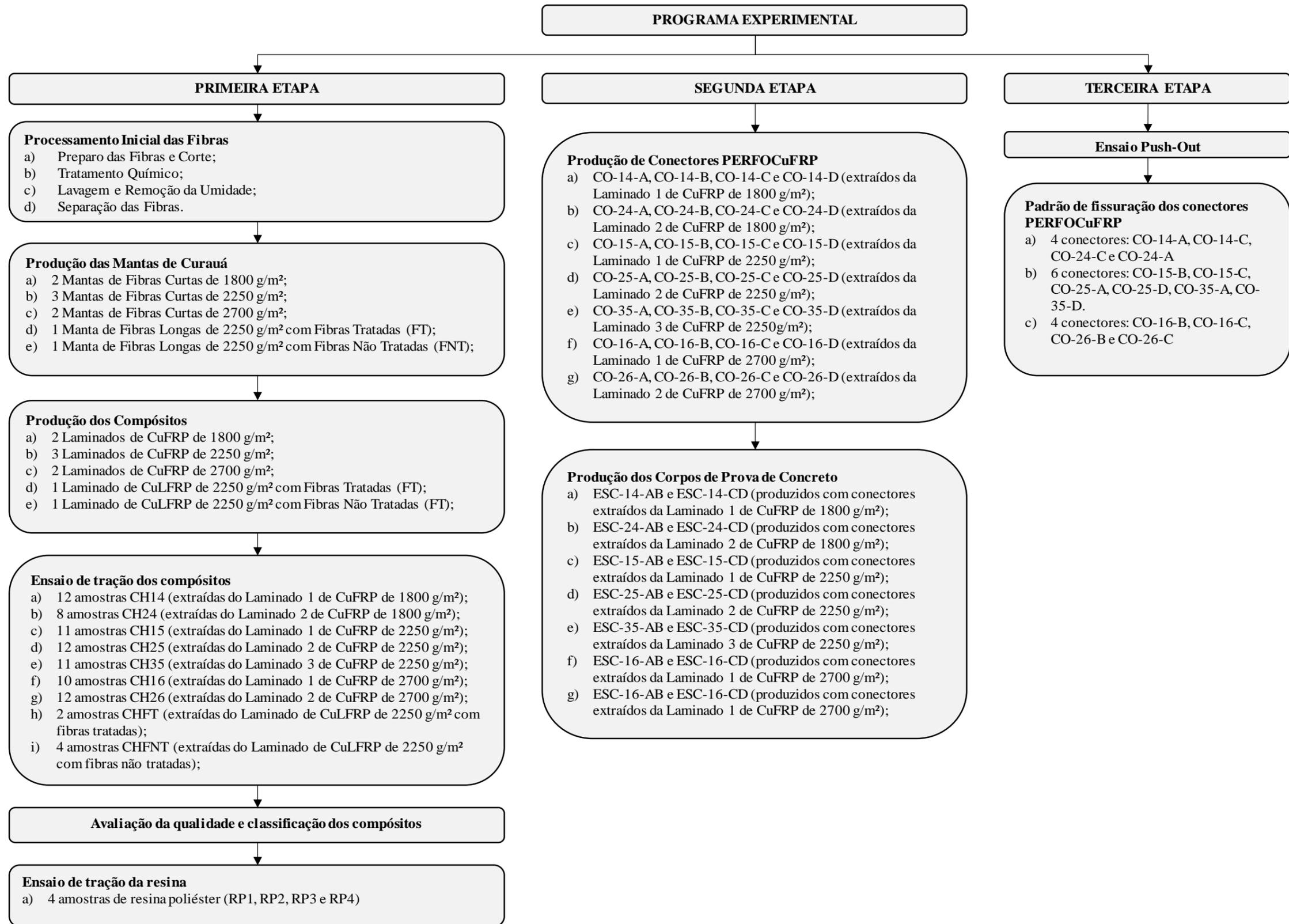


Figura 12 – Procedimento Experimental. Fonte Autor (2023)

3.1. Primeira etapa

Esta etapa compreende os seguintes procedimentos: a) processamento inicial das fibras; b) fabricação das mantas de curauá; c) produção dos compósitos; d) realização do ensaio de tração dos compósitos; e) execução do ensaio de tração da resina.

3.1.1. Processamento inicial das fibras

As fibras de curauá (*Ananas erectifolius*) utilizadas na pesquisa foram obtidas de um produtor da região de Santarém, no interior do estado do Pará e recebidas no seu estado natural, com comprimento médio de 90 cm. As fibras vieram parcialmente coladas e com resíduos de poeira em sua superfície obrigando-as a passar por um processamento inicial para a sua aplicação. A Figura 13 mostra as fibras de curauá no seu estado natural (como foram recebidas) e depois de serem passadas por tratamento químico e penteadas manualmente.



Figura 13 - a) fibras de curauá em seu estado natural conforme recebimento e b) desemaranhadas. Fonte: Autor (2023)

Sendo assim, esta etapa decorreu-se conforme as subetapas: a) preparo das fibras e corte; b) tratamento químico; c) lavagem e remoção da umidade e d) separação das fibras.

a) Preparo das fibras e corte: as fibras foram penteadas manualmente com o auxílio de rasqueadeira e escova de lavar multiuso; e cortadas no comprimento de 50 mm (curtas) e 350 mm (longas), na sequência foram pesadas e separadas para o tratamento químico, conforme apresentado na Figura 14(a). As fibras com o comprimento de 50 mm foram

utilizadas para compor as mantas de fibras curtas e as fibras com o comprimento de 350 mm para compor as mantas de fibras longas;

- b) Tratamento químico: as fibras de curauá passaram por tratamento químico em solução de 5% (massa/volume) de hidróxido de sódio (NaOH), preparada com água destilada, a uma temperatura média de 45°C, em estufa, durante o período de 4 horas, como apresentado na Figura 14(b), para a fabricação das mantas de fibras curtas e aleatórias de curauá (do tipo CSM), e das mantas de fibras longas e alinhadas de curauá. O tratamento químico é realizado com o objetivo de remover as substâncias, como a hemicelulose e lignina, que são solúveis em meio alcalino, da superfície das fibras, aprimorando a interação entre as fibras e a matriz. (PANIGRAHI, 2007; BELTRAMI; CRISTINE SCIENZA; ZATTERA, 2014; DE FÁTIMA V. MARQUES *et al.*, 2015; KOOHESTANI *et al.*, 2019; LI; TABIL; TEIXEIRA, 2019; DEL PINO *et al.*, 2021;). A eficiência do tratamento foi demonstrada por meio do “método de teste padrão para propriedades de tração de materiais compósitos de matriz de polímero” em compósitos com fibras de curauá tratadas e não tratadas, conforme as recomendações da ASTM D 3039/D 3039M (2017). Para isso, os compósitos foram moldados com as fibras de curauá longas na direção de maior comprimento do compósito laminado produzido.
- c) Lavagem e remoção da umidade: após o tratamento químico, as fibras foram lavadas em água corrente e posteriormente em água destilada, até a obtenção de pH neutro, conforme visualizado na Figura 14(c); em seguida foram secas em estufa à temperatura média de 45°C por 48 horas, a fim de garantir a expulsão de toda a água armazenada no interior da fibra;
- d) Separação das fibras: após a lavagem e secagem as fibras foram pesadas e quantificadas conforme as gramaturas que foram adotadas. A pesagem das fibras foi necessária novamente devido a perda de superfície das fibras no ato do tratamento e lavagem do material. Isso foi necessário para quantificar adequadamente as fibras que iriam compor a manta conforme as gramaturas nominais adotadas neste trabalho. A separação das fibras curtas decorreu-se para posterior imersão em tanque com água destilada, fabricado para o espalhamento das fibras e modelagem das mantas de fibras aleatórias, conforme apresentado na Figura 14(d). As fibras longas também foram separadas para futura modelagem das mantas de fibras longas.

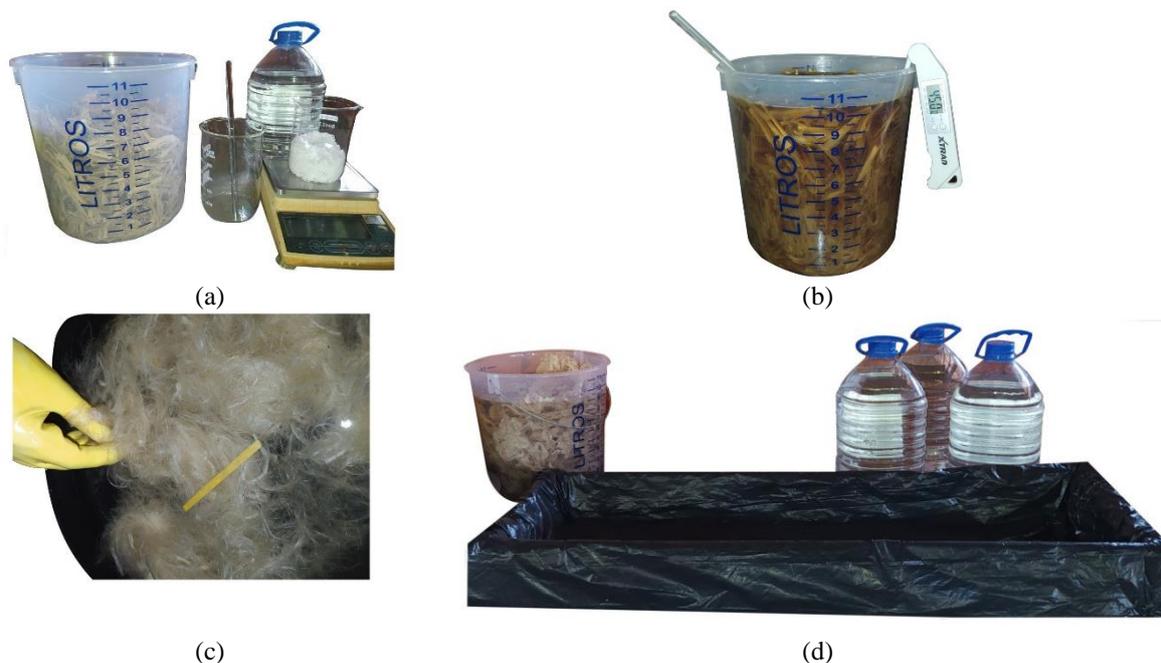


Figura 14 – Etapas de processamento inicial das fibras: (a) materiais para tratamento químico; (b) tratamento químico em solução de 5% (m/v) de NaOH; (c) lavagem das fibras em água destilada e (d) separação das fibras para imersão em tanque de água destilada. Fonte: Autor (2023)

3.1.2. Fabricação das mantas de curauá

Após o processamento inicial das fibras, as mantas foram produzidas a partir de fibras curtas e longas. As mantas de fibras curtas foram produzidas em três gramaturas nominais: 1800 g/m², 2250 g/m² e 2700 g/m². Foram fabricadas um total de sete mantas de fibras curtas e aleatórias, com dimensões de 300 × 900, destinadas à fabricação de compósitos laminados de CuFRP. Dessas sete mantas, duas tinham gramatura de 1800 g/m², três tinham gramatura de 2250 g/m² e duas tinham gramatura de 2700 g/m². As mantas de fibras longas, por sua vez, foram produzidas com gramatura nominal de 2250 g/m² e foram fabricadas duas mantas com dimensões de 250 × 350, destinadas à fabricação de laminados de CuLFRP. Dessas duas mantas, uma continha fibras tratadas (FT) e a outra continha fibras não tratadas (FNT).

No processo de fabricação das mantas de fibras curtas, as fibras foram espalhadas manualmente, em molde, com auxílio de água destilada; e depois prensada com uma chapa de madeira, de mesma dimensão do molde, para expulsar a água do tanque com fibras, conforme ilustrado na Figura 15. Após esse processo as fibras passaram pelo processo de secagem ao ar livre durante 48 horas, na qual a mesma apresentou coesão adequada para ser manuseada. Transcorrido esse período, as fibras foram submetidas a um carregamento aproximado de 1 tf/m² (usando bloco de concreto), ou seja, de aproximadamente 1000 kg/m², durante o período

de 2 horas para a redução de vazios e água acumulada do interior da manta. Na sequência, as mantas foram armazenadas até a realização da infusão. Para garantir a não ocorrência da absorção de umidade, antes da infusão, a manta foi submetida à um processo de secagem na estufa, que permaneceu durante um período de 2 horas a 45°C.



Figura 15 – Espalhamento de fibras em água destilada para fabricação das mantas de fibras de curauá. Fonte: Autor (2023)

No processo de fabricação das mantas de fibras longas, as fibras secas e penteadas foram pesadas, conforme a gramatura nominal de 2250 g/m² para compor molde de madeira delimitado nas dimensões de 250 × 350 mm, conforme ilustrado na Figura 16. Depois disso, as fibras longas também foram submetidas a um carregamento aproximado de 1 tf durante o período de 2 horas. Na sequência, as mantas foram armazenadas até a realização da infusão, esquema no qual pode ser visualizado na Figura 16. Para garantir a não ocorrência da absorção de umidade, antes da infusão, a manta de fibras longas também foi submetida à um processo de secagem na estufa, que permaneceu durante um período de 2 horas à 45°C.

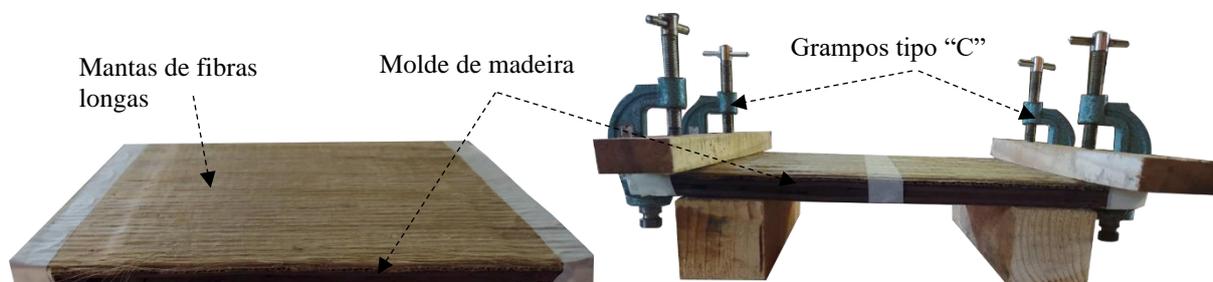


Figura 16 – Processo de fabricação das mantas de fibras longas. Fonte Autor (2023)

3.1.3. Produção dos compósitos

Nesta etapa do estudo, foram fabricados laminados utilizando dois tipos de compósitos de polímero reforçado com fibras de curauá: o compósito de fibras curtas de curauá (CuFRP) e o compósito de fibras longas de curauá (CuLFRP). Para a fabricação desses laminados, foram empregadas técnicas de infusão da resina poliéster a vácuo. A eficiência desse processo de fabricação foi demonstrada nos trabalhos de Lameiras (2015) e Silva (2020).

Os laminados de fibras curtas foram produzidos em três gramaturas nominais distintas: 1800 g/m² (laminados do grupo nominal 1), 2250 g/m² (laminados do grupo nominal 2) e 2700 g/m² (laminados do grupo nominal 3), conforme as mantas produzidas disponíveis. Foram fabricados um total de sete laminados de CuFRP, com dimensões de 300 × 900 mm. Desses laminados, dois tinham gramatura de 1800 g/m², três tinham gramatura de 2250 g/m² e duas tinham gramatura de 2700 g/m². Os laminados de CuLFRP, por sua vez, foram produzidos com gramatura nominal de 2250 g/m² na qual foram fabricados dois laminados com dimensões de 250 × 350 mm. Desses dois laminados, um deles continha fibras tratadas (FT) e o outro continha fibras não tratadas (FNT).

Ainda nesta etapa os compósitos laminados produzidos foram cortados para a extração dos conectores de dimensões de 150 × 200 mm do laminado de CuFRP; e amostras menores de 250 × 25 mm de regiões aleatórias de ambos os laminados de CuFRP e de CuLFRP. Os conectores foram posteriormente embutidos nos corpos de prova de concreto para a realização dos ensaios de *push-out* e as amostras de 250 × 25 mm foram utilizadas para os ensaios de caracterização mecânica, conforme descrito nas etapas seguintes.

O tamanho dos laminados foi definido em função da quantidade necessária de conectores para a realização dos ensaios *push-out*, da quantidade necessária dos corpos de prova para a realização da caracterização mecânica, vácuo disponível, tempo de cura da resina e limitações do tamanho da bancada de trabalho. De cada laminado de CuFRP extraiu-se de 8 a 13 corpos de prova, de dimensões nominais iguais a 250 × 25 mm (largura final média igual a 25,57 mm), incluindo os corpos de prova que foram perdidos no ato de corte dos laminados e; para cada laminado de CuLFRP extraiu-se 6 corpos de prova, de mesmas dimensões nominais e com largura final média igual a 24,04 mm.

Os laminados foram produzidos de acordo com a disposição (aleatória ou alinhada) e quantidade de fibras (conforme gramatura nominal) utilizada para a fabricação das mantas. A quantidade de fibras adotada para a fabricação das mantas de fibras curtas e aleatórias de curauá foi determinada com as gramaturas equivalentes a quatro, cinco e seis camadas de mantas de fibras de vidro do tipo CSM de 450 g/m², resultando em 1800, 2250, 2700 g/m² para os

compósitos laminados, respectivamente. As gramaturas foram escolhidas por ser próxima à utilizada nos trabalhos de Lameiras (2015) e de Silva (2020) e pela quantidade de fibras disponíveis. Estes autores obtiveram sucesso na aplicação da técnica de infusão de resina poliéster à vácuo para a fabricação de conectores de cisalhamento de GFRP, desenvolvidos com cinco camadas de fibras de vidro do tipo CSM com gramatura de 450 g/m², para aplicações em painéis de parede sanduíche de concreto. Com este fim, os laminados foram produzidos pelo processo de infusão de resina poliéster à vácuo, no qual foi possível extrair os conectores e corpos de prova para a realização dos ensaios descritos deste trabalho.

A resina utilizada foi a de poliéster insaturada, tixotrópica, pré-acelerada e de baixa viscosidade, densidade a 25°C de 1,09 g/cm³, resistência à tração máxima de 40,2 MPa, módulo de elasticidade de 2,2 GPa e alongação de 2,2 %. Estas propriedades são as fornecidas pelo fabricante para a resina curada com 1% de agente de cura de peróxido de metil etil cetona (PMEK), sem reforço, em 24 horas a temperatura ambiente seguida de pós cura por 2 horas a 60°C (REDELEASE, 2021). Essas propriedades da resina foram estimadas pelo fabricante REDELEASE, por meio de ensaio de tração da resina poliéster, conforme as prescrições normativas da ASTM D638 (2022).

O sistema de infusão utilizado foi elaborado por Silva (2020) e está localizado no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília (UnB). O sistema constitui-se de quatro partes principais: a) reservatório para excesso de resina; b) bolsa de infusão; c) câmara de vácuo; d) bomba de vácuo e; e) canal de entrada de resina. O sistema empregado pode ser visualizado na Figura 17.



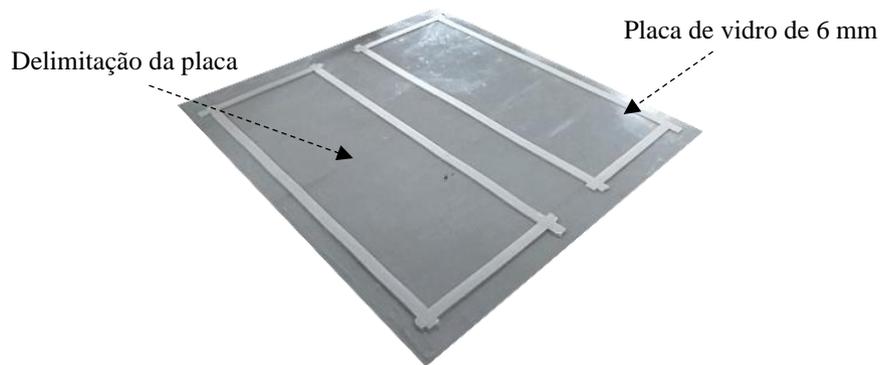
Figura 17 – Sistema de infusão de resina à vácuo. Fonte: Autor (2023)

Nesse sistema, cada acessório possui funções específicas. O reservatório para excesso de resina, assim como a câmara de vácuo, consiste em um canal para saída do excesso de resina em caso de fuga da resina para a bomba de vácuo. A câmara de vácuo também é responsável por estabilizar o sistema, ou seja, esses dois componentes possuem a função de proteger o sistema de vácuo. Para a entrada de resina na bolsa de infusão utiliza-se o canal de entrada de resina, no qual é o ponto utilizado para despejar a resina de forma controlada.

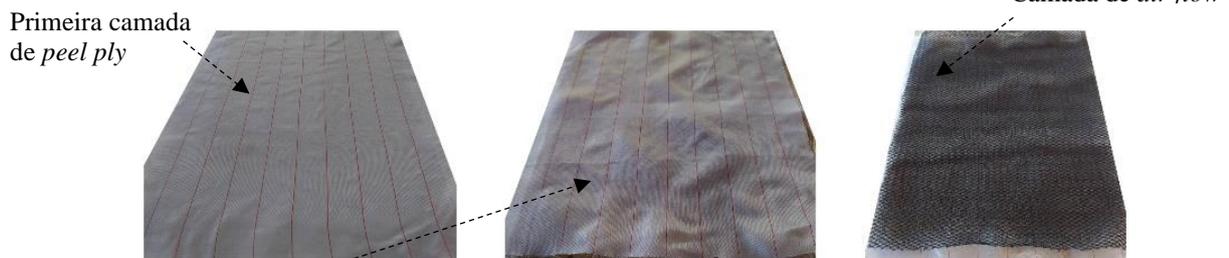
Antes de montar o sistema de infusão de resina a vácuo, foi necessário realizar a limpeza da placa de vidro que seria utilizada para receber o sistema. Para isso, utilizou-se detergente neutro e álcool 70% líquido, a fim de remover quaisquer impurezas orgânicas presentes no vidro. Tal medida foi adotada para evitar a contaminação dos componentes que compõem o compósito. Após a limpeza da placa de vidro, deu-se início à montagem da bolsa de infusão e à ligação das conexões da bolsa ao sistema de vácuo. Esse procedimento é composto pelas seguintes etapas: a) delimitação do laminado; b) disposição dos componentes do compósito; c) aplicação do filme de vácuo e; d) teste de vácuo e infusão de resina. Abaixo, cada uma dessas etapas é descrita em detalhes.

- a) A delimitação da região do laminado foi realizada sobre uma placa de vidro de 6 mm de espessura. Essa região foi marcada com auxílio de uma trena, régua metálica, pincel marcador e fita crepe. A região delimitada recebeu a cera de carnaúba para facilitar o desmolde do compósito laminado após a infusão (Figura 18a);
- b) A disposição dos componentes utilizados na fabricação dos compósitos constitui-se, na sequência de: uma camada de *peel ply*; uma camada de manta de fibras de curauá; uma camada de *peel ply*; uma camada de filme perfurado do tipo *air flow* e; uma camada de filme de vácuo. Nesse conjunto, o *peel ply* possui a função de facilitar o desmolde do compósito laminado após a realização da infusão, ou seja, ele evita a aderência da resina poliéster na placa de vidro e entre os componentes do compósito. O *air flow* possui a função de facilitar a passagem do excesso de resina durante a infusão e o filme de vácuo fecha a bolsa de infusão (Figura 18b);
- c) A colocação do filme de vácuo ocorre após a instalação do spiraduto de ½” no contorno da bolsa de infusão, a fim de vedá-la utilizando a fita *tacky tape*, específica para a fixação de filmes de vácuo em processos de infusão à vácuo. Nesse contexto, são posicionados dois spiradutos ao redor do perímetro mais longo do laminado, próximos às camadas constituintes do compósito. Um desses spiradutos tem a finalidade de facilitar a entrada da resina e sua distribuição durante o processo de infusão, enquanto o outro spiraduto tem o papel de facilitar a remoção do excesso

- de resina no perímetro do compósito. Por fim, a vedação do filme de vácuo é realizada nas conexões do tipo “T”, com o auxílio da fita *tacky tape* (Figura 18c);
- d) O teste de vácuo e infusão são as últimas etapas de produção do compósito. O teste de vácuo é essencial para a previsão de possíveis avarias no filme de vácuo ou da eficiência da vedação da fita *tacky tape* do filme de vácuo no perímetro da bolsa e nas conexões do tipo “T”. Após o teste de vácuo aplica-se a resina pelo canal de entrada de resina, na qual despeja-se a resina de maneira controlada dentro do período de trabalho da resina, ou seja, de 15 minutos. Transcorrido esse tempo, aguardou-se por mais 45 minutos para desligar a bomba e; assim, garantir a aplicação de vácuo até o fim do período de trabalho da resina, retirando todo o excesso de ar impregnado. O período entre a infusão e a desforma do compósito laminado ocorreu após 24 horas, ou seja, após a cura total da resina.

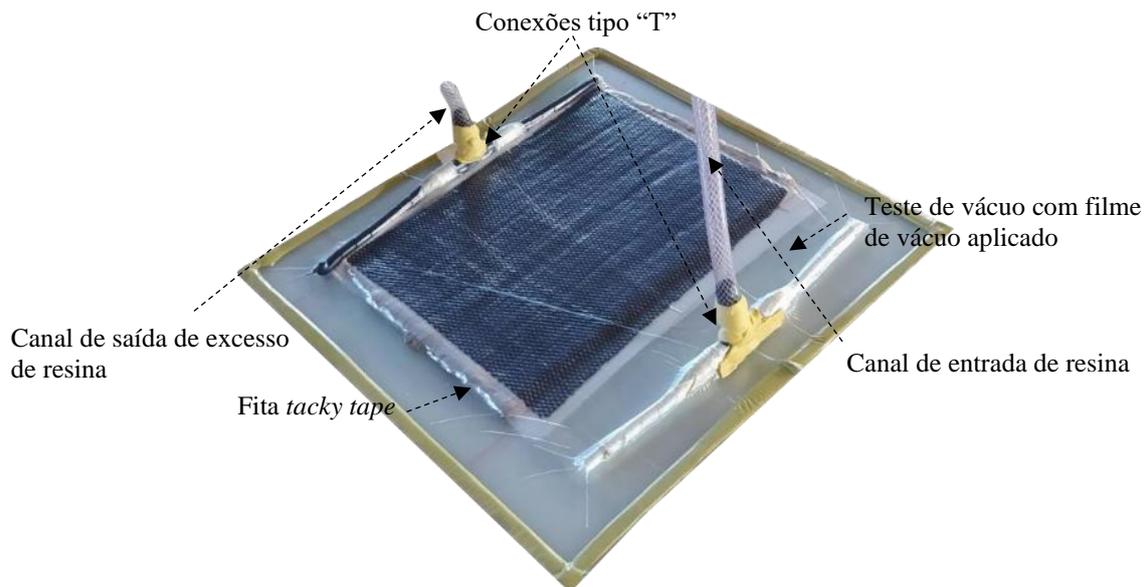


(a) Delimitação da placa



Camada de *peel ply* após a manta

(b) Disposição dos componentes do compósito



(c) aplicação do filme de vácuo, vedação do perímetro da bolsa de infusão e das conexões do tipo “T”, teste de vácuo e infusão de resina à vácuo.

Figura 18 – etapas de montagem da bolsa de infusão para fabricação do compósito laminado. Fonte: Autor (2023)

Para estimar a proporção média da massa de fibra nas amostras dos compósitos laminados de CuFRP, foram adotados os seguintes procedimentos. Inicialmente, as dimensões das amostras já cortadas foram obtidas utilizando um paquímetro, com medidas realizadas tanto na direção longitudinal quanto na direção transversal. O objetivo era obter a área de superfície média de cada amostra. Durante esse processo, foram realizadas 12 leituras com o paquímetro em cada direção das amostras: 8 leituras na direção longitudinal e 4 leituras na direção transversal.

Posteriormente, as amostras foram pesadas utilizando uma balança de precisão. Com base na relação entre a massa das amostras obtidas na balança de precisão (m_a), a massa de fibras de curauá na amostra (m_f) foi determinada com base nas gramaturas nominais adotadas de 1800g/m², 2250g/m² ou 2700g/m² (GN) e área de superfície da amostra (A_s). Dessa maneira, foi possível estimar a proporção média da massa de fibras contida em cada amostra ($P_{\%}$), utilizando a equação (1). Por meio da aplicação dessa equação, pôde-se calcular a proporção média da massa de fibras presentes nas amostras dos compósitos laminados de CuFRP, levando em consideração os dados obtidos por meio das medições com o paquímetro e a pesagem das amostras.

$$P_{\%} = \frac{GN \times c_a \times L_a}{m_a} = \frac{GN \times A_s}{m_a} = \frac{m_f}{m_a} \quad (1)$$

Onde:

GN é a gramatura nominal da manta do laminado de CuFRP da qual a amostra foi extraída;

c_a é a comprimento médio da amostra compósita extraída do laminado de CuFRP;

L_a é a largura média da amostra compósita extraída do laminado de CuFRP;

m_a é a massa da amostra compósita extraída do laminado de CuFRP;

A_s é a área de superfície da amostra compósita extraída do laminado de CuFRP;

m_f é massa de fibras de curauá estimada na amostra compósita extraída do laminado de CuFRP;

$P_{\%}$ é a proporção média da massa de fibras da amostra compósita extraída do laminado de CuFRP;

Para estimar a proporção média da massa de fibras longas nos laminados de CuLFRP, foi realizado um cálculo dividindo a massa da manta de fibras longas utilizada no laminado pela massa total de cada laminado de CuLFRP. Esse cálculo foi realizado separadamente para os laminados contendo as fibras tratadas de curauá e para os laminados contendo as fibras não tratadas de curauá. O método de obtenção da proporção média da massa de fibras das chapas CHFT e das chapas CHFNT divergiu-se das chapas de CuFRP devido à perda das anotações dos dados de massa de cada amostra das chapas de CuLFRP. A equação (2) apresentada demonstra o método utilizado para calcular a proporção média da massa de fibras longas nos laminados de CuLFRP. Por meio da aplicação dessa equação, é possível calcular a proporção média da massa de fibras dos laminados de CuLFRP, levando em consideração os dados obtidos por meio da pesagem das mantas de fibras longas com a pesagem dos laminados de CuLFRP.

$$P_{L\%} = \frac{m_{Lm}}{m_{La}} \quad (2)$$

Onde:

$P_{L\%}$ é a proporção média da massa de fibras longas de curauá estimada no laminado de CuLFRP;

m_{Lm} é a massa da manta de fibras longas de curauá no laminado de CuLFRP;

m_{La} é a massa do laminado de CuLFRP;

3.1.4. Ensaio de tração dos compósitos

Para avaliar o comportamento dos compósitos à tração, utilizou-se a prensa universal EMIC DL 3000 do laboratório de materiais (LEM) da Universidade de Brasília (UnB), além de um extensômetro do tipo *clip-gauge*, seguindo as diretrizes da norma ASTM D3039/D3039M (2017). Para obter as curvas de tensão *versus* deformação, seguiu-se um procedimento de acordo com as especificações da referida norma. Inicialmente, as amostras foram extraídas dos compósitos laminados de CuFRP e CuLFRP e preparadas de acordo com as orientações da norma. Em seguida, o extensômetro foi colocado na região central do corpo de prova e fixado nas garras da máquina de ensaio mecânico (EMIC) para registrar o deslocamento relativo da amostra. Com a amostra fixada nas garras da EMIC, a força foi aplicada gradualmente, enquanto o *clip-gauge* registrava o deslocamento relativo da amostra. Durante o ensaio, os dados foram registrados no software da EMIC, instalado no *Windows XP*, para a plotagem da curva de tensão *versus* deformação. O extensômetro foi removido nos primeiros sinais de ruptura da amostra, ou seja, antes do final do ensaio, a fim de não danificar o equipamento. Dessa forma, todos os gráficos foram plotados com os dados que foram registrados antes da retirada do equipamento, ou seja, até com o atingimento da carga máxima registrada antes da remoção do *clip-gauge*.

Os corpos de prova extraídos dos laminados de CuFRP e CuLFRP foram tracionados com velocidade de 2,0 mm/min, e os dados foram gravados com uma frequência de gravação de 1.0 Hz. Para evitar o esmagamento das extremidades do material na região de contato com as garras da prensa, no ato da aplicação de carga, e melhor distribuir a pressão aplicada, fixou-se placas de alumínio de 25 × 50 mm em ambas as extremidades dos corpos de prova de compósitos. No total 82 amostras, de tamanhos nominais iguais a 250 × 25 mm e com espessura igual à da chapa, foram submetidos ao ensaio, com o intuito de determinar suas resistências à tração e módulos de elasticidade (Figura 19).

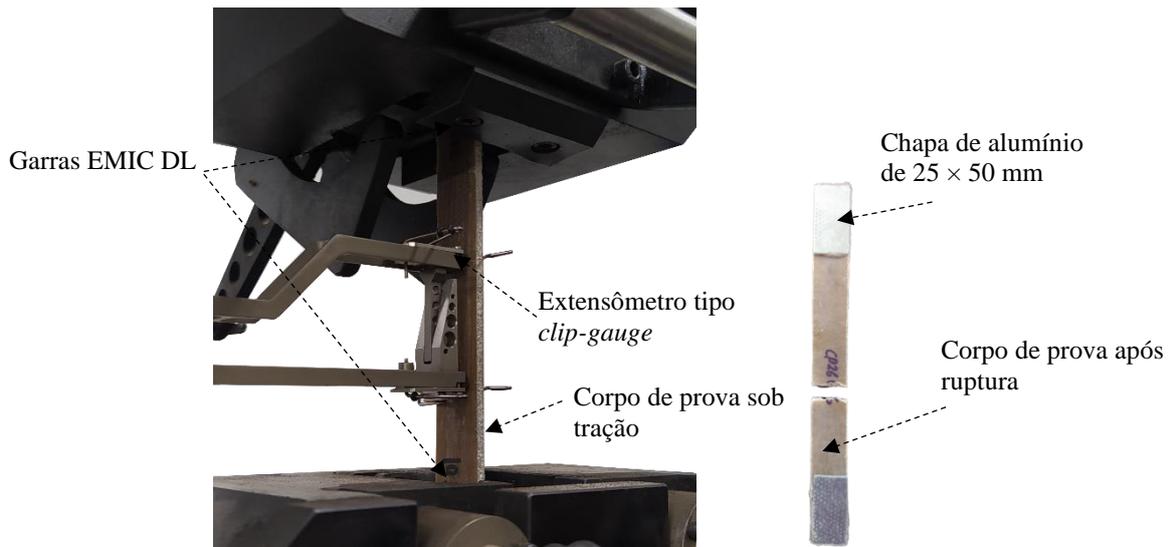


Figura 19 – Ensaio para a determinação da resistência à tração. Fonte: Autor (2023)

No cálculo das tensões máximas, foram considerados dois fatores: as forças máximas obtidas pela EMIC DL 3000 e as dimensões da seção transversal das amostras, que foram obtidas com um paquímetro.

Para calcular o módulo de elasticidade, as deformações foram medidas por meio de um extensômetro tipo *clip-gauge*, sendo que o mesmo era retirado antes da ruptura do corpo de prova para evitar danos ao equipamento. O *clip-gauge* era posicionado na região central do corpo de prova, cujo comprimento de referência era de 50 mm, a fim de registrar o deslocamento relativo da amostra.

Com base nos resultados obtidos, foi possível plotar a curva de tensão *versus* deformação. As tensões foram calculadas dividindo a força registrada pela EMIC pela área da seção transversal da amostra. Quanto à deformação, ela foi obtida dividindo-se o deslocamento relativo entre os dois pontos de fixação do extensômetro pelo comprimento de referência de 50 mm. Deve-se atentar para o fato de que, para proteger o medidor, o *clip-gauge* foi retirado dos corpos de prova antes do término dos ensaios. Dessa maneira, a deformação na ruptura dos corpos de prova foi calculada a partir da tensão máxima de tração, ajustando-se a curva tensão-deformação. Em outras palavras, a deformação na qual ocorreu a falha foi estimada a partir da equação da linha da reta de cada curva experimental dos corpos de prova de CuFRP, conforme ilustrado na Figura 20.

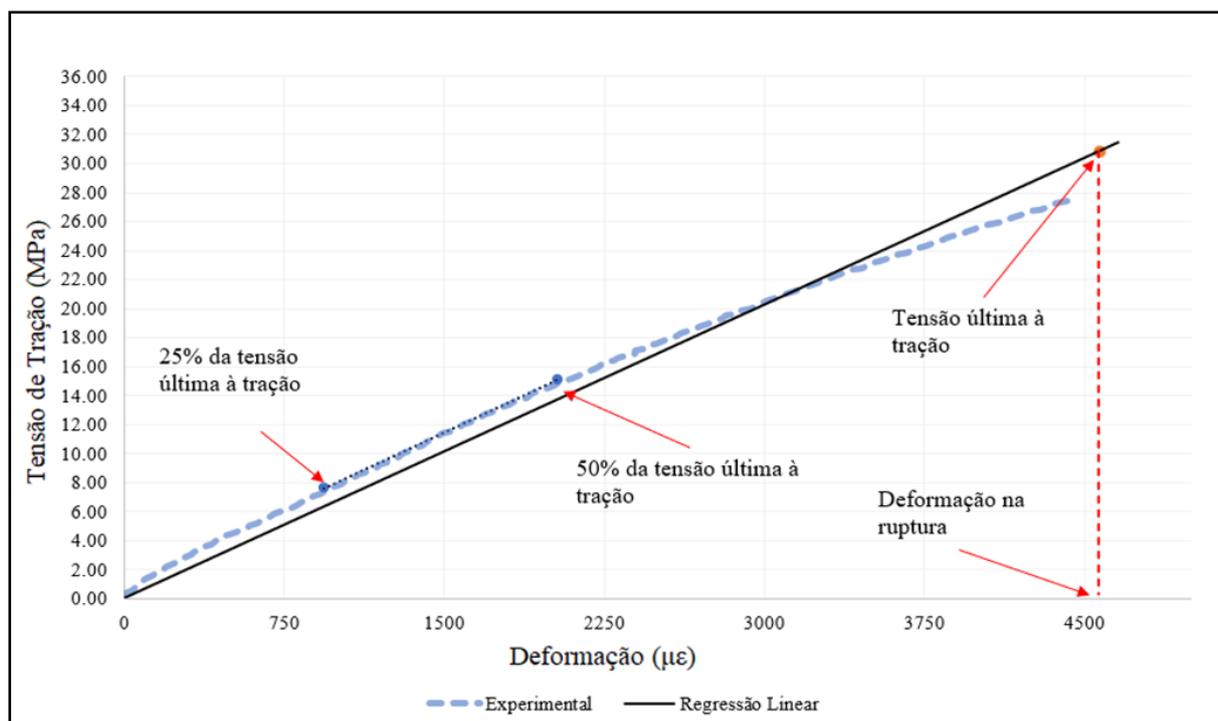


Figura 20 – Representação esquemática da determinação do módulo de elasticidade e da deformação da ruptura

Apoiado nesses parâmetros, confirmou-se que a leitura dos dados sempre ultrapassava o limite de 50% da força máxima, validando a utilização dos dados para calcular o módulo de elasticidade. Os módulos de elasticidade das amostras foram calculados com a divisão da diferença da tensão de tração aplicada entre dois pontos de referência, contidos na primeira e segunda metade inferior da curva de tensão *versus* deformação, pela diferença entre as deformações correspondentes a estes mesmos dois pontos. Os pontos de referência adotados correspondem a 50 e 25% da tensão última aplicada. Esse mesmo procedimento foi utilizado por Lameiras (2015). Todos os ensaios foram realizados com as idades superiores a 290 dias.

A nomenclatura definida para as amostras de 250 × 25 mm - originária dos laminados fabricados com mantas de fibras curtas de curauá - leva em conta a numeração do laminado e a gramatura nominal escolhida, por exemplo: “CH” tem significado de chapa; o primeiro algarismo representa a numeração do laminado (laminado 1 ou laminado 2); o segundo algarismo representa a quantidade de mantas equivalentes de 450 g/m². A nomenclatura das amostras originária dos laminados fabricados com mantas de fibras longas de curauá leva em conta a realização do tratamento químico ou a não das fibras de curauá, por exemplo: “FT” tem significado de chapas com fibras tratadas e; “FNT” significa chapas de fibras não tratadas.

3.1.5. Avaliação da qualidade e classificação dos compósitos

A avaliação da qualidade de produção e classificação das chapas CuFRP foi realizada utilizando os parâmetros de tensão última à tração ($\sigma_{pt.u}$), módulo de elasticidade ($E_{pt.l}$) e proporção de fibras (M_f). Foram realizadas avaliações em três níveis diferentes: a) entre amostras da mesma chapa; b) entre amostras de chapas com a mesma gramatura nominal; c) entre amostras de chapas com gramaturas nominais diferentes.

O primeiro e o segundo nível tiveram o objetivo de verificar as variações ocorridas durante a distribuição das fibras de curauá no compósito e no processo de infusão à vácuo, tanto entre amostras que compõem uma mesma chapa quanto entre amostras de chapas diferentes, porém com a mesma gramatura nominal. O terceiro nível contribuiu para a avaliação das chapas compostas por mantas com gramaturas nominais diferentes entre si.

Para a análise dos dados, utilizou-se no primeiro nível a análise da magnitude do coeficiente de variação e testes de normalidade da curva de distribuição. No segundo e terceiro nível, foram aplicadas a análise da magnitude do coeficiente de variação, testes de normalidade da curva de distribuição normal, análise de variância (ANOVA) de fator único e comparações emparelhadas de Turkey. Isso foi feito para cada uma das propriedades mencionadas.

No entanto, a avaliação da qualidade das amostras dos compósitos CuLFRP e das amostras de resina ficou restrita ao primeiro nível. Em outras palavras, nesse caso, avaliou-se apenas a qualidade das amostras de compósitos ou de resina ao longo da extensão da chapa de CuLFRP, bem como a reprodutibilidade das amostras de CuLFRP e RP, por meio da análise da magnitude do coeficiente de variação.

O diagrama da Figura 21 ilustra o processo de avaliação da qualidade de produção e classificação das chapas, bem como as análises realizadas nos diferentes níveis, juntamente com as respectivas medidas estatísticas. A partir da avaliação entre amostras de chapas de mesma gramatura nominal, as chapas CH14 e CH24, de mesma gramatura nominal (equivalentes a 4 camadas de mantas de fibras de vidro do tipo CSM de 450 g/m²), foram denominadas de chapas CH-GN1, que significa “chapas do grupo nominal 1”. As chapas CH15, CH25 e CH35, de mesma gramatura nominal, foram denominadas de “chapas CH-GN2”, que significa chapas do grupo nominal 2. As chapas CH16 e CH26, de mesma gramatura nominal, foram denominadas de chapas CH-GN3, que significa “chapas do grupo nominal 3”.

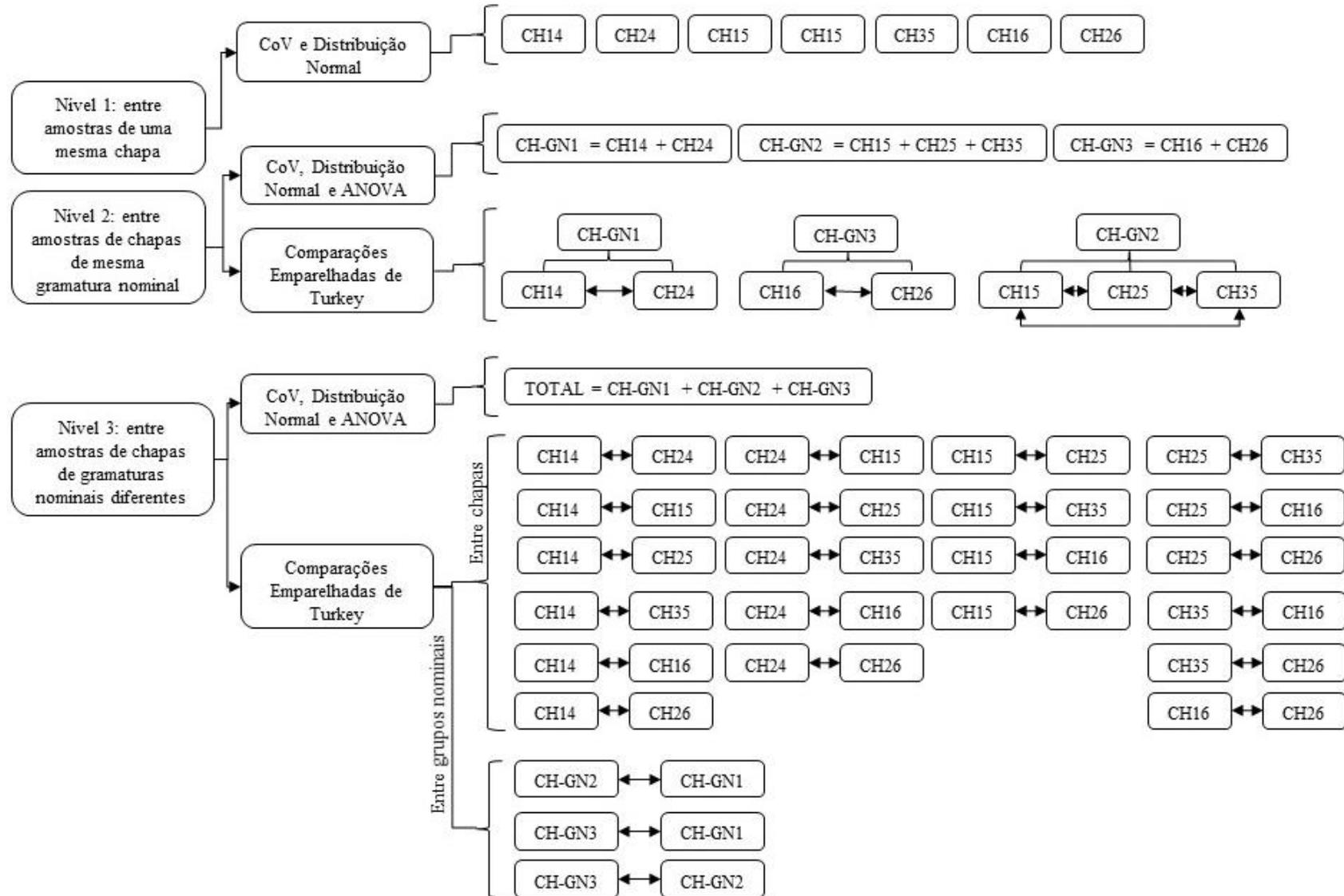


Figura 21 - Processo de avaliação da qualidade de produção e classificação das chapas

3.1.5.1. Entre amostras de uma mesma chapa

Este nível teve como objetivo verificar as variações ocorridas durante a distribuição das fibras de curauá no compósito e no processo de infusão à vácuo, nas amostras que compõem uma mesma chapa. Para cada uma das chapas de CuFRP foram extraídas de oito a doze amostras em pontos aleatórios para a avaliação da homogeneidade da distribuição das fibras no compósito e de suas respectivas características. Esse procedimento foi realizado afim de verificar a qualidade do processo de infusão e, principalmente, da distribuição das fibras de curauá no compósito. De acordo com isso, Pimentel e Gomes (2009) afirma que os coeficientes de variação (CoV) podem ser classificados em baixo (menor que 10 %), médio (entre 10 % e 20 %), alto (entre 20 % e 30 %) e muito alto (superior a 30 %), nas quais as classificações baixas e médias são consideradas satisfatórias.

3.1.5.2. Entre amostras de chapas de mesma gramatura nominal

Este nível teve como objetivo verificar as variações ocorridas durante a distribuição das fibras de curauá no compósito e no processo de infusão à vácuo entre amostras que compõem chapas diferentes, porém, de mesma gramatura nominal. Sendo assim, foram aplicadas a análise da magnitude do coeficiente de variação, testes de normalidade da curva de distribuição normal, análise de variância (ANOVA) de fator único e comparações emparelhadas de Turkey entre chapas de mesma gramatura nominal. Isso foi feito para cada uma das propriedades estudadas, isto é, proporção de fibras, tensão última à tração e módulo de elasticidade das amostras das chapas de CuFRP.

3.1.5.3. Entre amostras de chapas de gramaturas nominais diferentes

De forma a verificar a qualidade das infusões de resina à vácuo e distribuição das fibras para a composição das mantas de fibras curtas de curauá com todas as chapas, isto é, entre amostras de chapas de gramaturas nominais diferentes, buscou-se analisar a variabilidade dos dados e das médias dos resultados das propriedades de tensão última à tração, módulo de elasticidade e proporção de fibras através da análise do coeficiente de variação, distribuição normal dos dados, análise de variância (ANOVA) e comparações emparelhadas de Turkey entre chapas de gramatura nominal distintas. Isso foi feito para cada uma das propriedades estudadas, isto é, proporção de fibras, tensão última à tração e módulo de elasticidade das amostras das chapas de CuFRP.

3.1.6. Ensaio de tração da resina poliéster

O ensaio de tração da resina poliéster foi realizado conforme as prescrições da ASTM D638 (2022). Essa norma regulariza todas as condições, procedimentos e definições necessárias para a realização do ensaio. O ensaio de caracterização mecânica da resina poliéster procedeu-se com uso da prensa MTS LANDMARK, de capacidade de 5 kN, além de um extensômetro do tipo *clip-gauge*, ambos disponíveis no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília (UnB).

Os corpos de prova de resina pura (RP) de poliéster foram fabricados com auxílio de um molde de silicone de dimensões de 274 mm × 210 mm × 10 mm, conforme apresentado na Figura 22. Para a realização do ensaio de tração da resina poliéster, os corpos de prova RP foram posicionados e tracionados com velocidade de 2,0 mm/min, na frequência de 1.0 Hz. A Figura 23 ilustra as dimensões e geometria dos corpos de prova recomendados pela ASTM D638 (2022) para a realização do ensaio de tração da resina poliéster. Para a fabricação dos corpos de prova utilizou-se a resina UC2090 Laminação. As propriedades da resina líquida e da fase curada (sem reforço) podem ser encontradas na seção 3.1.3 deste trabalho e no catálogo do fornecedor.

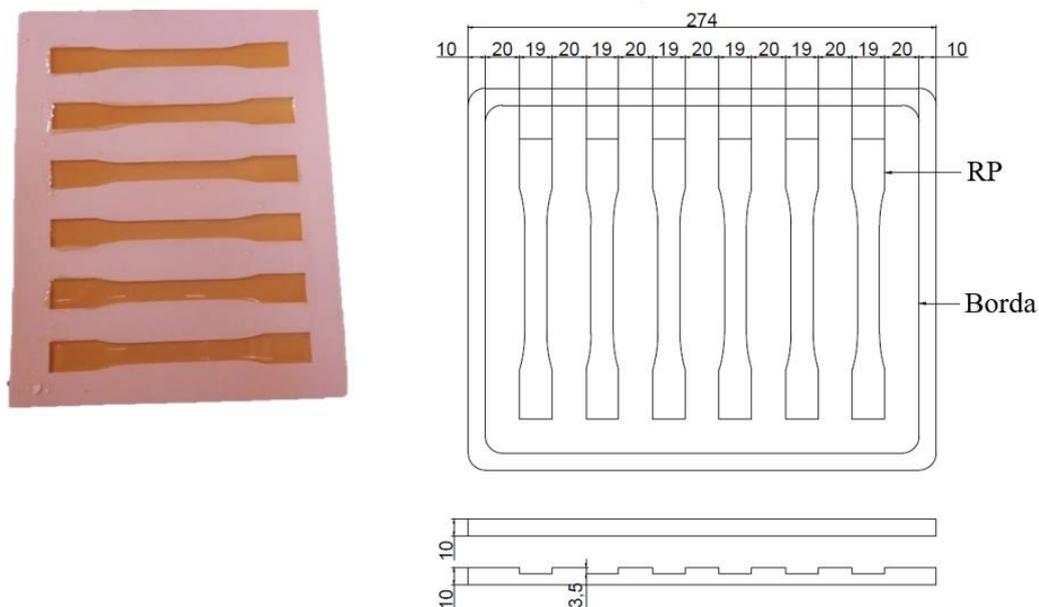


Figura 22 – Molde de silicone utilizado para a fabricação dos corpos de prova de resina poliéster (RP). Fonte: Autor (2023)

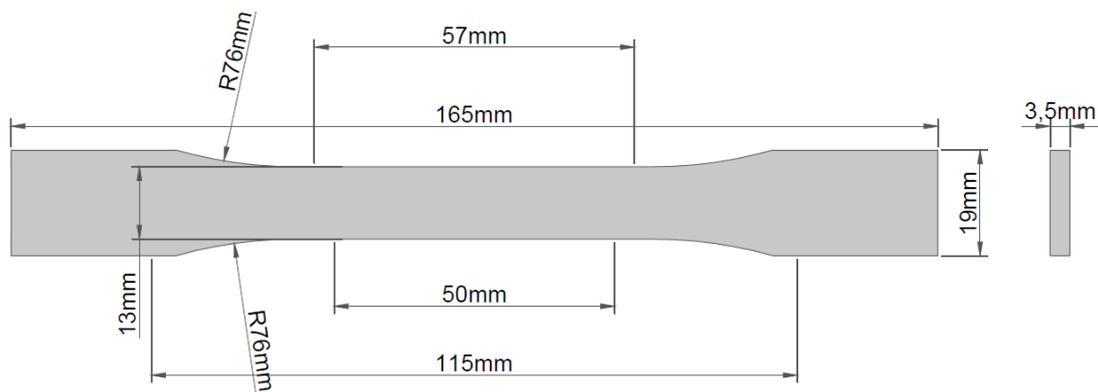


Figura 23 - Dimensões e geometria do corpo de prova para ensaio de tração de resina poliéster. Adaptado de ASTM D638 (2022)

Os corpos de prova da resina foram moldados em molde de silicone, no qual extraiu-se dez corpos de prova para a realização do ensaio de caracterização, no qual procedeu-se para a obtenção da resistência à tração e módulo de elasticidade do material. Estas propriedades foram determinadas com a mesma metodologia das utilizadas nos laminados de CuFRP. O ensaio de caracterização da resina pode ser visualizado na Figura 24. No trabalho, as amostras de resina poliéster são identificadas com o nome “RPX”, que significa amostra de resina poliéster de número “X”. Os ensaios foram realizados com idades superiores a 30 dias.



Figura 24 - Ensaio para a determinação da resistência à tração da resina de poliéster. Fonte: Autor (2023)

3.2. Segunda etapa

Esta etapa consiste na produção dos conectores PERFOCuFRP feitos de curauá e na fabricação dos espécimes de concreto. Os corpos de prova de concreto foram fabricados com base nos estudos de Huang e Dai (2019) e Silva (2020), seguindo as dimensões de $400 \times 300 \times 300$ mm (comprimento \times largura \times altura), os quais foram reproduzidos como protótipos de painéis de parede pré-moldada estrutural com isolamento incorporado.

3.2.1. Produção de conectores PERFOCuFRP

Os conectores PERFOCuFRP produzidos neste estudo têm dimensões de 150 mm de largura e 200 mm de comprimento. Para a sua fabricação, foram utilizadas furadeiras de bancada, com furos de diâmetro de 12,70 mm e espaçamento entre furos de 22,5 mm. Cada conector apresenta um total de 16 furos, localizados a uma distância aproximada de 18,6 mm da aresta de maior comprimento (Figura 25). Os parâmetros adotados para a definição do diâmetro e espaçamento dos furos, bem como a geometria do conector, foram baseados no trabalho realizado por Silva (2020). Este autor constatou que essa configuração produz as maiores resistências ao cisalhamento, de acordo com o resultado dos ensaios de *push-out*. Tal abordagem permite uma comparação entre os materiais de reforço: fibras de vidro e fibras de curauá incorporadas em matrizes poliméricas. Os espécimes de concreto estudados no ensaio de *push-out* são constituídos por dois conectores de cisalhamento incorporados na camada de concreto.

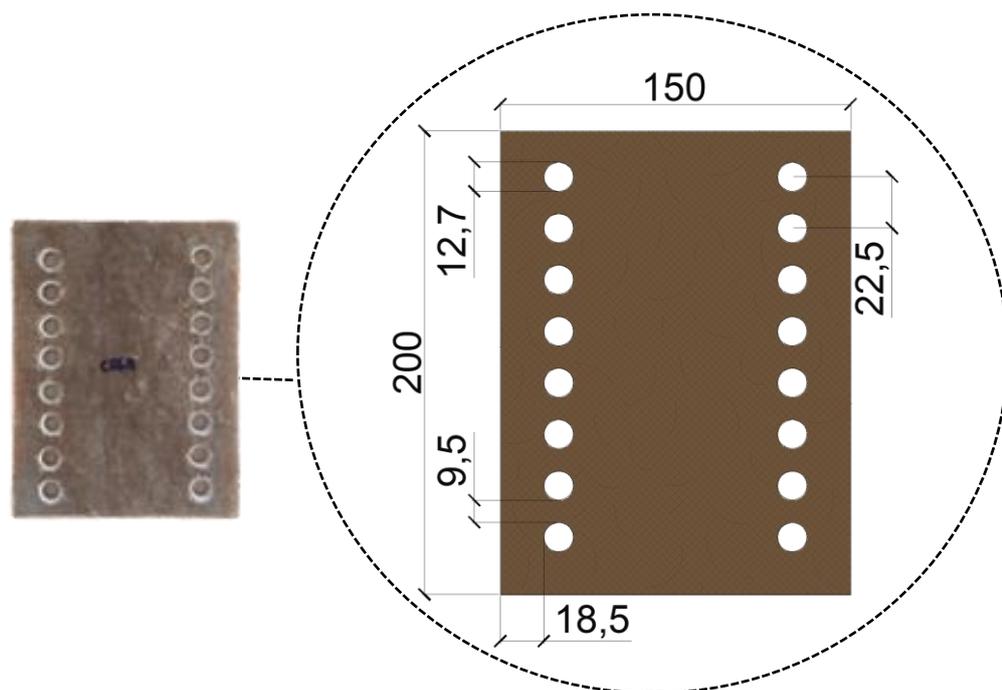


Figura 25 - Conector de cisalhamento com fibras de curauá dispostas aleatoriamente (medidas em mm). Fonte: Autor (2023)

Nos estudos conduzidos por Lameiras (2015) e Huang e Dai (2019) também foram estudados alguns tipos de conectores GFRP perfurado no formato de placas. Dentro das variáveis abordadas cabe destacar as conexões para aplicações em painéis de parede sanduíche, estudadas por meio de ensaio de *push-out*, para avaliação do desempenho mecânico. Os conectores perfurados GFRP estudadas por esses autores, mencionadas neste trabalho, possuem o formato de placa plana, incluindo as do grupo de controle (sem furos no conector).

Para identificar os conectores nos espécimes de concreto, adotou-se uma nomenclatura específica, exemplificada pelo conector “CO-14-A”. a) “CO” significa conector PERFOCuFRP; b) 14 - o primeiro algarismo indica o número do laminado que o conector foi extraído (laminado 1 ou laminado 2), sendo que neste caso específico, refere-se à primeira laminado produzida com dimensões de 250 × 900 mm; o segundo algarismo representa a quantidade de camadas equivalentes de CSM de 450 g/m²; c) A – identifica o próprio conector, pois são extraídos quatro conectores de cada laminado (A, B, C e D). Os espécimes de concreto que foram estudados no ensaio *push-out* são constituídos por dois conectores de cisalhamento embebidos na camada de concreto. A nomenclatura adotada auxilia na identificação dos conectores para as análises dos padrões de formação de fissuras após a ruptura.

3.2.2. Confeção dos corpos de prova de concreto

Após a fabricação dos compósitos laminados, extração das amostras para a caracterização mecânica e realização dos furos nos conectores, iniciou-se a fabricação dos espécimes de concreto. Os espécimes de concreto foram construídos com base na geometria e configuração de ensaio adotadas nos trabalhos de Huang e Dai (2019) e Silva (2020), onde utilizou-se dimensões totais iguais a 400 × 300 × 300 mm (comprimento × largura × altura), reproduzindo dois painéis sanduíche com camada de isolamento incorporado, conforme ilustrado na Figura 26.

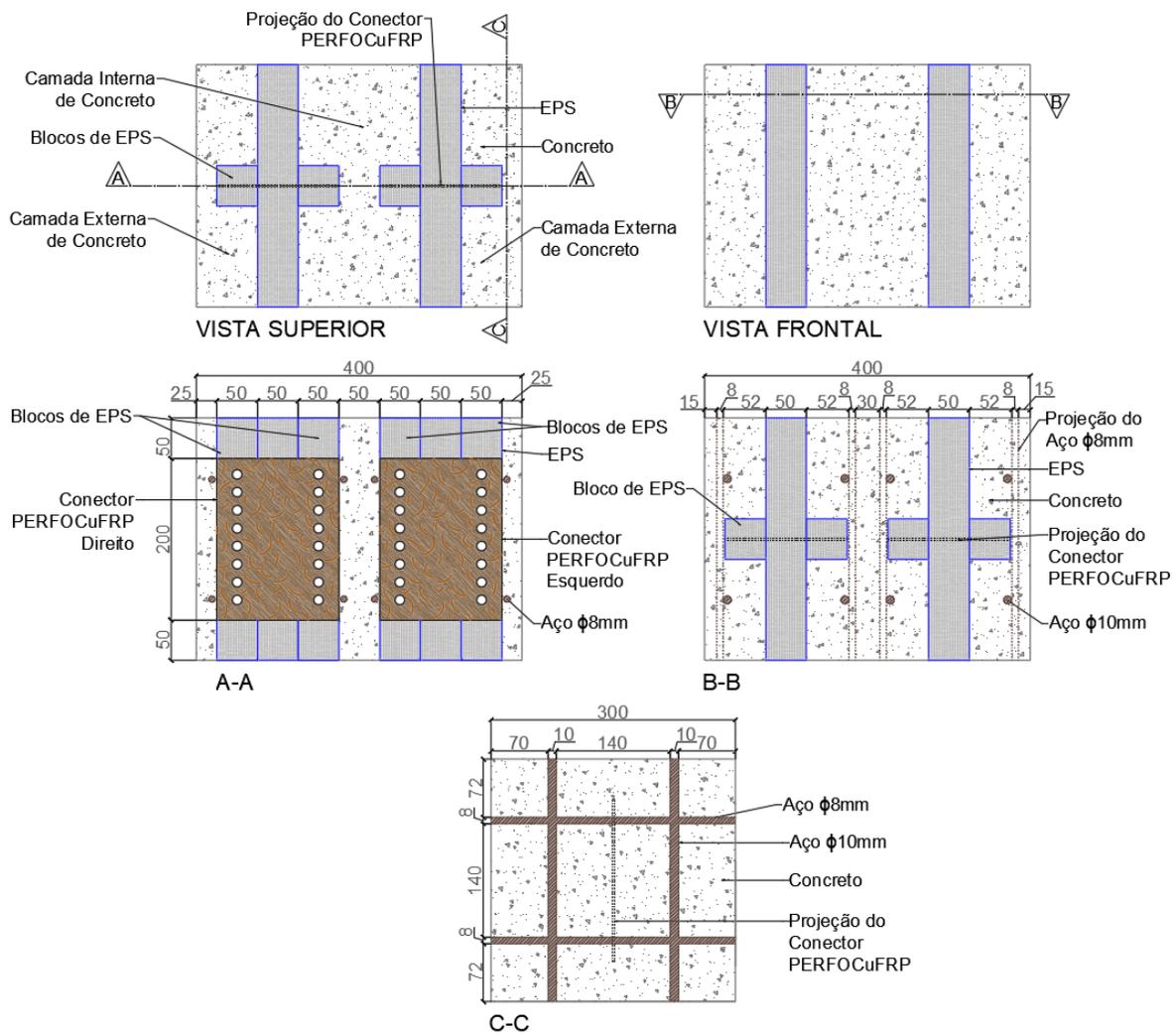


Figura 26 - Modelos representativos de painéis de parede tipo sanduíche confeccionados para ensaio *push-out* (medidas em mm). Adaptado de Silva (2020) e Huang e Dai (2019).

A fabricação dos espécimes de concreto decorreu-se com a montagem das formas de madeira; corte e dobra da armadura, corte e posicionamento das placas de EPS e conectores, conforme ilustrado na Figura 27. O madeirite utilizado foi o de 13 mm de espessura; as barras de aço foram as de 10,0 mm e 8 mm, alocadas na direção longitudinal e transversal, respectivamente. As placas de EPS foram cortadas nas dimensões de 300×300 mm, e os blocos de EPS foram cortados nas dimensões de 50×50 mm. A placa e o bloco de EPS foram unidos com cola específica para uso em isopor (EPS). Após a secagem da cola os conectores foram encaixados na placa de EPS, que por sua vez, foram encaixados nas formas de madeiras.

É importante ressaltar ainda que os blocos de EPS utilizados desempenham um papel fundamental na eliminação do efeito da frente de concreto no conector. Quando esse efeito não é considerado em conectores contínuos, os resultados do ensaio de *push-out* indicam valores de capacidade de carga do conector mais favoráveis à segurança no dimensionamento das

conexões. Conforme evidenciado pelo trabalho de Lameiras (2015), o efeito da frente de concreto no conector pode aumentar em cerca de 97% a capacidade de carga, em comparação aos valores obtidos quando esse efeito é desconsiderado. Além disso, a ductibilidade do conector também é afetada pela presença da frente de concreto. Lameiras (2015) demonstrou que a consideração desse efeito aumenta em cerca de 2,56 vezes a ductibilidade do conector, quando comparado aos conectores em que a presença da frente de concreto não é considerada.

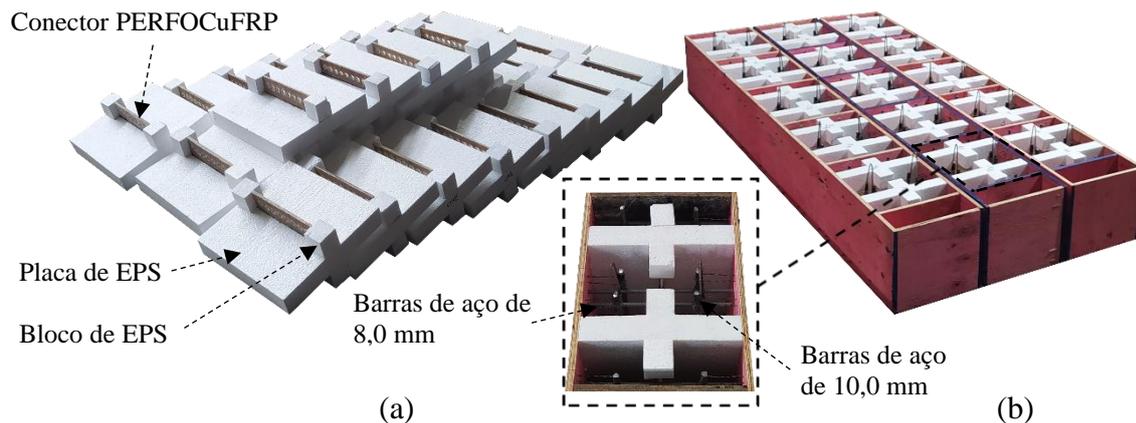


Figura 27 – (a) Placas de EPS com conectores embebidos e; (b) formas de madeira para concretagem dos espécimes de concreto. Fonte: Autor (2023)

Os espécimes foram fabricados com concreto usinado de classe de 40 MPa, abatimento de 10 ± 2 , agregado com dimensão máxima característica de 12,5 mm; o aço utilizado nos espécimes foi o CA50. Os corpos de prova utilizados nos ensaios de caracterização mecânica foram de 100 mm e comprimento de 200 mm. Os ensaios de caracterização mecânica do concreto foram executados no LEM após 180 dias da data da concretagem, conforme os procedimentos da ABNT NBR 16889:2020, ABNT NBR 5739:2018 e ABNT NBR 14931:2004 para a determinação, respectivamente, da resistência a compressão, módulo de elasticidade e da resistência a tração do concreto (por compressão diametral dos corpos de prova cilíndricos).

A nomenclatura adotada para os espécimes de concreto leva em consideração o nome do espécime, com o prefixo “ESC”, que significa “espécime de concreto”; os dois algarismos seguintes consideram o número do laminado e a quantidade de camadas equivalentes de CSM de 450 g/m²; as duas últimas letras identificam os conectores embebidos no espécime de concreto para o ensaio de *push-out*. No fim, os espécimes de concreto foram agrupados conforme a gramatura nominal do laminado do qual o conector foi extraído, sendo nomeado de ESC-GN1, ESC-GN2 e ESC-GN3, como já explicado em tópicos anteriores.

3.3. Terceira etapa

Esta etapa compõem a realização dos ensaios de *push-out*, executado em uma prensa universal EMIC DL 3000, com capacidade de carga de 300 kN, localizada no laboratório de materiais (LEM) da Universidade de Brasília (UnB).

3.3.1. Ensaio *push-out*

Os ensaios *push-out* foram realizados com amostras de concreto fixadas com conectores PERFOCuFRP, ou seja, conectores perfurados de polímero reforçado com fibras curtas de curauá. A escolha do tamanho das amostras de concreto, da geometria dos conectores, do diâmetro dos furos, do espaçamento entre os furos e da gramatura adotada foi baseada principalmente nos estudos de Lameiras (2015), Huang e Dai (2019) e Silva (2020).

Para realizar o ensaio *push-out*, foi utilizado um conjunto de equipamentos composto pela prensa EMIC DL 3000, uma célula de carga HBM com capacidade de 500 kN e dois transdutores de deslocamento do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*). Esses equipamentos foram conectados ao módulo HBM Spider 8 (modelo SR30), o qual foi configurado por meio do software Catman 4.5. Os espécimes de concreto foram posicionados sobre vigas de aço, com as duas camadas externas de concreto apoiadas sobre elas, a fim de submeter a camada interna ao carregamento e gerar o cisalhamento nos conectores PERFOCuFRP. Para melhorar a distribuição da carga aplicada, foi inserido espaçadores de aço e de borracha nas áreas de contato entre a célula de carga e o espécime de concreto, bem como entre o espécime de concreto e as vigas de aço. A leitura dos dados foi realizada por meio do *software* da EMIC e *Catman 4.5*, configurado na frequência de 1Hz, instalados no sistema operacional *Windows 7*.

Os dados de deslocamento foram coletados utilizando dois transdutores de deslocamento LVDT, ambos de curso máximo de aproximadamente 13 cm, apoiados em cantoneiras metálicas. Essas cantoneiras foram fixadas com parafusos na camada interna do corpo de prova de concreto, nas faces de maior comprimento e paralelas entre si. Os LVDTs foram fixados em chapas de aço, que por sua vez eram fixadas com parafusos nas camadas mais externas do corpo de prova de concreto, também nas faces de maior comprimento e paralelas entre si. A chapa metálica, localizada na parte inferior do corpo de prova de concreto, foi fixada utilizando parafusos com o intuito de estabelecer uma conexão mecânica com o espécime de concreto. Esta ação teve como finalidade mitigar a potencial ocorrência de rotação do corpo de prova de concreto em relação aos pontos de apoio, que consistem em vigas de aço posicionadas imediatamente abaixo do corpo de prova de concreto sobre espaçadores de borracha, como

mostrado nas Figuras 20(a) e (b). Os LVDTs foram utilizados para medir o deslocamento relativo entre as camadas externas e a camada interna de concreto. Dessa forma, à medida que a camada interna de concreto era submetida ao carregamento, o LVDT registrava os dados de deslocamento. O deslocamento relativo foi calculado pela média das leituras realizadas pelos dois transdutores de deslocamentos (LVDT 1 e LVDT 2).

As curvas de carregamento *versus* deslocamento relativo foram obtidas por meio dos dados registrados do carregamento aplicado entre as duas camadas externas dos corpos de prova de concreto e do deslocamento relativo determinado com base na média dos deslocamentos relativos medidos pelos LVDT1 e LVDT2.

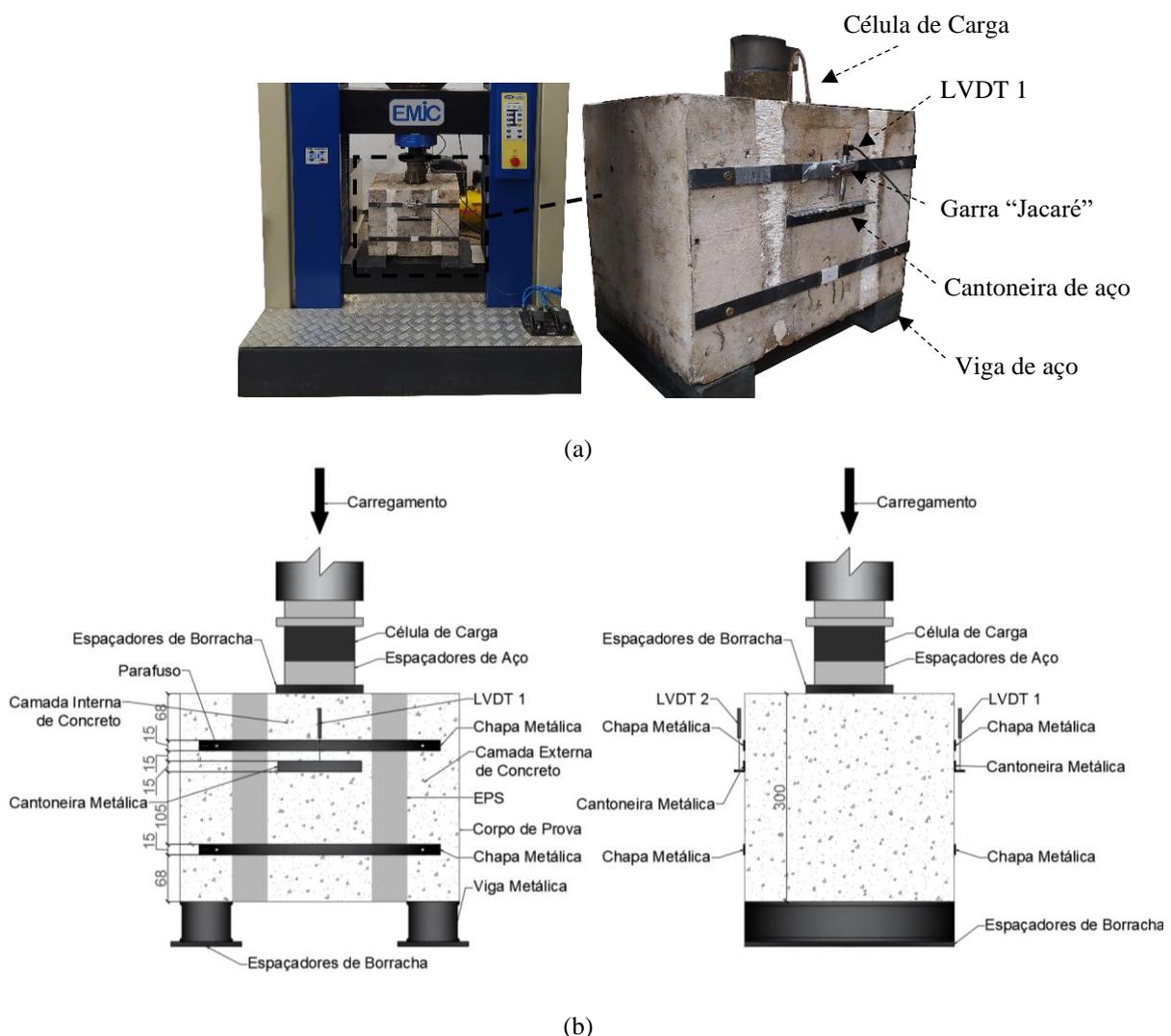


Figura 28 – Configuração do ensaio *push-out* (medidas em mm). Fonte: Autor (2023)

A execução do ensaio procedeu-se com a aplicação da carga com velocidade de 0,1 mm/min até 6 mm de deslocamento e de 0,5 mm/min de 6 mm até 30 mm. A alteração da velocidade foi feita por uma questão prática, para acelerar o ensaio. A aplicação da força foi

interrompida quando os transdutores de deslocamento chegavam ao fim de curso. Após a ruptura dos espécimes de concreto os conectores foram extraídos para a análise das fissuras que foram desenvolvidas. Todos os ensaios de *push-out* foram conduzidos no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) da Faculdade de Tecnologia (FT) da Universidade de Brasília (UnB). Eles foram realizados de 202 dias a 297 dias após a data da concretagem.

3.3.2. Padrões de fissuração

Além do tipo e proporção de massa de fibras utilizadas na fabricação do conector, outros mecanismos também contribuem para a capacidade de carga final da conexão conector PERFOCuFRP × concreto. Várias outras características como: o espaçamento e a quantidade de furos no conector (para a formação de pinos de ancoragem), o confinamento do conector no concreto e a aderência entre o polímero e o concreto são fatores que contribuem para a qualidade final da conexão. Sendo assim, após a realização dos ensaios *push-out* os conectores foram extraídos dos espécimes de concreto para a avaliação visual dos padrões de fissuração e dos parâmetros que contribuíram para a capacidade de carga final da conexão.

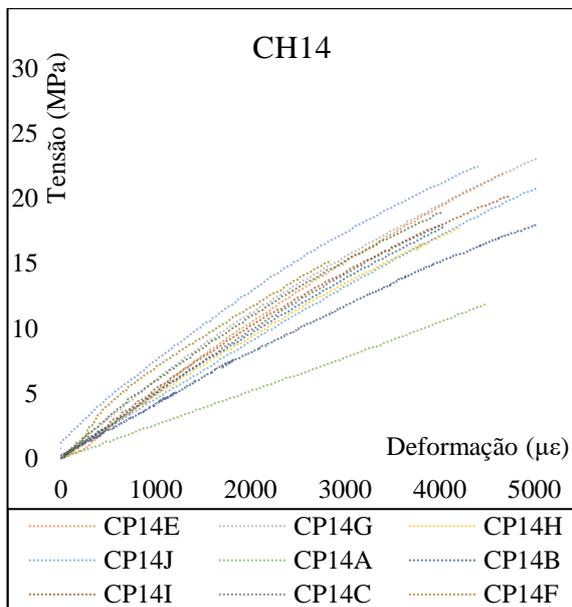
4. RESULTADOS

Os resultados apresentados neste trabalho estão divididos conforme as principais etapas do desenvolvimento do programa experimental: (a) ensaio de tração dos compósitos; (b) avaliação da qualidade e classificação dos compósitos e (c) ensaio de *push-out*

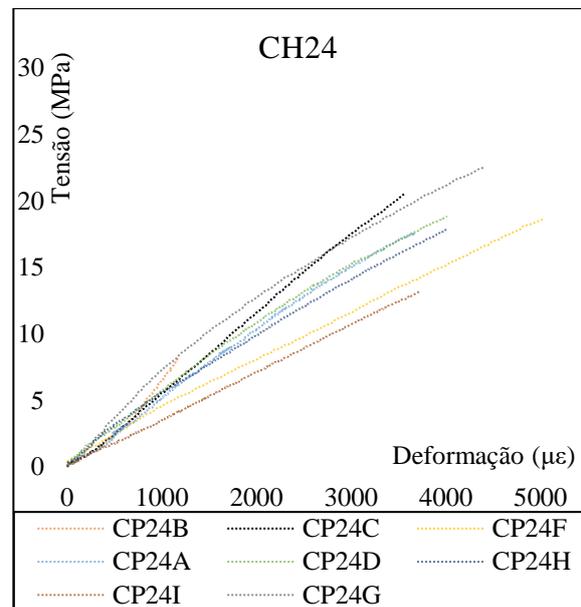
4.1. Ensaio de tração dos compósitos e da resina

Nesta seção os resultados dos ensaios de tração, realizados nas amostras com o objetivo de caracterizar os compósitos, são apresentados. As Figuras 29, 30 e 31 exibem os gráficos dos ensaios de tração direta, que foram conduzidos para determinar o módulo de elasticidade longitudinal dos compósitos nas chapas de fibras curtas, longas e nas amostras de resina poliéster, respectivamente. É importante enfatizar que os gráficos apresentados correspondem até o momento em que o *clip-gauge* era removido da amostra. As amostras das chapas de CuFRP foram identificadas e descritas na legenda dos gráficos das figuras com o prefixo "CP", que representa "corpo de prova" (ou amostra). As amostras das chapas de CuLFRP foram identificadas e descritas na legenda dos gráficos das figuras com o prefixo "FT" ou "FNT", indicando as fibras longas de curauá tratadas e as fibras longas de curauá não tratadas, respectivamente. As amostras de resina poliéster foram identificadas e descritas na legenda dos

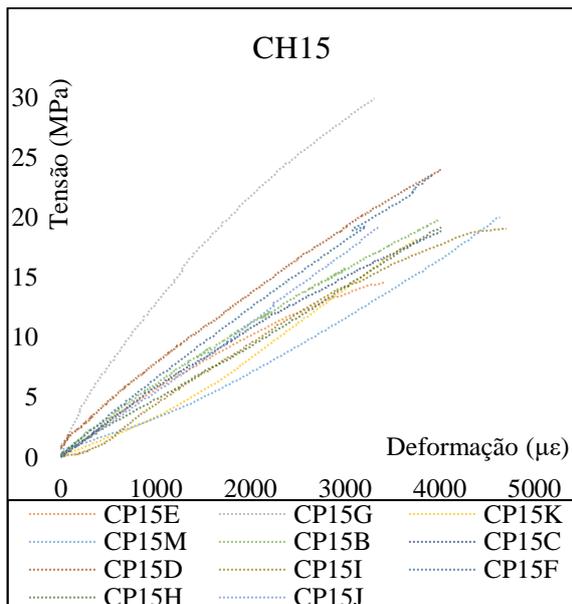
gráficos das figuras com o prefixo "RP", referindo-se à resina poliéster. A quantidade de amostras submetidas ao ensaio de tração variou entre as chapas de CuFRP ou de CuLFRP devido a falhas que ocorreram em algumas amostras durante o ensaio e a perdas que ocorreram durante a extração e corte dos laminados. Para identificar as amostras que sofreram falhas durante a execução dos ensaios de tração ou foram perdidas durante a extração e corte dos laminados, a "letra final" do nome original dos corpos de prova foi mantida, ou seja, o nome das amostras não foi reorganizado alfabeticamente ou renumerado, preservando-se o nome original das amostras.



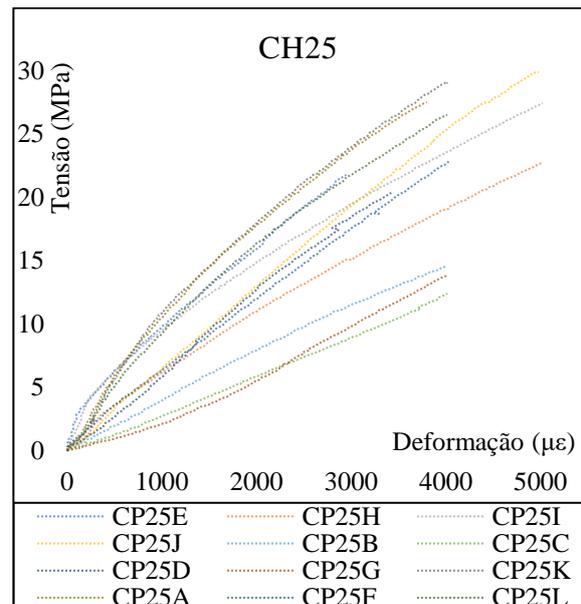
(a)



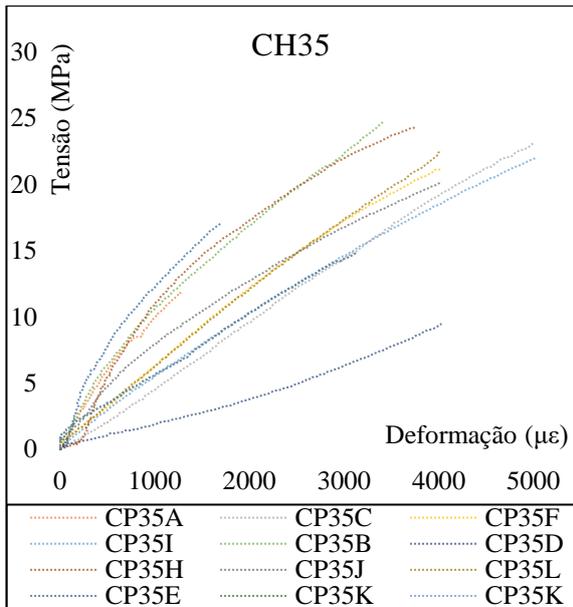
(b)



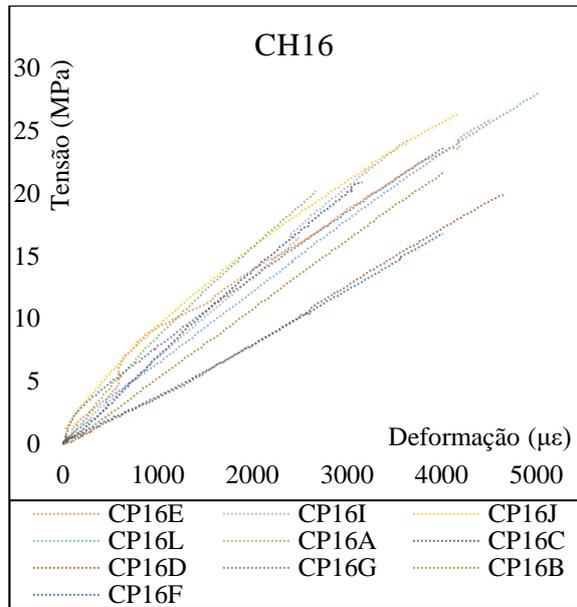
(c)



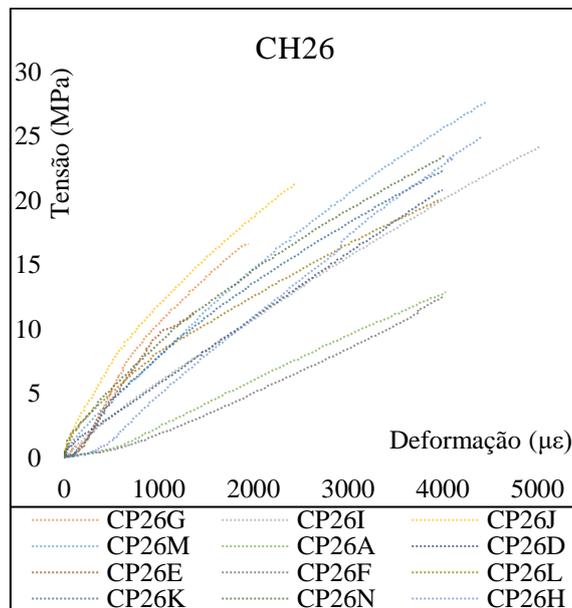
(d)



(e)



(f)



(g)

Figura 29 – Curva tensão *versus* deformação das amostras retiradas das chapas: a) “CH14”; b) “CH24”; c) “CH15”; d) “CH25”; e) “CH35”; f) “CH16”; g) “CH26”. Fonte: Autor (2023)

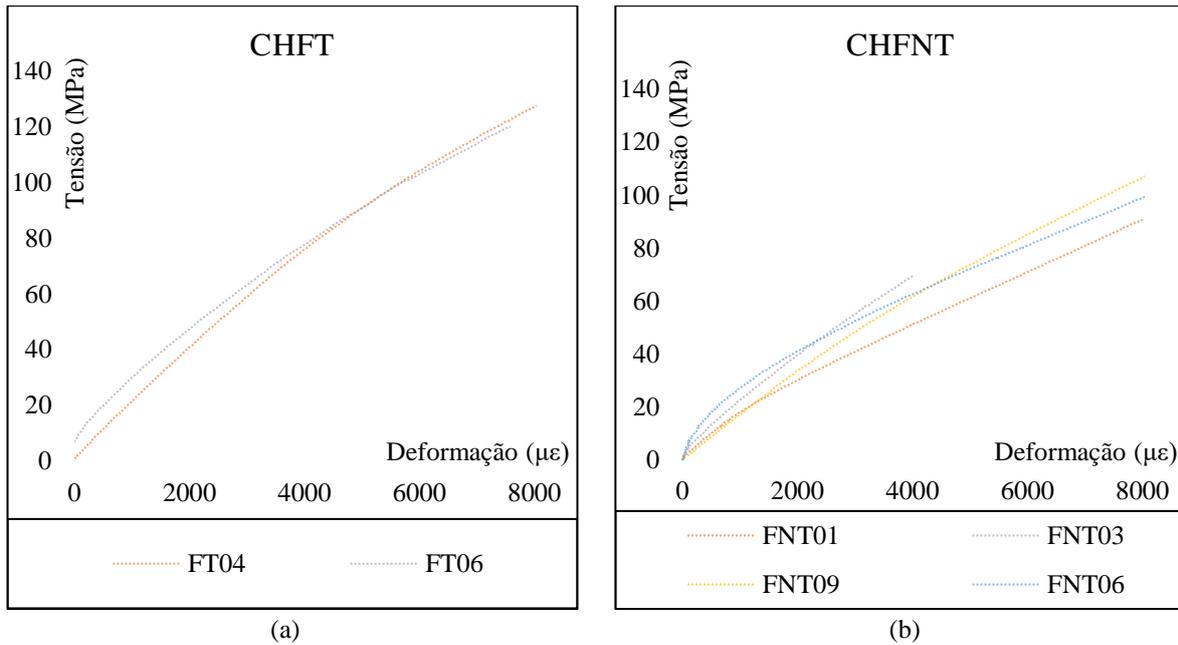


Figura 30 - Curva tensão *versus* deformação das amostras retiradas dos laminados de CuLFRP: a) “CHFT”; b) “CHFNT”. Fonte: Autor (2023)

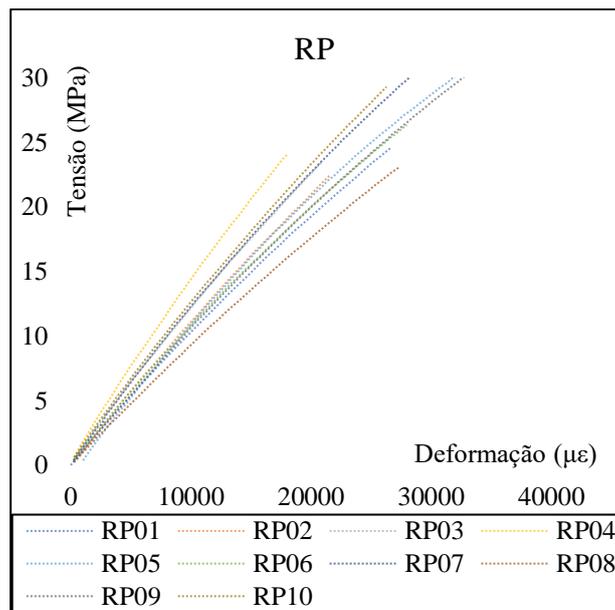


Figura 31 - Curva tensão versus deformação das amostras de resina poliéster. Fonte: Autor (2023)

Na Tabela 11 são apresentadas para as chapas: a) nome; b) espaço amostral; c) gramatura nominal (g/m^2); d) espessura média (mm); e) proporção média de massa de fibras (%); f) tensão última à tração (MPa); g) módulo de elasticidade (GPa); h) Deformação na ruptura (mm/mm) e; h) coeficientes de variação CoV (%) de cada propriedade. Para a aferição das propriedades requeridas de tensão e módulo de elasticidade, seguiu-se as recomendações da norma ASTM D3039/D3039M (2017). No texto, assim como no cabeçalho desta tabela e

das seguintes, a propriedade “proporção média de massa de fibras (%)” foi denominada de “proporção de fibras (%)” para facilitar as descrições.

Tabela 11 - Espessura, tensão última à tração, proporção de fibras e deformação na ruptura.

Chapas e Resina	Espaço Amostral	Espessura		Proporção de fibras		Tensão última à tração		Módulo de Elasticidade		Deformação na Ruptura	
		Média (mm)	CoV (%)	Média (%)	CoV (%)	Média (MPa)	CoV (%)	Média (GPa)	CoV (%)	Média ($\mu\epsilon$)	CoV (%)
CH14	12	5,95	16,31%	29,59%	21,54%	23,52	18,70%	4,46	15,08%	5249,60	11,66%
CH24	8	6,25	9,45%	25,77%	11,61%	22,43	19,30%	5,31	33,28%	4681,97	28,59%
CH15	11	8,07	28,09%	24,94%	28,15%	22,10	18,94%	5,57	27,36%	4100,02	15,50%
CH25	12	7,71	17,09%	24,77%	17,85%	28,74	16,24%	5,78	27,28%	5204,76	23,62%
CH35	11	6,40	5,00%	32,07%	6,28%	23,64	18,56%	6,13	31,86%	4308,86	37,57%
CH16	10	8,08	9,79%	27,44%	10,46%	35,50	9,99%	5,72	17,18%	6200,35	20,85%
CH26	12	8,29	10,42%	27,29%	13,32%	27,75	20,45%	6,08	33,38%	5923,11	44,64%
CHFT	2	3,49	7,27%	42,46%	-	137,47	11,43%	17,14	1,92%	8043,23	11,73%
CHFNT	4	3,83	7,91%	42,84%	-	125,18	23,43%	13,00	10,81%	8924,73	14,27%
RP	10	2,77	6,56%	-	-	28,39	22,05%	1,07	11,93%	28468,46	28,50%

Fonte: Autor (2023)

De acordo com os resultados obtidos, independentemente da gramatura nominal dos compósitos, os valores médios para as chapas fabricadas com polímero de fibras curtas de curauá (chapas CuFRP) foram de 7,25 mm de espessura, com coeficiente de variação de 13,74 %; proporção de fibras de 27,36 %, com coeficiente de variação de 15,60%; tensão última à tração de 26,24 MPa, com coeficiente de variação de 17,45%; e módulo de elasticidade de 5,58 GPa, com coeficiente de variação de 26,49 %. Da mesma maneira, independentemente do tratamento químico aplicado nas fibras longas de curauá, os valores médios para as chapas fabricadas com mantas de fibras longas de curauá (chapas CuLFRP) foram de 3,66 mm de espessura, com coeficiente de variação de 7,59 %; proporção de fibras de 42,65 %; tensão última à tração de 131,33 MPa, com coeficiente de variação de 17,43%; e módulo de elasticidade de 15,07 GPa, com coeficiente de variação de 6,36%. O coeficiente de variação da proporção de fibras das chapas CuLFRP, assim como o erro padrão, não foi calculado, pois a proporção de fibras foi obtida a partir da razão entre a massa da manta de fibras e da massa do laminado de CuLFRP.

Comparando-se o resultado das amostras de compósitos fabricados com mantas de fibras curtas de curauá (CuFRP), apresentados na Tabela 11, com os resultados obtidos nos estudos de Lameiras (2015) e Silva (2020, 2021), que prepararam compósitos fabricados com CSM de fibra de vidro, observa-se que as propriedades de tensão máxima de tração

representam 12,04% e 15,98%, respectivamente, enquanto o módulo de elasticidade representa 40,18% e 41,78%, respectivamente. Quanto a deformação na ruptura, o resultado das amostras dos compósitos de CuFRP, apresentados na Tabela 11, representa cerca de 30,74% do resultado dos ensaios de tração direta em amostras de compósitos de CSM estudados por Lameiras (2015).

Com base nos valores médios de resistência à tração das chapas CuFRP, conforme apresentado acima, e nos valores encontrados nos trabalhos de Giacomini, Neis e Leão (2000), Silva (2010), e Teixeira (2019), também com compósitos reforçados com fibras curtas de curauá utilizando resina de poliéster, percebeu-se que esses valores correspondem a 66%, 52% e 187% dos valores encontrados por esses autores, respectivamente. Para o módulo de elasticidade, com base no trabalho desses mesmos autores, os valores corresponderam a 153%, 190% e 613%. Os valores de resistência à tração e módulo de elasticidade se aproximaram mais dos resultados aferidos por Giacomini, Neis e Leão (2000). Isso pode ser explicado pela fração volumétrica se apresentar mais próxima da que foi utilizada no presente trabalho para as chapas CuFRP. Esse comparativo foi feito em compósitos com uma proporção de fibras de 29,40%, 20% e 10%. Quanto a deformação na ruptura, para o compósito de CuFRP, o resultado representa cerca de 45,50% do resultado apresentado por Teixeira (2019). É importante ressaltar ainda que esses autores utilizaram os métodos de moldagem por compressão, moldagem por compressão a quente e laminação manual para o processamento dos compósitos, respectivamente. Os valores de resistência à tração e módulo de elasticidade se aproximaram mais dos resultados aferidos por Giacomini, Neis e Leão (2000), que adotaram uma proporção de fibras bem próxima dos compósitos CuFRP, deste trabalho, porém, com uso de um método de processamento diferente dos adotados neste trabalho, conforme descrito na Tabela 9, na seção 2.3.3.

Com base nos valores médios de resistência à tração das chapas CuLFRP, conforme apresentado na Tabela 11, acima, e nos valores encontrados nos trabalhos de Lopes (2011), Oliveira (2015) e Rodrigues, Souza e Fujiyama (2015), também com compósitos reforçados com fibras longas de curauá utilizando resina de poliéster, notou-se que esses valores correspondem a 127%, 79% e 151% dos valores encontrados por esses autores, respectivamente. Para o módulo de elasticidade, com base no trabalho desses mesmos autores, os valores corresponderam a 1150%, 95% e 388%. Esse comparativo foi feito em compósitos com uma proporção de fibras de 40%, 20% e 38%. Quanto a deformação na ruptura, para o compósito CuLFRP, o resultado representa cerca de 12,51% e 30,82% dos resultados apresentados por Lopes (2011) e Rodrigues, Souza e Fujiyama (2015). É importante ressaltar

ainda que esses autores utilizaram os métodos de moldagem por compressão a quente, moldagem por compressão e infusão à vácuo para o processamento dos compósitos, respectivamente. Os valores de resistência à tração e módulo de elasticidade se aproximaram mais dos resultados aferidos por Oliveira (2015), que apesar de utilizar uma proporção de fibras menor que a dos compósitos CuLFRP, utilizou um método de processamento diferente dos adotados neste trabalho, conforme descrito na Tabela 9, na seção 2.3.3.

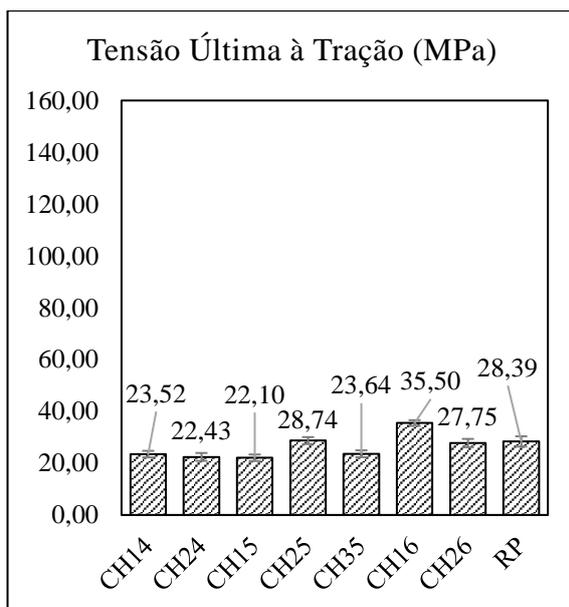
É importante destacar que os valores médios das chapas fabricadas com mantas de fibras longas de curauá (chapas CuLFRP) variaram de acordo com o tratamento químico aplicado nas fibras de curauá, especialmente nos valores de tensão última à tração e módulo de elasticidade. Conforme apresentado na Tabela 11 e no gráfico da Figura 33, os valores médios de tensão última à tração e módulo de elasticidade das chapas CHFNT representam cerca de 91,06% e 75,82%, respectivamente, das chapas CHFT. Isso indica que o tratamento químico melhorou essas propriedades das fibras nos compósitos, conforme validado também por Oliveira (2015).

Os valores para as amostras de resina pura (RP) foram de 2,77 mm de espessura, com coeficiente de variação de 6,56 %; tensão última à tração de 28,39 MPa, com coeficiente de variação de 22,05%; e módulo de elasticidade de 1,07 GPa, com coeficiente de variação de 11,93%. Comparando com os dados da literatura, os pesquisadores Silva (2018), Cerchiaro (2016), Neto e Antônio (2016) obtiveram valores médios de 25,37 MPa, $24,83 \pm 9,36$ MPa, $32,33 \pm 1,73$ MPa e 1,89 GPa, $0,48 \pm 0,13$, $0,65 \pm 0,04$ para as propriedades de tensão última à tração e módulo de elasticidade, respectivamente. Esses resultados representam cerca de 89,36 %, 87,46 % e 113,88% da tensão última à tração e 176 %, 44,86 % e 60,75 % do módulo de elasticidade da RP, na mesma sequência.

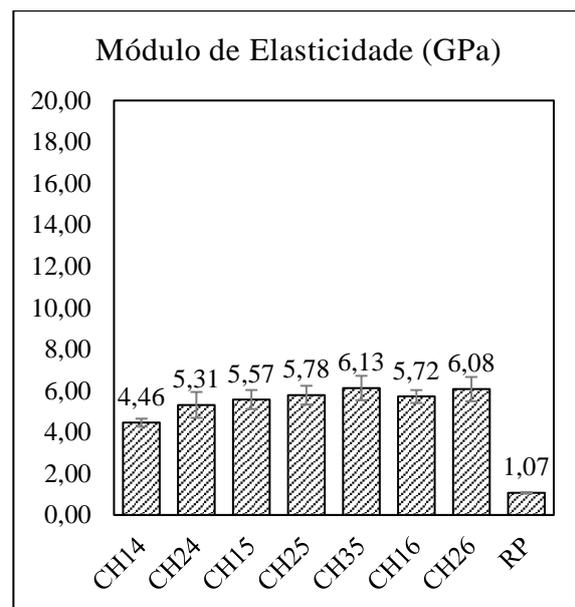
Quanto a deformação na ruptura, ou deformação máxima, como descrito por Silva (2018), para a resina, o resultado da resina pura encontrado nesta pesquisa representa cerca de 219%, 42% e 57% dos resultados apresentados por esses mesmos autores, na mesma sequência. A deformação na ruptura, também conhecida como alongação, é definida no catálogo do fabricante da resina de poliéster, como descrito na seção 3.1.3 deste estudo. Com base nos dados disponíveis, a alongação foi observada com um valor de 2,2%, o que representa aproximadamente 77% do valor de 2,84% apresentado na Tabela 11. É importante mencionar ainda que o módulo de elasticidade citado por Cerchiaro (2016) refere-se ao módulo de elasticidade teórico. Além disso, a resistência a tração e módulo de elasticidade, apresentados na Tabela 11, apresentaram-se inferiores ao do fabricante, de 40,2 MPa e 2,2 GPa, respectivamente, representando cerca de 71% e 49% para essas duas propriedades.

Conforme evidenciado na análise dos resultados experimentais relativos à resistência à tração, módulo de elasticidade e alongamento da resina pura (RP), observou-se uma notável discrepância em relação aos valores estipulados no catálogo do fornecedor. Essa disparidade pode ser atribuída às dimensões reduzidas dos corpos de prova RP, conforme apresentado no Apêndice C, comparado com as dimensões recomendadas pela ASTM D638 (2022) e da ausência da submissão das amostras de resina a um processo de pós-cura, conforme recomendado pelo fabricante. Este procedimento implica que as amostras de resina devem ser mantidas a uma temperatura de 60°C por um período de 2 horas, conforme especificado no catálogo.

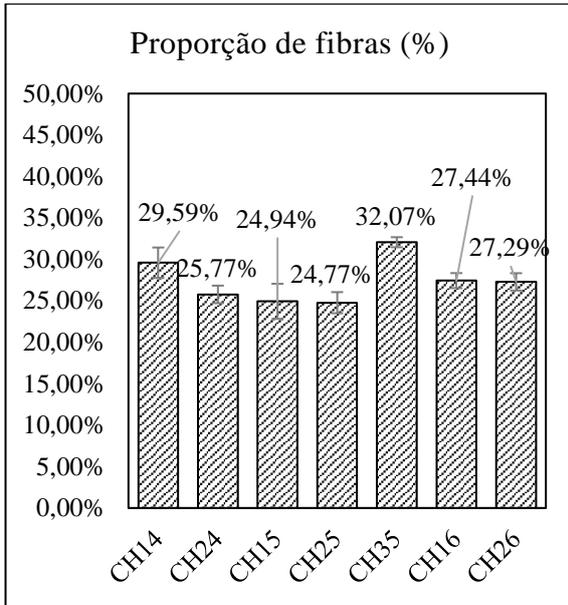
Os dados apresentados nos gráficos das Figura 32 e 33 indicam as propriedades contidas na Tabela 11, isto é, apresenta as propriedades de tensão última à tração, módulo de elasticidade, proporção de fibras e deformação na ruptura. Os dados foram obtidos a partir das amostras que compõem as chapas CuFRP, CuLFRP e de resina RP, respectivamente.



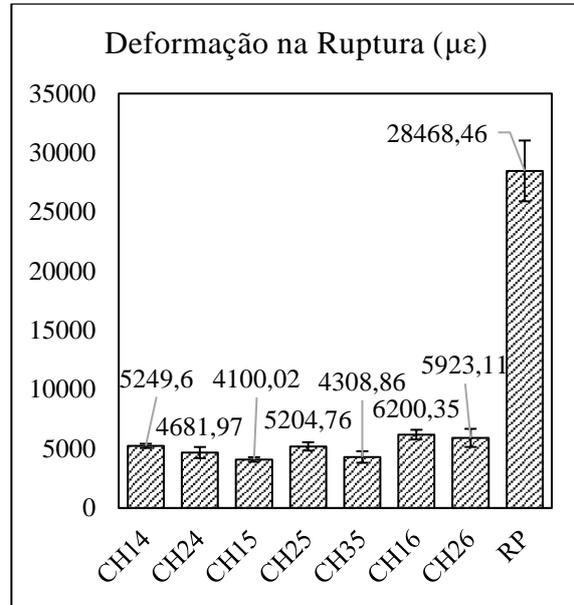
(a)



(b)

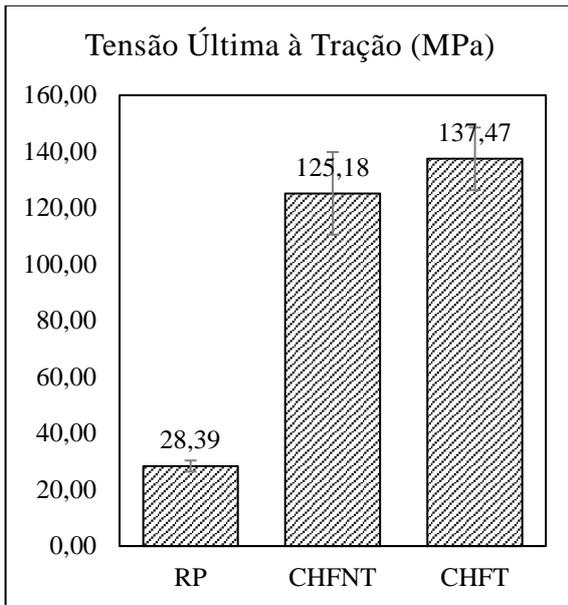


(c)

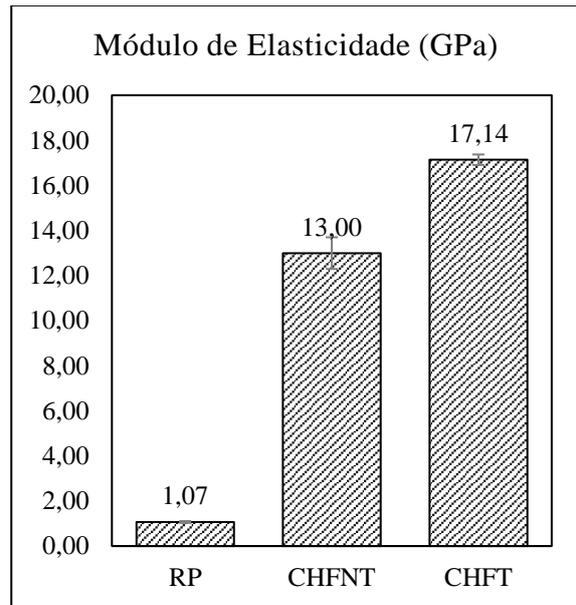


(d)

Figura 32 - Gráficos de: a) tensão última à tração; b) módulo de elasticidade; c) proporção de fibras das chapas e; d) deformação na ruptura dos compósitos CuFRP e resina RP. Fonte: Autor (2023).



(a)



(b)

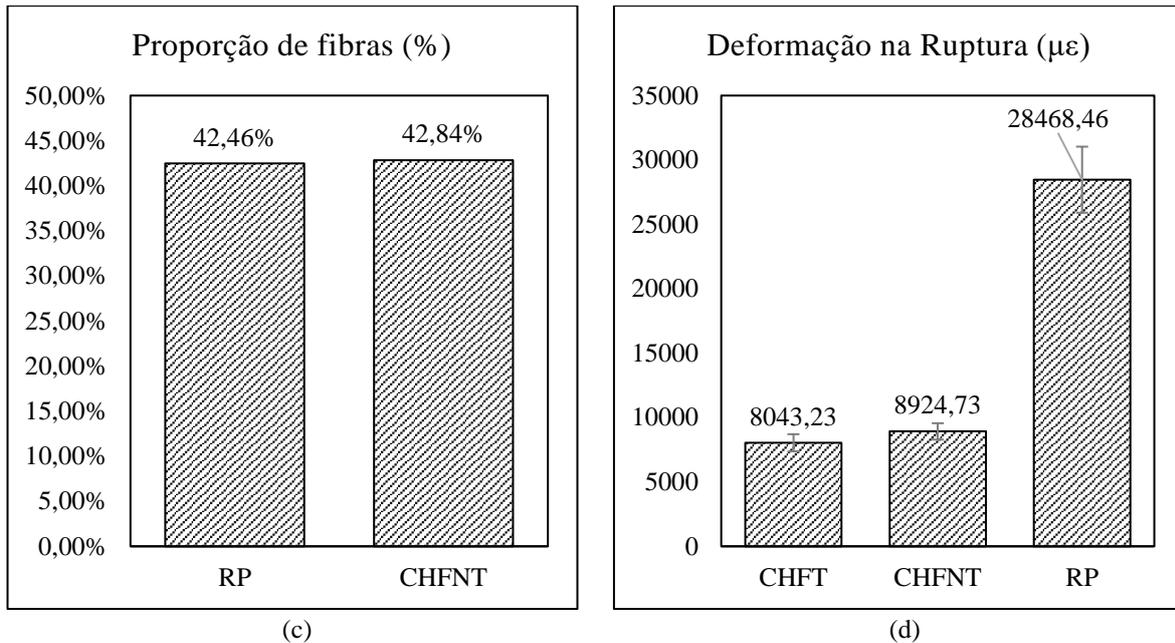


Figura 33 - Gráficos de: a) tensão última à tração; b) módulo de elasticidade; c) proporção de fibras e; d) deformação na ruptura dos compósitos CuLFRP e resina RP. Fonte: Autor (2023).

Com base na nos gráficos apresentados logo acima e nos dados apresentados na Tabela 11, na Tabela 12, são apresentados os erros padrão das propriedades mencionadas. Com base nisso, constata-se uma variabilidade dos dados das amostras com relação à média para uma mesma chapa. Isso significa afirmar que um mesmo laminado possui diferença entre as médias, para cada uma das propriedades, o que pode ser explicado na avaliação da qualidade e classificação dos compósitos por meio de outros métodos estatísticos. A avaliação da qualidade dos compósitos não foi realizada para a propriedade de deformação da ruptura, já que essa propriedade se trata de uma estimativa a partir da curva de tensão deformação, como descrito na seção 3.1.4.

Tabela 12 - Erros padrões separado por propriedade

Chapas e Resina	Espaço Amostral	Gramatura Nominal (g/m ²)	Proporção de fibras (%)	Tensão última à tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação na Ruptura (με)
CH14	12	1800	1.84%	1.27	0.19	176.70
CH24	8	1800	1.06%	1.53	0.62	473.26
CH15	11	2500	2.12%	1.26	0.46	191.61
CH25	12	2500	1.28%	1.35	0.46	354.89
CH35	11	2500	0.61%	1.32	0.59	488.10
CH16	10	2700	0.91%	1.12	0.31	408.81
CH26	12	2700	1.05%	1.64	0.59	763.28

<i>CHFT</i>	2	2500	-	11,11	0,23	667,13
<i>CHFNT</i>	4	2500	-	14,66	0,70	636,90
<i>RP</i>	4	-	-	1,98	0,04	2565,54

Fonte: Autor (2023)

4.2. Avaliação da qualidade e classificação dos compósitos

A avaliação da qualidade de produção e classificação das chapas CuFRP foi realizada com uso dos parâmetros de tensão última à tração ($\sigma_{pt.u}$); módulo de elasticidade ($E_{pt.l}$) e proporção de fibras (M_f), conforme apresentado nas Figura 34 a 37 e Tabelas 13 a 27. As amostras foram avaliadas em três diferentes níveis: a) entre amostras de uma mesma chapa; b) entre amostras de chapas de mesma gramatura nominal e; c) entre amostras de chapas de gramaturas nominais diferentes.

4.2.1. Entre amostras de uma mesma chapa

De acordo com a metodologia de classificação dos coeficientes de variação (CoV) abordado por Pimentel e Gomes (2009) e resultados da Tabela 11 das chapas e resina, no total, tem-se para a espessura: 6 chapas classificadas como baixo, 3 classificadas como média e 1 classificada como alta; para proporção de fibras, tem-se: 1 chapa classificada como baixo, 4 classificadas como média e 2 classificadas como alta; para a tensão última à tração, tem-se: 1 chapa classificada como baixo, 6 classificadas como média e 3 classificadas como alta; para o módulo de elasticidade, tem-se: 1 chapa classificada como baixo; 4 chapas classificadas como média, 3 classificadas como alta e 3 classificadas como muito alta. No total, levando em consideração todas as propriedades analisadas, obteve-se 9 classificações baixa, 17 classificações média, 8 classificações alta e 3 classificações muito alta. A Tabela 13 ilustra a classificação entre amostras de uma mesma chapa, conforme as propriedades analisadas.

Tabela 13 – Classificação dos coeficientes de variação entre amostras de uma mesma chapa

<i>Chapa</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Proporção de fibras (%)</i>	<i>Tensão última à tração (MPa)</i>	<i>Módulo de Elasticidade (GPa)</i>
<i>CH14</i>	médio	alto	médio	médio
<i>CH24</i>	baixo	médio	médio	muito alto
<i>CH15</i>	alto	alto	médio	alto
<i>CH25</i>	médio	médio	médio	alto
<i>CH35</i>	baixo	baixo	médio	muito alto
<i>CH16</i>	baixo	médio	baixo	médio
<i>CH26</i>	médio	médio	alto	muito alto
<i>CHFT</i>	baixo	-	médio	baixo

<i>CHFNT</i>	baixo	-	alto	médio
<i>RP</i>	baixo	-	alto	médio

Fonte: Autor (2023)

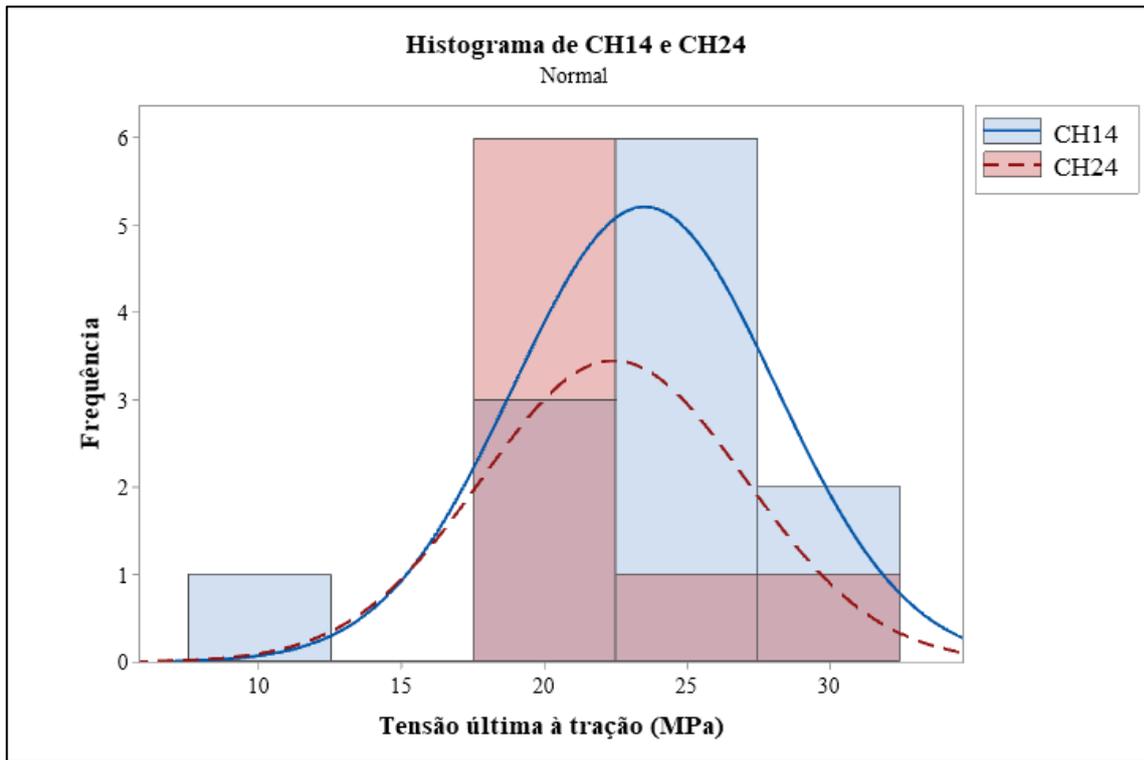
De acordo com os dados apresentados na Tabela 13, para algumas propriedades, as chapas não apresentaram características homogênea ao longo de sua extensão, ou seja, o processo de infusão de resina e a distribuição das fibras no compósito não foram totalmente eficientes, por se tratar de um procedimento puramente manual. Dessa maneira, para a chapa CuFRP, a propriedade mais afetada com classificações alto e muito alto foi o módulo de elasticidade, na qual apresentou 2 classificações alto e 3 classificações muito alto. Já para a chapa CuLFRP e resina RP, ambas, apresentaram 1 classificação alto para a propriedade de tensão última à tração. Por meio disso, e dos erros padrões demonstrados anteriormente, no qual foi constatado uma variabilidade dos dados das amostras com relação à média das chapas, ou seja, um mesmo laminado possui diferença entre as médias para cada uma das propriedades, pode-se demonstrar a variabilidade dos dados por meio de outros métodos estatísticos, conforme descrito na seção 3.1.5 e esquematizado na Figura 21.

A variabilidade dos resultados entre amostras provenientes de uma mesma chapa pode ser demonstrada por meio dos testes de normalidade dos dados, para estes casos, utilizou-se o teste de Anderson-Darling. Dessa maneira, elaborou-se a Tabela 14 e os histogramas com as respectivas curvas de distribuição normal representados de acordo com os parâmetros de proporção de fibras, tensão última à tração e módulo de elasticidade das chapas CuFRP. Os histogramas da Figura 34 foram agrupados, conforme a gramatura nominal das chapas, somente para facilitar as observações e comparações entre as propriedades das chapas.

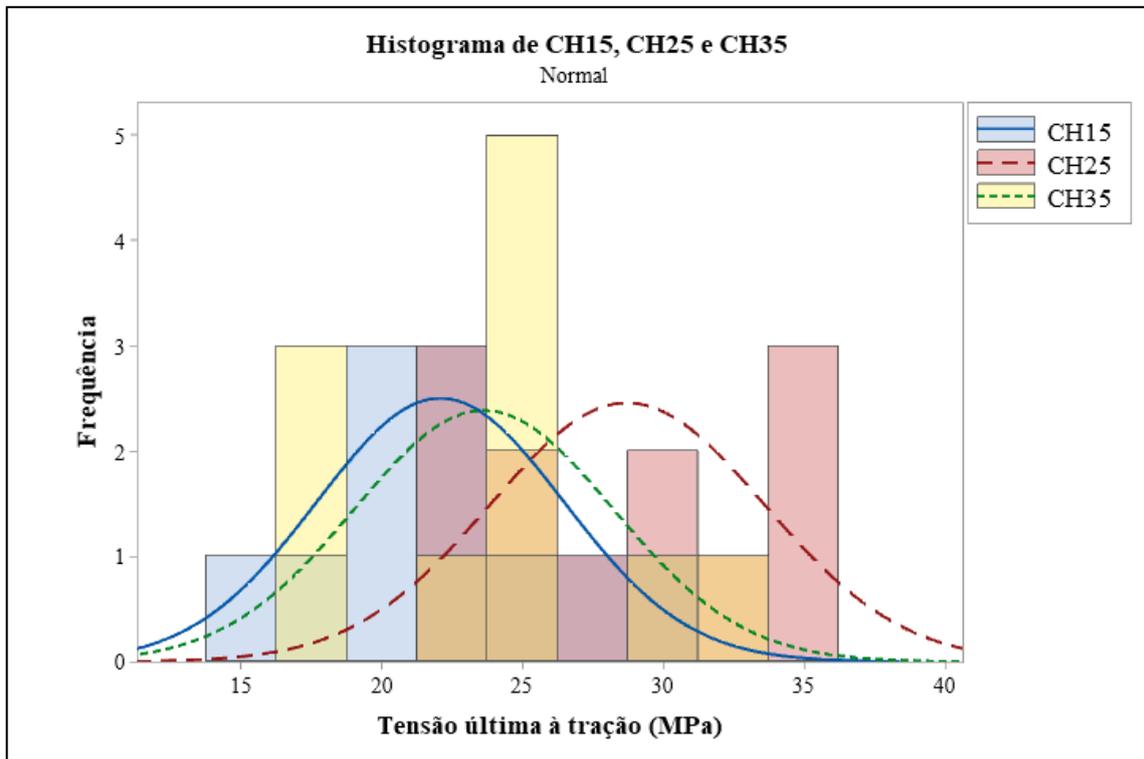
Tabela 14 – Teste de normalidade de Anderson-Darling entre amostras de uma mesma chapa

<i>Chapa CuFRP</i>	<i>Espaço Amostral</i>	<i>Gramatura (g/m²)</i>	<i>Proporção de fibras (%)</i>		<i>Tensão última à tração (MPa)</i>		<i>Módulo de Elasticidade (GPa)</i>	
			(valor -P)	Hip. Nula	(valor -P)	Hip. Nula	(valor -P)	Hip. Nula
<i>CH14</i>	12	1800	0,0350	H1	0,090	H0	0,017	H1
<i>CH24</i>	8	1800	0,5180	H0	0,044	H1	0,068	H0
<i>CH15</i>	11	2250	0,2240	H0	0,582	H0	<0,005	H1
<i>CH25</i>	12	2250	0,1310	H0	0,485	H0	0,847	H0
<i>CH35</i>	11	2250	0,3510	H0	0,125	H0	0,542	H0
<i>CH16</i>	10	2700	0,0200	H1	0,204	H0	0,648	H0
<i>CH26</i>	12	2700	0,0500	H0	0,609	H0	0,359	H0

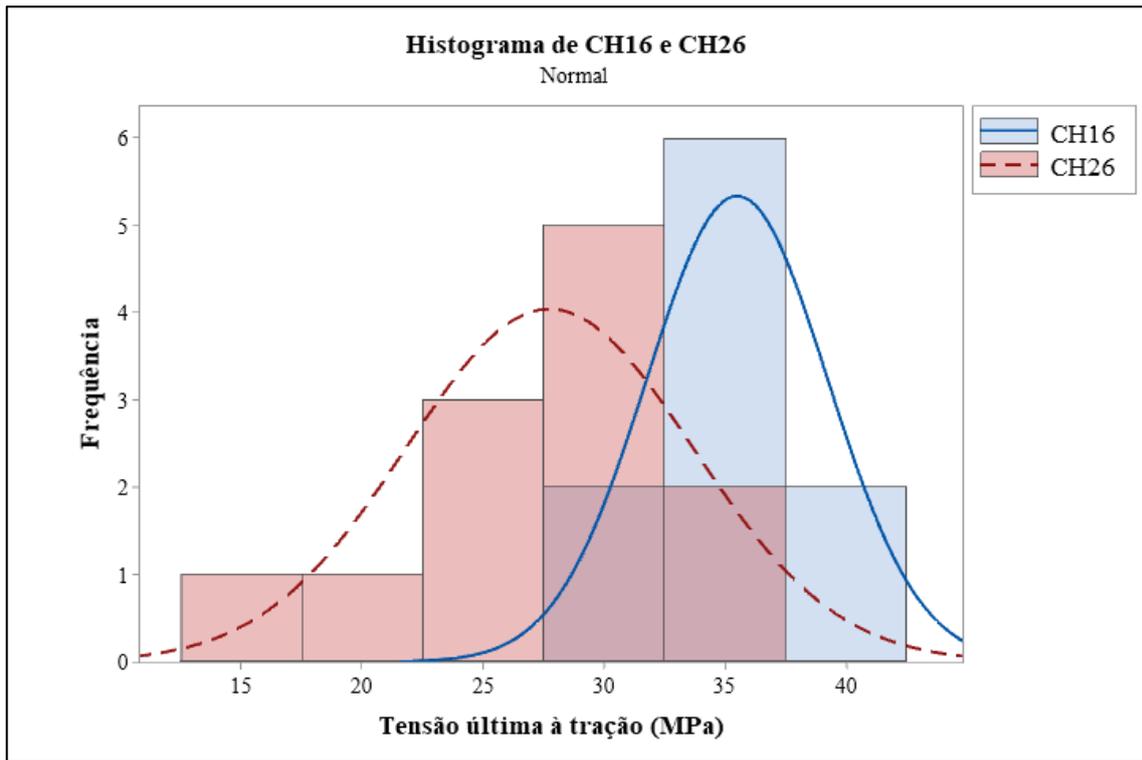
Fonte: Autor (2023)



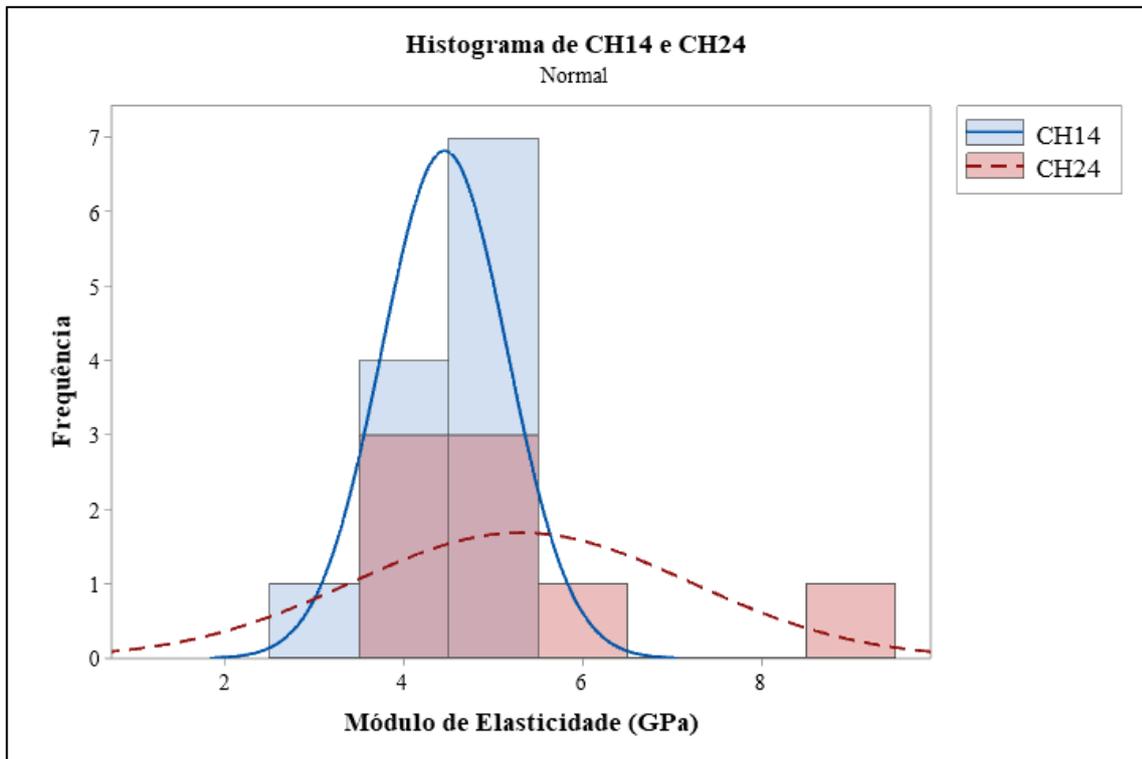
(a)



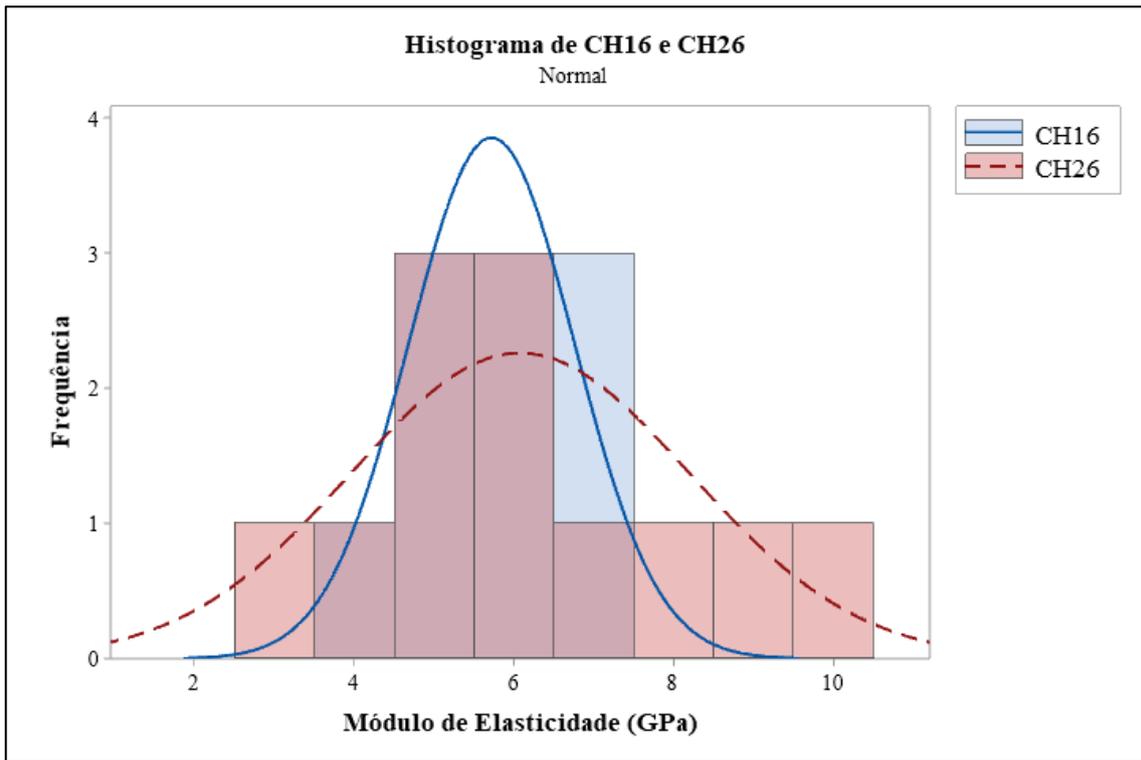
(b)



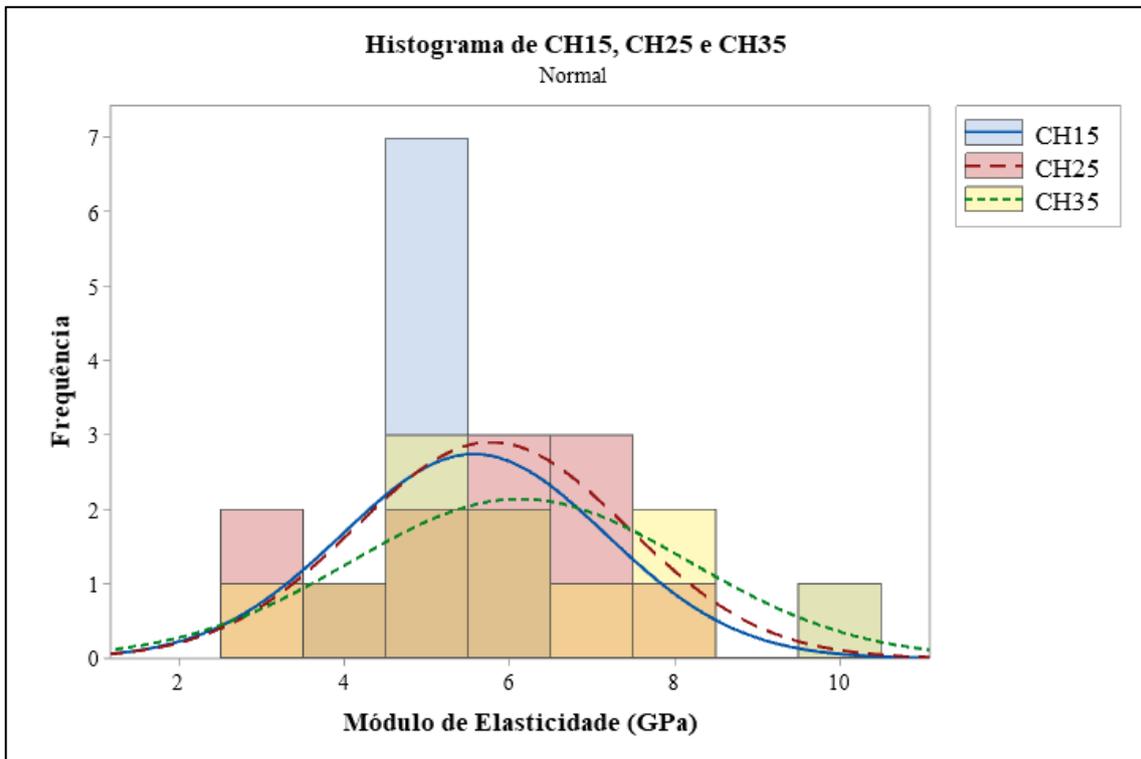
(c)



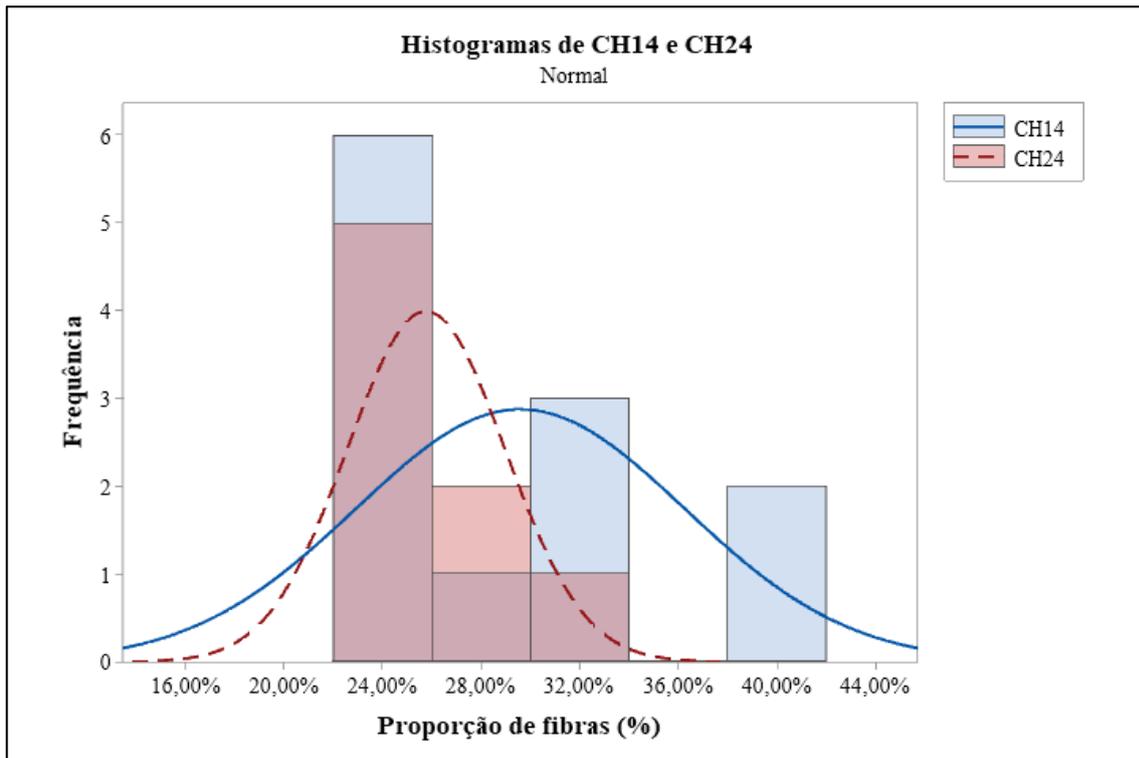
(d)



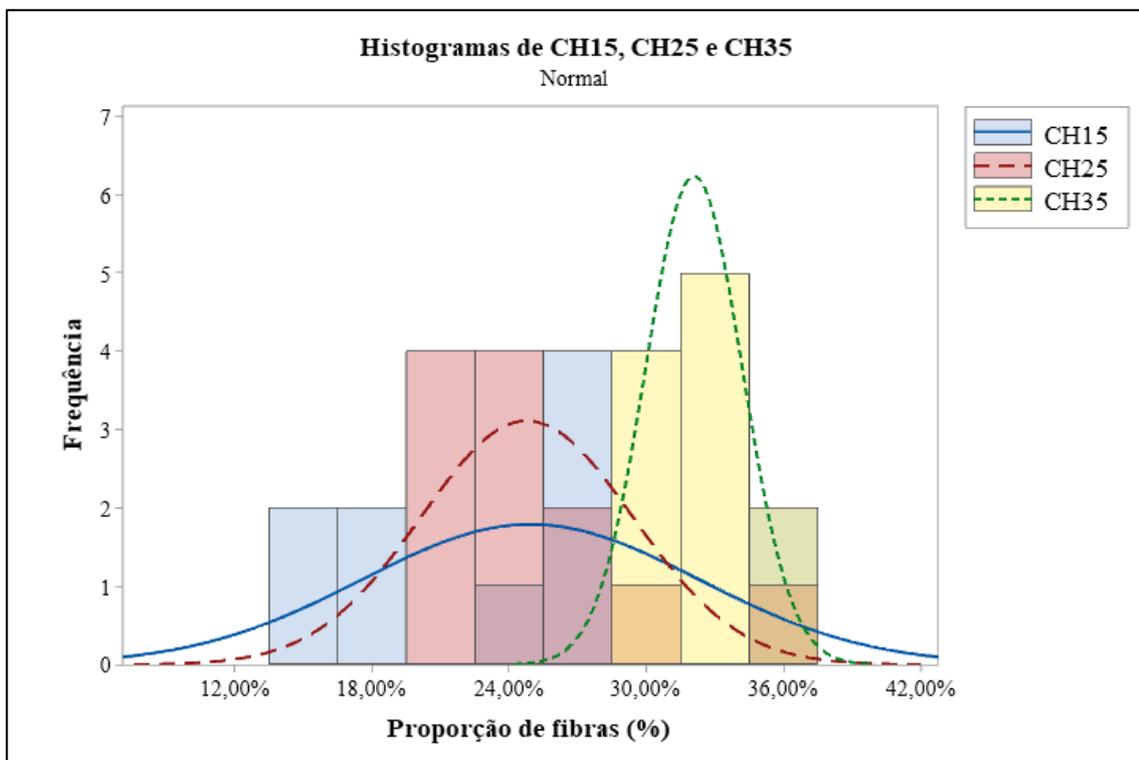
(e)



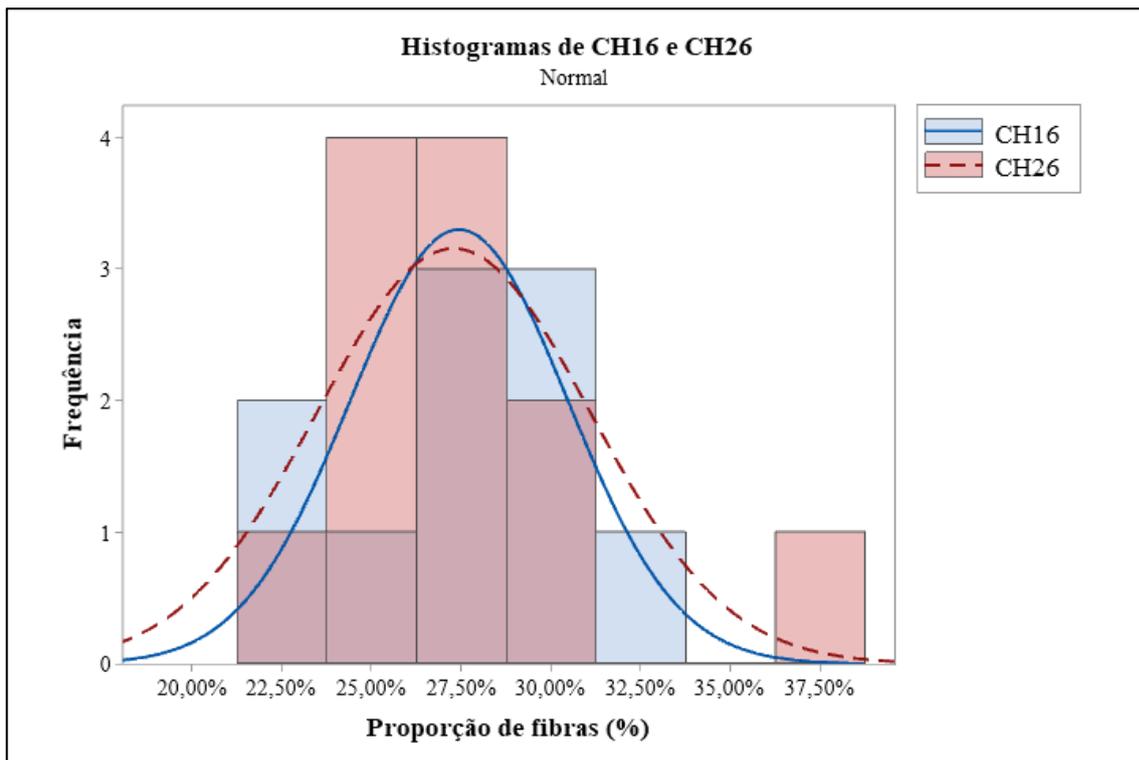
(f)



(g)



(h)



(i)

Figura 34 – Histogramas de distribuição normal das propriedades de tensão última à tração (a), (b) e (c); módulo de elasticidade (d), (e) e (f); proporção de fibras (g), (h) e (i). Fonte: Autor (2023)

De acordo com os dados da Tabela 14 e histogramas da Figura 34, a partir do teste de normalidade demonstra-se que se o valor de $-P$ for maior do que 0,05 tem-se uma distribuição normal dos dados, ou seja, a maior parte dos dados está dentro do intervalo de 95% de confiança. Neste caso aceita hipótese nula (H_0), caso contrário não se tem uma distribuição normal, ou seja, rejeita a hipótese nula (H_1). Neste caso o pico da curva apresenta-se deslocado ou para a direita ou para a esquerda. Dessa forma, interpreta-se que para as propriedades de tensão última à tração não há hipótese nula para as chapas CH14 e CH15; para o módulo de elasticidade não há hipótese nula para a chapa CH14 e para a proporção de fibras não há hipótese nula para as chapas CH14 e CH15.

Diante das análises e dos resultados dos ensaios que foram realizados, as amostras de uma mesma chapa não apresentaram homogeneidade satisfatória ao longo de sua extensão. Isso pode ser afirmado para todas as propriedades que foram estudadas, isto é, tensão última à tração, módulo de elasticidade e proporção de fibras. Isso significa que a distribuição das fibras ao longo da chapa e o processo de infusão não foram realizados de maneira que a chapa possibilitasse características homogêneas ao longo de sua extensão. Essa percepção foi predominante

na propriedade do módulo de elasticidade, principalmente na ótica das medidas do coeficiente de variação, no qual vários dados foram classificados como “muito alto”.

4.2.2. *Entre amostras de chapas de mesma gramatura nominal*

Na Figura 35 são apresentados os gráficos dos valores médios dos resultados das propriedades das chapas por gramatura nominal: a) tensão última à tração; b) módulo de elasticidade e; c) proporção de fibras, com as respectivas barras de erros.

Para as propriedades de tensão última à tração, módulo de elasticidade e proporção de fibras, nessa ordem, os *maiores* erros padrões encontrados foram para as chapas CH-GN3 (chapas do grupo nominal formado por CH16 e CH26), com valor de 1,32, CH-GN3 (chapas do grupo nominal formado por CH16 e CH26), com valor de 0,35, e CH-GN1 (chapas do grupo nominal formado por CH14 e CH24), com valor de 1,25, das respectivas propriedades. Os *menores* erros padrões encontrados, ainda seguindo na mesma ordem das propriedades citadas, foram para as chapas CH-GN2 (chapas do grupo nominal formado por CH15, CH25 e CH35), com valor de 0,90, CH-GN1 (chapas do grupo nominal formado por CH14 e CH24), com valor de 0,29, e CH-GN3 (chapas do grupo nominal formado por CH16 e CH26), com valor de 0,71, das respectivas propriedades.

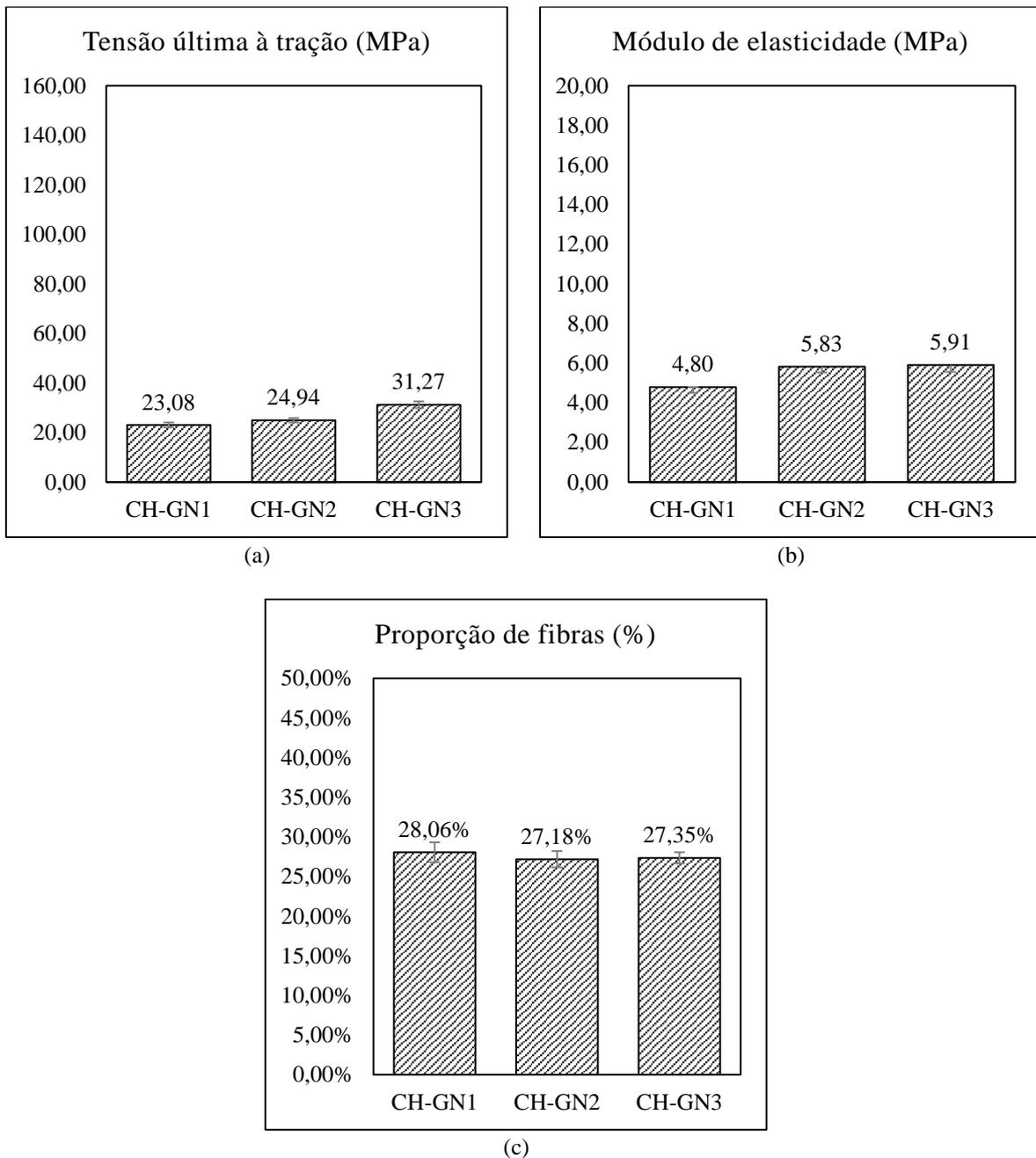


Figura 35 – Valores médios das propriedades das chapas separadas por gramatura nominal. a) tensão última à tração; b) módulo de elasticidade e; c) proporção de fibras.

Na Tabela 15 são apresentadas as chapas CuFRP separadas por grupo nominal, ou seja, de mesma gramatura nominal. Dessa forma, tem-se: a) grupo nominal; b) espaço amostral; c) gramatura nominal (g/m^2); d) espessura média (mm); e) proporção de fibras (%); f) tensão última à tração (MPa); g) módulo de elasticidade (GPa) e; h) coeficientes de variação CoV (%) de cada propriedade. Esta última foi recalculada conforme a separação por grupo nominal. Os demais valores médios das propriedades apresentadas na Tabela 15 também foram recalculados

e apresentaram-se muito próximos dos valores médios dos resultados da Tabela 11, caso já fizéssemos a separação por grupo nominal diretamente nessa tabela e calculássemos a média. Para esses valores as discrepâncias mínimas ocorreram devido aos arredondamentos de cálculo para a obtenção dos valores.

Tabela 15 - Espessura, proporção de fibras, tensão última à tração, módulo de elasticidade e coeficientes de variação para chapas de mesma gramatura nominal.

Chapas CuFRP	Espaço Amostral	Gramatura (g/m ²)	Espessura		Proporção de fibras		Tensão última à tração		Módulo de Elasticidade	
			Média (mm)	CoV (%)	Média (%)	CoV (%)	Média (MPa)	CoV (%)	Média (GPa)	CoV (%)
CH-GN1	20	1800	6,07	14,04	28,06	19,99	23,08	19,07	4,80	27,14
CH-GN2	34	2250	7,40	22,63	27,18	21,93	24,94	21,15	5,83	29,31
CH-GN3	22	2700	8,19	10,22	27,35	12,10	31,27	19,76	5,91	27,86

Fonte: Autor (2023)

De acordo com os dados contidos na Tabela 15, os valores médios das propriedades das chapas CuFRP foram recalculados, conforme a separação por grupos nominais, portanto, considerou-se novos CoV. Assim sendo, os valores para as chapas de CuLFRP mantiveram-se os mesmos, pois não foram fabricadas mais de uma chapa de mesma característica, ou seja, elas foram avaliadas somente no nível “entre amostras de uma mesma chapa”.

Com posse dos coeficientes de variação das propriedades analisadas por grupo nominal, elabora-se a Tabela 16. Nessa tabela é ilustrado a classificação das propriedades com base no CoV (%). Dessa maneira, conforme a abordagem do tópico anterior, os mesmos critérios de classificação foram adotados. Para este caso, os critérios foram decorridos entre amostras de chapas de mesma gramatura nominal, conforme as propriedades analisadas.

Tabela 16 - classificação dos coeficientes de variação entre amostras de chapas de mesma gramatura nominal

Chapa CuFRP	Espessura (mm)	Proporção de fibras (%)	Tensão última à tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
CH-GN1	médio	médio	médio	alto
CH-GN2	alto	alto	alto	alto
CH-GN3	médio	médio	médio	alto

Fonte: Autor (2023)

De posse dos dados da tabela acima, tem-se para a espessura: CH-GN1 e CH-GN3 classificados como média e CH-GN2 classificado como alta; para proporção de fibras, tem-se: CH-GN1 e CH-GN3 classificados como média e CH-GN2 classificado como alta; para a tensão

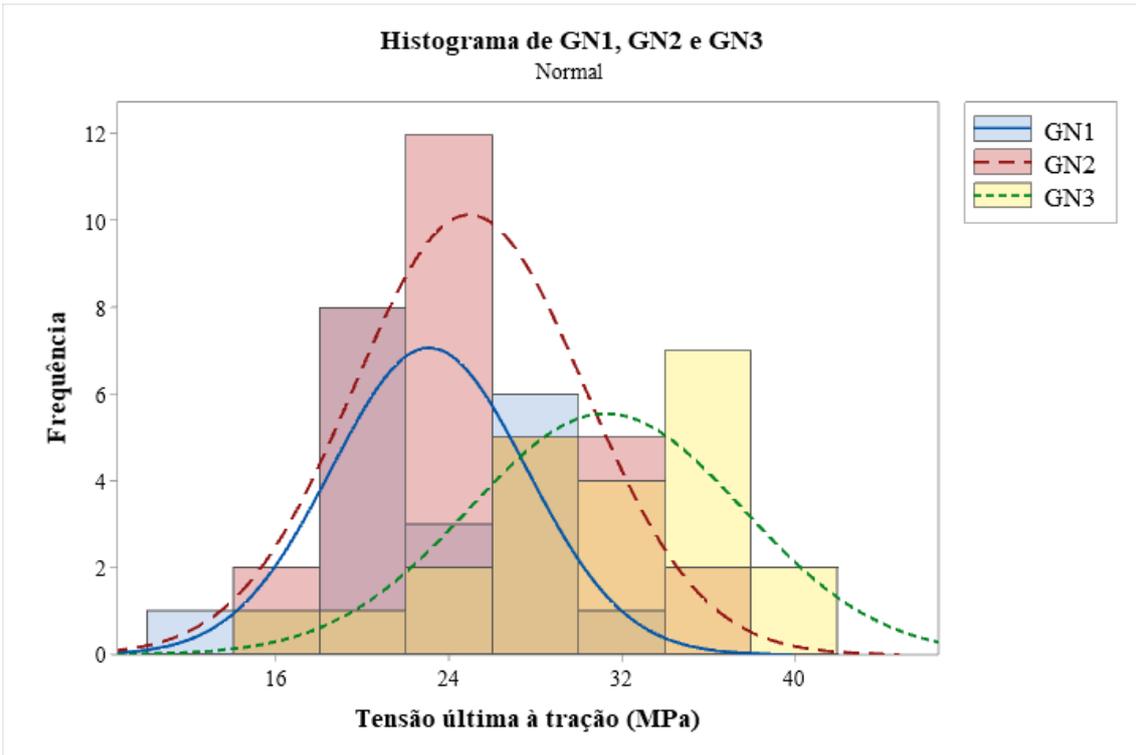
última à tração, tem-se: CH-GN1 e CH-GN3 classificados como média e CH-GN2 classificado como alto; para o módulo de elasticidade todos os grupos foram classificados como alta. No total, levando em consideração todas as propriedades analisadas, obteve-se 6 classificações média e 6 classificações alta. Não se obteve nenhuma classificação baixa ou muito alta. De modo geral, constata-se um aumento da variabilidade dos dados com relação à média dentro dos grupos nominais. Isso significa afirmar que os laminados possuem diferenças entre as médias dentro de um mesmo grupo nominal, o que pode ser demonstrado Por meio de outros métodos estatísticos.

A variabilidade dos resultados para amostras de chapas de mesma gramatura nominal foi demonstrada por meio dos testes de normalidade de Anderson-Darling. Dessa maneira, elaborou-se a Tabela 17 e os histogramas de distribuição de frequência com as respectivas curvas de distribuição normal representados de acordo com os parâmetros de proporção de fibras (%), tensão última à tração (MPa) e módulo de elasticidade (GPa). Os histogramas da Figura 36 foram agrupados com chapas de diferentes grupos nominais para facilitar as observações e comparações entre as propriedades das chapas.

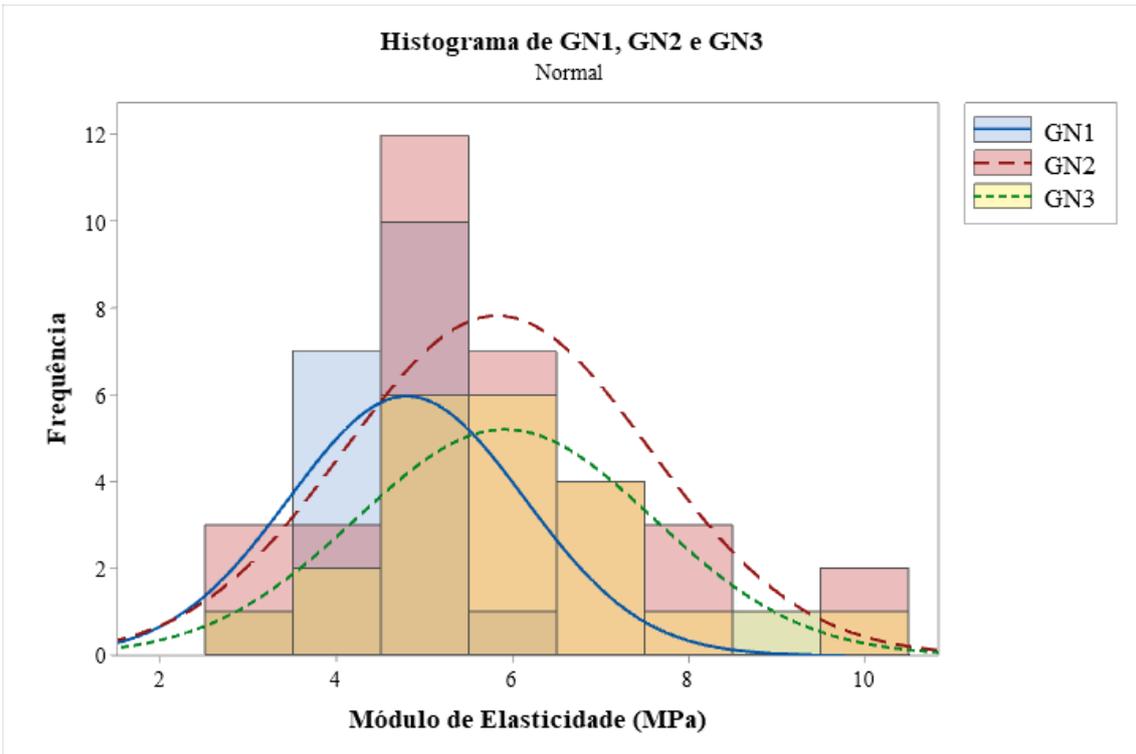
Tabela 17 - Teste de normalidade de Anderson-Darling para amostras de chapas de mesma gramatura nominal

Chapa CuFRP	Espaço Amostral	Gramatura (g/m ²)	Proporção de fibras (%)		Tensão última à tração (MPa)		Módulo de Elasticidade (GPa)	
			(valor -P)	Hip. Nula	(valor -P)	Hip. Nula	(valor - P)	Hip. Nula
CH-GN1	20	1800	<0,005	H1	0,399	H0	<0,005	H1
CH-GN2	34	2250	0,4270	H0	0,330	H0	0,043	H1
CH-GN3	22	2700	0,0280	H1	0,451	H0	0,191	H0

Fonte: Autor (2023)



(a)



(b)

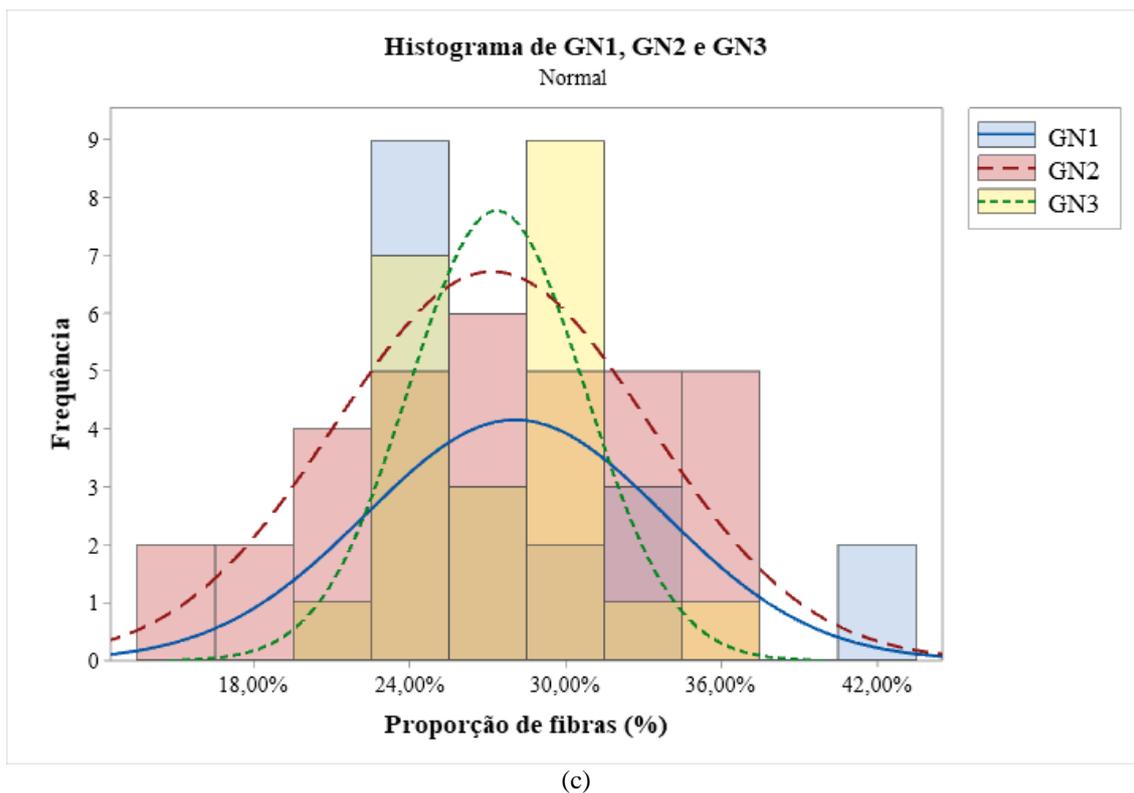


Figura 36 - histogramas de distribuição normal das propriedades de tensão última à tração (a); módulo de elasticidade (b) e proporção de fibras (c). Fonte: Autor (2023)

De acordo com os dados da Tabela 17 e histogramas da Figura 36, a partir do teste de normalidade demonstra-se que se o valor de $-P$ for maior do que 0,05 tem-se uma distribuição normal dos dados, ou seja, a maior parte dos dados está dentro do intervalo de 95% de confiança. Neste caso aceita hipótese nula (H_0), caso contrário não se tem uma distribuição normal, ou seja, rejeita a hipótese nula (H_1). Dessa forma, pressupõe-se que para a propriedade de tensão última à tração para CH-GN1, CH-GN2 e CH-GN3 há hipótese nula, ou seja, dentro desses grupos nominais a maioria dos dados se concentra-se em torno da média; para o módulo de elasticidade há hipótese nula para CH-GN3 e para a proporção de fibras há hipótese nula para CH-GN2.

Ainda para fins de observação das variações dos dados, das quais foram avaliadas em três níveis distintos, realizou-se uma análise de variância (ANOVA) de fator único entre as amostras de chapas de mesma gramatura nominal, isto é, nos dados dos três grupos nominais estudados (CH-GN1, CH-GN2 e CH-GN3). A Tabela 18 apresenta o resultado dos testes realizados entre os grupos, separados por propriedade, com os respectivos níveis de significância, denominados de “ H_0 ” e “ H_1 ”. Esse significa que não há diferenças estatisticamente significantes entre as médias dos grupos e este significa que há diferenças

significativas entre as médias dos grupos. Esses parâmetros podem ser estabelecidos de acordo com o “F” calculado, “valor-P” e “F-crítico”. Para a interpretação dos níveis de significância, atribui-se que se o valor de “F” calculado for maior do que o “F-crítico”, então há diferenças significativas entre as médias (H1), caso contrário, não há diferenças significativas entre as médias (H0). Para o “valor-P” atribuiu-se um intervalo de confiança de 95% como critério para a determinação das diferenças estatisticamente significativas, ou seja, entende-se que o “valor-P” deve ser igual ou inferior a 5% para a média das amostras enquadrarem-se com sendo estatisticamente significativas.

Tabela 18 - ANOVA realizada para os grupos nominais CH-GN1, CH-GN2 e CH-GN3

Chapa CuFRP	ANOVA	Proporção de fibra (%)		Tensão última à tração (MPa)		Módulo de Elasticidade (GPa)	
		Entre grupos	Nível de significância	Entre grupos	Nível de significância	Entre grupos	Nível de significância
CH-GN1	F	2,252	H0	0,270	H0	2,078	H0
	valor-P	0,151		0,610		0,167	
	F-crítico	4,414		4,414		4,414	
CH-GN2	F	7,314	H1	6,523	H1	0,278	H0
	valor-P	0,003		0,004		0,760	
	F-crítico	3,305		3,305		3,305	
CH-GN3	F	0,010	H0	12,809	H1	0,236	H0
	valor-P	0,920		0,002		0,633	
	F-crítico	4,351		4,351		4,351	

Fonte: Autor (2023)

Para o grupo nominal CH-GN1 observou-se nível de significância “H0” em todas as propriedades, isso significa que para esse grupo nominal, todos os valores das médias para cada uma das propriedades são iguais; para o grupo nominal CH-GN2 observou-se níveis de significância “H1” para as propriedades de proporção de fibras (%) e tensão última à tração (MPa) e “H0” para o módulo de elasticidade. Isso significa que para grupo nominal CH-GN2, as duas primeiras propriedades de níveis de significância “H1” possuem diferença significativa entre as médias dos resultados das chapas, por outro lado, a propriedade de nível de significância “H0”, desse grupo nominal, não existe diferença significativa entre as médias dos resultados das chapas; para o grupo nominal CH-GN3 observou-se níveis de significância “H1” para a propriedade de tensão última à tração e “H0” para as propriedades de proporção de fibras (%) o módulo de elasticidade (GPa). Ainda de posse dessas observações, constata-se que os valores dos resultados do módulo de elasticidade apresentaram uma homogeneidade satisfatória

quanto aos três grupos nominais, ou seja, demonstraram níveis de significância “H0” para essa propriedade.

Com base no teste de comparação de médias de Turkey, pode-se identificar as médias dos resultados das chapas que não são iguais. Isso pode ser demonstrado para cada propriedade analisada do grupo nominal CH-GN2, cujo este seria o único grupo nominal que inclui mais de duas chapas, conforme demonstrado na Tabela 19.

Tabela 19 - Testes Simultâneos de Tukey para as diferenças de médias do grupo nominal CH-GN2

<i>Diferença de Níveis</i>	<i>Proporção de fibra (%)</i>		<i>Tensão última à tração (MPa)</i>		<i>Módulo de Elasticidade (GPa)</i>	
	Valor-P Ajustado	Nível de significância	Valor-P Ajustado	Nível de significância	Valor-P Ajustado	Nível de significância
<i>CH25 - CH15</i>	0,997	H0	0,005	H1	0,957	H0
<i>CH35 - CH15</i>	0,008	H1	0,718	H0	0,744	H0
<i>CH35 - CH25</i>	0,005	H1	0,034	H1	0,886	H0

Fonte: Autor (2023)

De acordo com os dados da Tabela 19, das chapas pertencentes ao grupo nominal CH-GN2, pode-se comprovar quais as médias dos resultados das chapas que não são iguais entre si para cada propriedade analisada. Desse modo, observa-se que para a propriedade de tensão última à tração, há diferença significativa entre o resultado das médias das chapas CH25 e CH15. Isso implica dizer que esse grupo nominal apresenta nível de significância “H1” para essa propriedade. Por sua vez, a média das chapas CH35 e CH15 apresenta níveis de significância “H1” para a propriedade de proporção de fibras (%); e a média das chapas CH35 e CH25 apresenta níveis de significância “H1” para as propriedades de proporção de fibras (%) e tensão última à tração.

Com base na análise realizada entre as amostras de chapas de gramaturas nominais diferentes, demonstra-se que não houve homogeneidade satisfatória para as análises de coeficiente de variação e distribuição normal dos dados. Isso pode ser observado para todas as propriedades analisadas, o que significa que a distribuição das fibras e o processo de infusão não foram realizados de maneira que a chapa possibilitasse características homogêneas entre as diferentes chapas de um mesmo grupo nominal. Por outro lado, através da análise de variância (ANOVA), nota-se que houve homogeneidade satisfatória para a propriedade do módulo de elasticidade em todos os grupos nominais. Isso significa que todas as médias dos resultados para essa propriedade são iguais, ou seja, a distribuição das fibras e o processo de infusão

possibilitaram características homogêneas entre as diferentes chapas de um mesmo grupo nominal.

Diante dessa percepção e das análises dos métodos estatísticos realizado em amostras constituintes de uma mesma chapa, para avaliar a qualidade do compósito ao longo de sua extensão, conforme apresentado no tópico anterior, observa-se uma redução do coeficiente de variação diante de um espaço amostral maior. Além disso, conforme a distribuição normal dos dados, tem-se uma hipótese nula (H_0) em todos os grupos nominais para a propriedade de tensão última à tração. Como essa propriedade é a mais importante, considerou-se até esse ponto uma homogeneidade satisfatória. Por outro lado, observou-se diferenças significativas entre a média das amostras das chapas CuFRP do grupo nominal CH-GN2 (CH15-CH25-CH35) e CH-GN3 (CH16-CH26) para essa mesma propriedade ao realizar a análise de variância (ANOVA) com testes de simultaneidade de Turkey. Isso afirma que não houve qualidade satisfatória das infusões de resina à vácuo e distribuição das fibras para a composição das mantas de fibras curtas de curauá entre as chapas de mesma gramatura nominal. Por outro lado, sabendo que houve homogeneidade satisfatória para a distribuição normal dos dados entre as chapas de mesma gramatura nominal, analisou-se a diferença entre as médias das amostras de chapas de gramaturas nominais diferentes para validar a hipótese alternativa dessa propriedade, conforme o próximo tópico.

4.2.3. Entre amostras de chapas de gramaturas nominais diferentes

Para as propriedades de tensão última à tração, módulo de elasticidade e proporção de fibras os erros padrões encontrados foram de 0,72, 0,19 e 0,60, respectivamente. Na Tabela 20 são apresentadas todas as chapas CuFRP. Nessa tabela tem-se: a) espaço amostral; b) espessura média (mm); c) proporção de fibras (%); d) tensão última à tração (MPa); e) módulo de elasticidade (GPa) e; f) coeficientes de variação CoV (%) de cada propriedade. Esta última foi recalculada levando em consideração as chapas CuFRP. Os demais valores médios das propriedades apresentadas na Tabela 20 também foram recalculados e apresentaram-se muito próximos dos valores médios dos resultados da Tabela 15, caso já fizéssemos a separação por grupo nominal diretamente nessa tabela e calculássemos a média. Para esses valores as discrepâncias mínimas ocorreram devido aos arredondamentos de cálculo para a obtenção dos valores.

Tabela 20 - Espessura, proporção de fibras, tensão última à tração, módulo de elasticidade e coeficientes de variação para chapas de mesma gramatura nominal.

<i>Chapa CuFRP</i>	<i>Espaço Amostral</i>	<i>Espessura</i>		<i>Proporção de fibras</i>		<i>Tensão última à tração</i>		<i>Módulo de Elasticidade</i>	
		<i>Média (mm)</i>	<i>CoV (%)</i>	<i>Média (%)</i>	<i>CoV (%)</i>	<i>Média (MPa)</i>	<i>CoV (%)</i>	<i>Média (GPa)</i>	<i>CoV (%)</i>
<i>Com TODAS as chapas</i>	76	7,28	20,76	27,46	19,09	26,28	23,85	5,58	29,75

Fonte: Autor (2023)

De acordo com os dados contidos na Tabela 20, os valores médios das propriedades das chapas CuFRP foram recalculados, conforme ao aumento do espaço amostral, portanto, considerou-se novos coeficientes de variação. Assim, para esses novos valores obteve-se: 20,76 % para a espessura; 19,09 % para a proporção de fibras; 23,85 % para a tensão última à tração; 29,75 % para o módulo de elasticidade.

Com posse dos coeficientes de variação, contemplando todas as chapas CuFRP, elaborase a Tabela 16. Nessa tabela é ilustrado a classificação das propriedades com base no CoV (%). Dessa maneira, seguindo as abordagens anteriores, os mesmos critérios de classificação foram adotados, porém, para este caso, os critérios decorreram-se para todas as chapas CuFRP.

Tabela 21 - classificação considerando todas as chapas

<i>Chapa CuFRP</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Proporção de fibras (%)</i>	<i>Tensão última à tração (MPa)</i>	<i>Módulo de Elasticidade (GPa)</i>
<i>Com TODAS as chapas</i>	alto	médio	alto	alto

Fonte: Autor (2023)

De posse dos dados da tabela acima, tem-se para a espessura uma classificação alta; para proporção de fibras uma classificação média; para a tensão última à tração uma classificação alta e; para o módulo de elasticidade uma classificação alta. No total, levando em consideração todas as propriedades analisadas, obteve-se uma classificação média e três classificações alta. Não se obteve nenhuma classificação baixa ou muito alta. De modo geral, constata-se uma variabilidade dos dados com relação à média, considerando todas as chapas CuFRP. Isso significa afirmar que os laminados diferem um dos outros, ou seja, existe variações entre o conjunto de dados para cada propriedade. A grosso modo, afirma-se que a média do resultado de cada propriedade, de todas as chapas, são diferentes entre si. Isso pode ser demonstrado Por meio de outros métodos estatísticos.

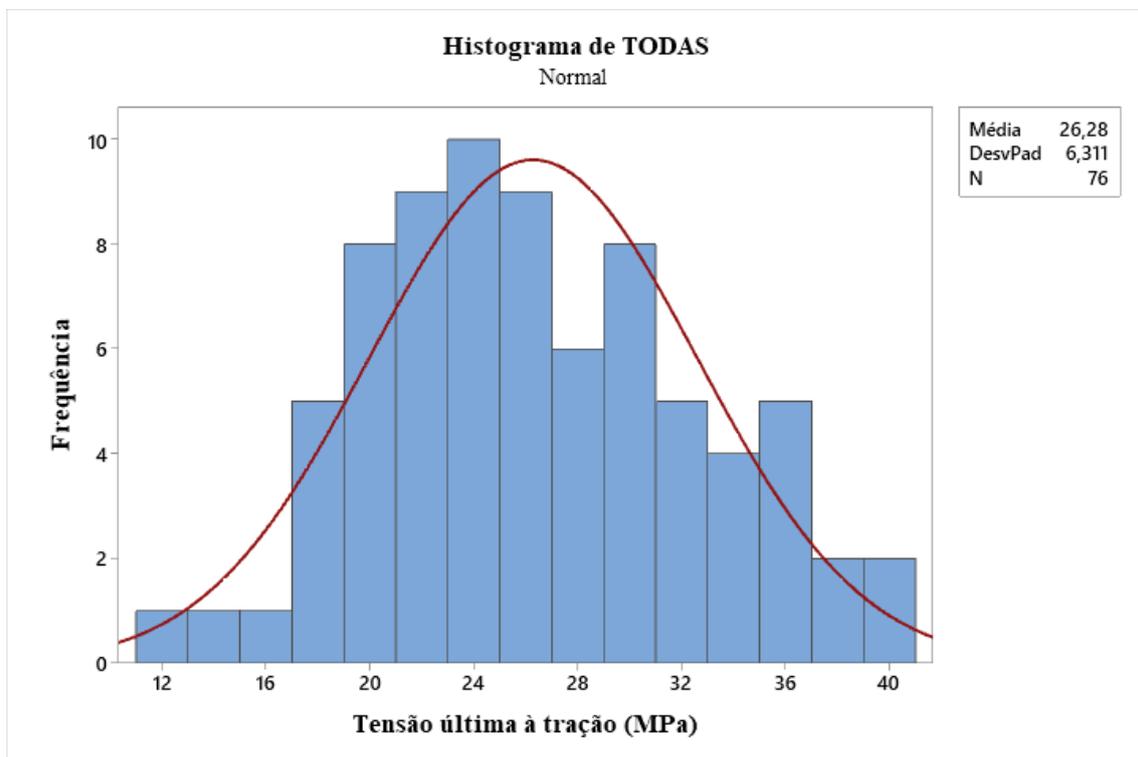
A variabilidade dos resultados entre amostras de chapas de gramaturas nominais diferentes foi demonstrada por meio dos testes de normalidade de Kolmogorov-Smirnov. Dessa maneira, elaborou-se a Tabela 22 e os histogramas de distribuição de frequência com as

respectivas curvas de distribuição normal dos resultados das propriedades de tensão última à tração (MPa), módulo de elasticidade (GPa) e proporção de fibras (%), conforme pode ser visualizado na Figura 37.

Tabela 22 - Teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov entre amostras de chapas de mesma gramatura nominal

Chapa CuFRP	Espaço Amostral	Proporção de fibras (%)		Tensão última à tração (MPa)		Módulo de Elasticidade (GPa)	
		(valor -P)	Hipótese Nula	(valor -P)	Hipótese Nula	(valor -P)	Hipótese Nula
Com TODAS as chapas	76	>0,15	H0	0,317	H0	<0,005	H1

Fonte: Autor (2023)



(a)

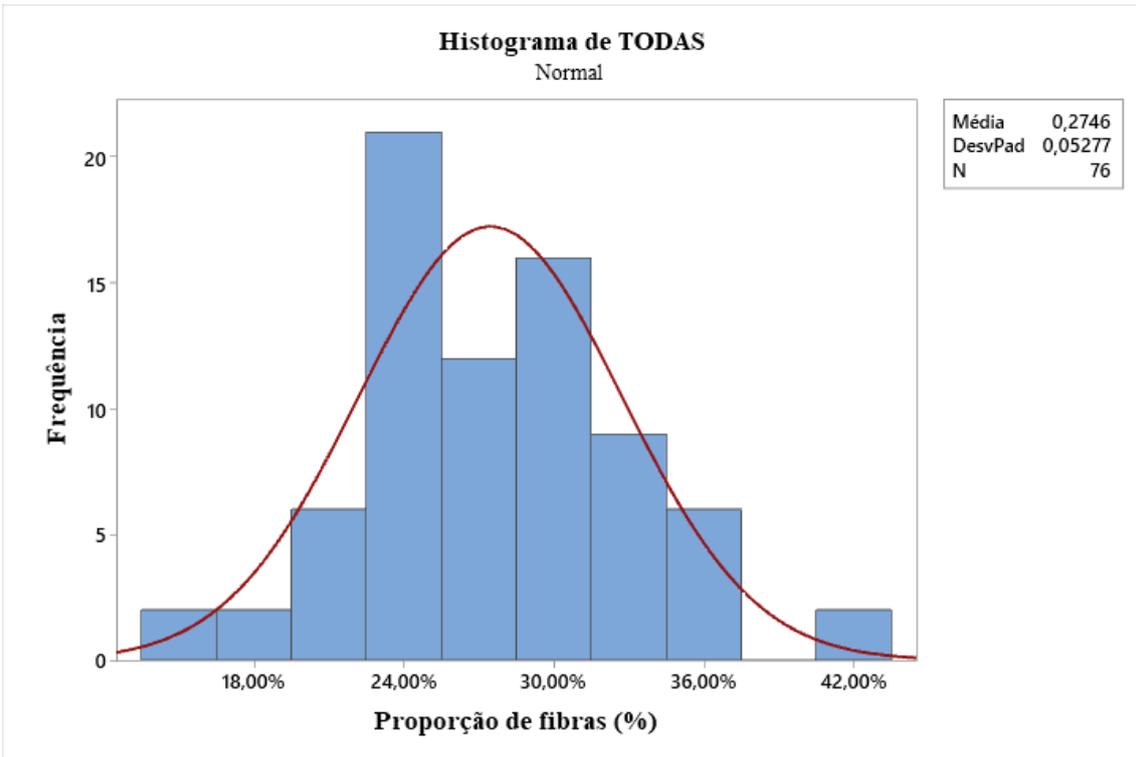
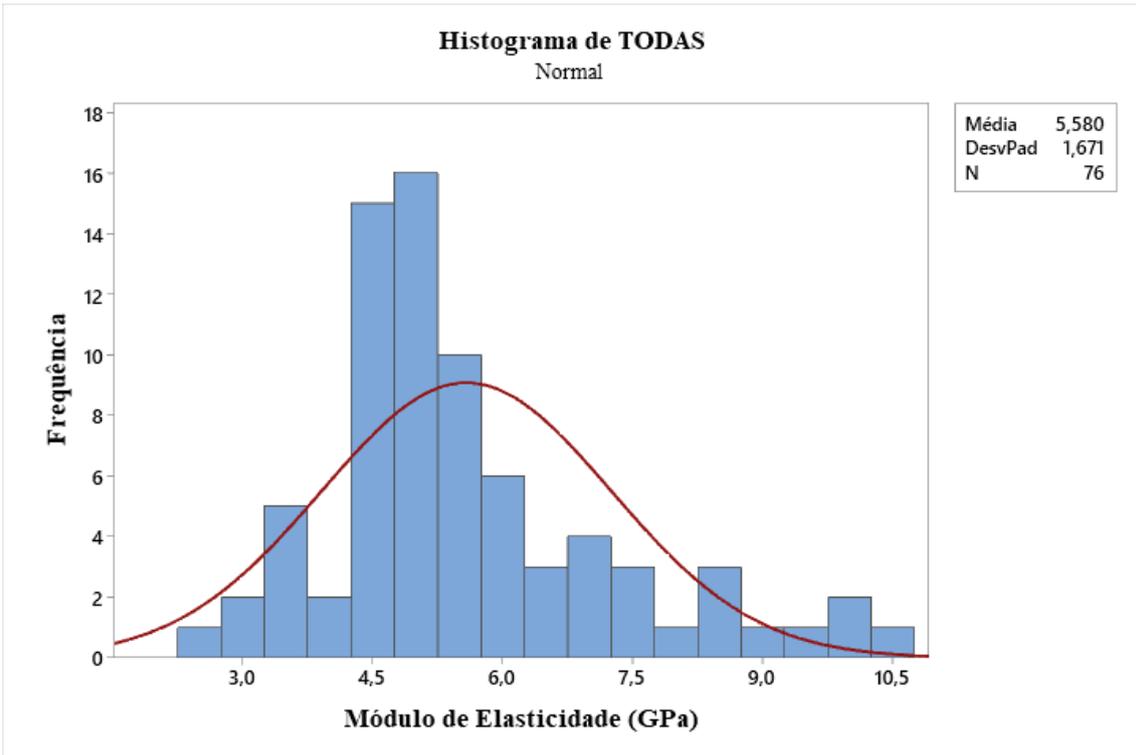


Figura 37 - histogramas de distribuição normal das propriedades de tensão última à tração (a); módulo de elasticidade (b) e proporção de fibras (c). Fonte: Autor (2023).

De acordo com os dados da Tabela 22 e histogramas da Figura 37, a partir do teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov, afirma-se que há hipótese nula (H0) para as propriedades de proporção de fibras e tensão última à tração, ou seja, os resultados dessas propriedades estão distribuídos em torno do valor central; e não há hipótese nula para o módulo de elasticidade, ou seja, os valores estão dispersos do valor central para essa propriedade.

Ainda para fins de observação das variações dos dados neste nível, realizou-se uma análise de variância (ANOVA) de fator único com base nos resultados dos ensaios de tração das chapas CuFRP. Assim como apresentado da descrição nos níveis anteriores, as tabelas foram separadas por propriedades de tensão última à tração, módulo de elasticidade e proporção de fibras. A Tabela 20 apresenta o resultado dos testes realizados, separados por propriedade, com os respectivos níveis de significância, denominados de “H0” e “H1”. Esse significa que não há diferenças estatisticamente significantes entre as médias dos resultados de cada chapa e este significa que há diferenças significativas entre as médias dos resultados de cada chapa. Esses parâmetros podem ser estabelecidos de acordo com o “F” calculado, “valor-P” e “F-crítico”. Para a interpretação dos níveis de significância, atribui-se os mesmos critérios de análise do tópico anterior para os valores de “F” calculado, “F-crítico e “valor-P”.

Tabela 23 - ANOVA realizada entre amostras de chapas de gramaturas nominais diferentes

Chapa CuFRP	ANOVA	Proporção de fibra (%)		Tensão última à tração (MPa)		Módulo de Elasticidade (GPa)	
		Entre grupos	Nível de significância	Entre grupos	Nível de significância	Entre grupos	Nível de significância
Com TODAS as chapas	F	3,32	H1	10,52	H1	1,40	H0
	valor-P	0,01		0,00		0,23	
	F-crítico	2,23		2,23		2,23	

Fonte: Autor (2023)

Para a propriedade de tensão última à tração e proporção de fibras observou-se níveis de significância “H1”. Isso significa que para essas propriedades, nem todas as médias dos resultados das chapas são iguais. Para a propriedade do módulo de elasticidade observou-se nível de significância “H0”, ou seja, essa propriedade não apresenta diferenças significativas entre as médias dos resultados das chapas. Com isso, pode-se afirmar que os valores dos resultados do módulo de elasticidade apresentaram uma homogeneidade satisfatória entre as chapas, mesmo comparando o resultado das médias entre chapas de gramaturas diferentes, ou seja, demonstraram níveis de significância “H0” para essa propriedade em âmbito global.

Com base no teste de comparação de médias de Turkey, pode-se identificar as médias dos resultados das chapas que são diferentes entre si, assim como as que são iguais, independentemente da comparação da média do resultado das chapas, ou seja, as comparações foram realizadas entre chapas de mesma gramatura nominal e entre chapas de gramaturas nominais diferentes. Isso pode ser demonstrado para cada propriedade analisada, independentemente do grupo nominal na qual a chapa se encontra. Os testes simultâneos de Tukey para as diferenças de médias pode ser visualizado na Tabela 24. Para este caso o teste Turkey apresenta de confiança de 99,67%, como pode ser demonstrado abaixo.

Tabela 24 – Testes Simultâneos de Tukey entre as médias das chapas CuFRP

<i>Diferença de Níveis</i>	<i>Proporção de fibra (%)</i>		<i>Tensão última à tração (MPa)</i>		<i>Módulo de Elasticidade (GPa)</i>	
	<i>Valor-P Ajustado</i>	<i>Nível de significância</i>	<i>Valor-P Ajustado</i>	<i>Nível de significância</i>	<i>Valor-P Ajustado</i>	<i>Nível de significância</i>
<i>CH24 - CH14</i>	0,602	H0	0,999	H0	0,914	H0
<i>CH15 - CH14</i>	0,259	H0	0,991	H0	0,668	H0
<i>CH25 - CH14</i>	0,2	H0	0,117	H0	0,442	H0
<i>CH35 - CH14</i>	0,883	H0	1	H0	0,2	H0
<i>CH16 - CH14</i>	0,943	H0	0	H1	0,558	H0
<i>CH26 - CH14</i>	0,905	H0	0,321	H0	0,21	H0
<i>CH15 - CH24</i>	1	H0	1	H0	1	H0
<i>CH25 - CH24</i>	0,999	H0	0,069	H0	0,996	H0
<i>CH35 - CH24</i>	0,091	H0	0,998	H0	0,935	H0
<i>CH16 - CH24</i>	0,991	H0	0	H1	0,998	H0
<i>CH26 - CH24</i>	0,993	H0	0,194	H0	0,948	H0
<i>CH25 - CH15</i>	1	H0	0,022	H1	1	H0
<i>CH35 - CH15</i>	0,016	H1	0,988	H0	0,985	H0
<i>CH16 - CH15</i>	0,899	H0	0	H1	1	H0
<i>CH26 - CH15</i>	0,906	H0	0,081	H0	0,99	H0
<i>CH35 - CH25</i>	0,01	H1	0,153	H0	0,999	H0
<i>CH16 - CH25</i>	0,857	H0	0,023	H1	1	H0
<i>CH26 - CH25</i>	0,863	H0	0,999	H0	0,999	H0
<i>CH16 - CH35</i>	0,316	H0	0	H1	0,997	H0
<i>CH26 - CH35</i>	0,23	H0	0,383	H0	1	H0
<i>CH26 - CH16</i>	1	H0	0,005	H1	0,999	H0

De acordo com os dados da Tabela 24, pode-se comprovar quais as médias dos resultados das chapas que não são iguais entre si para cada propriedade analisada. Desse modo, observa-se que para as propriedades de tensão última à tração e proporção de fibras, há diferenças significativas em pelo menos entre duas chapas. Isso implica afirmar que entre essas comparações apresentam-se com nível de significância “H1” para tais propriedades. Por sua

vez, o módulo de elasticidade apresenta nível de significância “H0”, ou seja, todas as médias das chapas são iguais com vista a essa propriedade.

Com o fundamento da aplicação dos métodos estatísticos utilizado nas análises das propriedades entre amostras de uma mesma chapa (nível 1) e entre chapas de mesma gramatura nominal (nível 2), os valores das propriedades das chapas, para compor o grupo nominal, foram recalculados para a elaboração da Tabela 15 (do nível 2). De acordo com isso, realizou-se testes Simultâneos de Tukey entre diferentes grupos nominais formado pelas chapas CuFRP. Dessa maneira, para validar a proposta do teste anterior, elaborou-se a Tabela 25, abaixo.

Tabela 25 - Testes Simultâneos de Tukey entre diferentes grupos nominais

<i>Diferença de Níveis</i>	<i>Proporção de fibra (%)</i>		<i>Tensão última à tração (MPa)</i>		<i>Módulo de Elasticidade (GPa)</i>	
	<i>Valor-P Ajustado</i>	<i>Nível de significância</i>	<i>Valor-P Ajustado</i>	<i>Nível de significância</i>	<i>Valor-P Ajustado</i>	<i>Nível de significância</i>
<i>CH-GN2 - CH-GN1</i>	0,830	H0	0,451	H0	0,071	H0
<i>CH-GN3 - CH-GN1</i>	0,900	H0	0,000	H1	0,074	H0
<i>CH-GN3 - CH-GN2</i>	0,990	H0	0,000	H1	0,979	H0

Fonte: Autor (2023)

De acordo com os dados da Tabela 25, pode-se comprovar quais as médias dos resultados das chapas que não são iguais entre si, para cada propriedade analisada, de cada combinação entre os grupos nominais CH-GN1, CH-GN2 e CH-GN3. Desse modo, observa-se que para a propriedade de tensão última à tração, há diferença estatisticamente significativa entre a comparação do resultado das médias entre os grupos nominais CH-GN3 e CH-GN1 e entre os grupos nominais três e dois. Isso significa que ao comparar as médias dos resultados do conjunto dos grupos nominais citados, determina-se que o método estatístico aplicado resulta em nível de significância “H1” para essa propriedade. Por sua vez, observa-se que para as propriedades de proporção de fibras e módulo de elasticidade, não há diferença estatisticamente significativa entre a comparação do resultado das médias entre a combinação de todos os grupos. Isso significa que ao comparar as médias dos resultados do conjunto dos grupos nominais citados, determina-se que o método estatístico aplicado resulta em nível de significância “H0” para essas duas propriedades.

Diante do exposto, na avaliação da qualidade dos compósitos neste nível (nível 3), realizada por meio das análises estatísticas com o resultado das propriedades da chapa CuFRP, demonstra-se que não houve homogeneidade satisfatória para as análises de coeficiente de variação, distribuição normal dos dados e análise de variância (ANOVA). Sabendo disso,

realizou-se testes simultâneos de Turkey e; com base na propriedade de tensão última à tração, cuja a análise seria a mais importante, conclui-se que neste nível a qualidade de produção dos compósitos não foi satisfatória, ou seja, o aumento da quantidade de fibras contribuiu para diferenciar o resultado das chapas CuFRP, demonstrando que nem todas as médias são iguais. Na percepção da Tabela 24, diante da propriedade de tensão última à tração, quanto as combinações que foram realizadas, verifica-se que as chapas diferenciaram-se uma das outras nas combinações entre chapas que deveriam apresentar-se como homogêneas (H0), ou seja, as chapas deveriam apresentar-se como homogêneas (H0) entre as combinações com chapas CuFRP de um mesmo grupo nominal e; não homogêneas (H1), nas combinações entre chapas CuFRP de grupos nominais diferentes. Todavia, na percepção da Tabela 25, ainda diante da propriedade de tensão última à tração, quanto as combinações que foram realizadas entre diferentes grupos nominais, ou seja, com base na união dos resultados das chapas CuFRP separadas por grupo nominal, implicando no aumento do espaço amostral, verifica-se que as chapas diferenciaram-se uma das outras nas combinações entre grupos nominais distintos, isto é, entre laminados de menor gramatura nominal e entre laminados de maior gramatura nominal, apesar da homogeneidade demonstrada nas propriedades de proporção de fibras e módulo de elasticidade. Nesse aspecto, as combinações entre os grupos CH-GN3 e CH-GN2 e entre CH-GN3 e CH-GN1, isto é, das chapas CuFRP com maior e menor gramatura nominal, foram satisfatórias para a análise, ou seja, apresentaram-se como distintas, conforme o aumento da gramatura nominal, e confirmado pelos testes simultâneos de Turkey, apesar da combinação das chapas CH-GN1 e CH-GN2 apresentarem uma hipótese nula (H0).

Com base na avaliação dos três níveis abordados até aqui, observando os coeficientes de variação, observou-se que apesar do coeficiente de variação (CoV) reduzir as classificações quando comparado com as medidas estatísticas observadas entre amostras de uma mesma chapa e entre amostras de um mesmo grupo nominal, isto é, as classificações mudaram de “muito altas” para classificações “alto”, o que ainda não é satisfatório, sugeriu outras abordagens estatísticas. Nisso, a distribuição normal dos dados apresentou-se homogênea para as propriedades de proporção de fibras e tensão última à tração, porém, para o módulo de elasticidade, os dados apresentaram-se mais distanciados da média, conforme observado no histograma da Figura 37b. Nesse ínterim, através da análise de variância (ANOVA), também se nota que não houve homogeneidade satisfatória para a proporção de fibras e tensão última à tração combinando todas as chapas CuFRP, independentemente do grupo nominal que ela se encontra. Isso significa que as médias dos resultados para essas propriedades, conforme a combinação de comparação de chapas com o teste de simultaneidade de Tukey, não são iguais,

ou seja, a distribuição das fibras e o processo de infusão possibilitaram características não homogêneas entre as diferentes chapas de um mesmo grupo nominal e/ou de diferentes grupos nominais. Ainda com base nesse teste, prosseguiu-se com vista a proposta sugerida no tópico anterior a este, isto é, realizar os testes simultâneos de Tukey entre os diferentes grupos nominais formado pelas chapas CuFRP. Diante disso e das análises dos métodos estatísticos realizado entre amostras constituintes de chapas de grupos nominais distintos e da distribuição normal dos dados realizada no nível 2, para avaliar a qualidade dos compósitos, conforme proposto no tópico anterior, conclui-se que não houve qualidade satisfatória para validar a hipótese alternativa dessa propriedade na combinação CH-GN2 & CH-GN1, porém, as combinações CH-GN3 & CH-GN2 e CH-GN3 & CH-GN1 demonstraram que houve uma diferença significativa entre a média desses grupos para a propriedade de tensão última à tração. Em síntese, as Tabela 26 e 27 a seguir apresentam o cenário ideal dos testes simultâneos de Tukey *versus* o cenário dessa medida estatística apresentada no trabalho para as diferentes chapas e grupos nominais formado por essas chapas.

Tabela 26 - Testes Simultâneos de Tukey entre as médias das chapas CuFRP em um cenário ideal vs. o resultado do cenário obtido.

Diferença de Níveis	Proporção de fibra (%)		Tensão última à tração (MPa)		Módulo de Elasticidade (GPa)	
	Nível de significância	Nível de significância	Nível de significância	Nível de significância	Nível de significância	Nível de significância
	Ideal	Obtido	Ideal	Obtido	Ideal	Obtido
CH24 - CH14	H0	H0	H0	H0	H0	H0
CH15 - CH14	H1	H0	H1	H0	H1	H0
CH25 - CH14	H1	H0	H1	H0	H1	H0
CH35 - CH14	H1	H0	H1	H0	H1	H0
CH16 - CH14	H1	H0	H1	H1	H1	H0
CH26 - CH14	H1	H0	H1	H0	H1	H0
CH15 - CH24	H1	H0	H1	H0	H1	H0
CH25 - CH24	H1	H0	H1	H0	H1	H0
CH35 - CH24	H1	H0	H1	H0	H1	H0
CH16 - CH24	H1	H0	H1	H1	H1	H0
CH26 - CH24	H1	H0	H1	H0	H1	H0
CH25 - CH15	H0	H0	H0	H1	H0	H0
CH35 - CH15	H0	H1	H0	H0	H0	H0
CH16 - CH15	H1	H0	H1	H1	H1	H0
CH26 - CH15	H1	H0	H1	H0	H1	H0
CH35 - CH25	H0	H1	H0	H0	H0	H0
CH16 - CH25	H1	H0	H1	H1	H1	H0
CH26 - CH25	H1	H0	H1	H0	H1	H0
CH16 - CH35	H1	H0	H1	H1	H1	H0
CH26 - CH35	H1	H0	H1	H0	H1	H0

<i>CH26 - CH16</i>	H0	H0	H0	H1	H0	H0
--------------------	----	----	----	----	----	----

Fonte: Autor (2023)

Tabela 27 - Testes Simultâneos de Tukey entre diferentes grupos nominais em um cenário ideal vs. o resultado do cenário obtido

Diferença de Níveis	Proporção de fibra (%)		Tensão última à tração (MPa)		Módulo de Elasticidade (GPa)	
	Nível de significância Ideal	Nível de significância Obtido	Nível de significância Ideal	Nível de significância Obtido	Nível de significância Ideal	Nível de significância Obtido
<i>CH-GN2 - CH-GN1</i>	H1	H0	H1	H0	H1	H0
<i>CH-GN3 - CH-GN1</i>	H1	H0	H1	H1	H1	H0
<i>CH-GN3 - CH-GN2</i>	H1	H0	H1	H1	H1	H0

Fonte: Autor (2023)

4.3. Ensaio de *push-out*

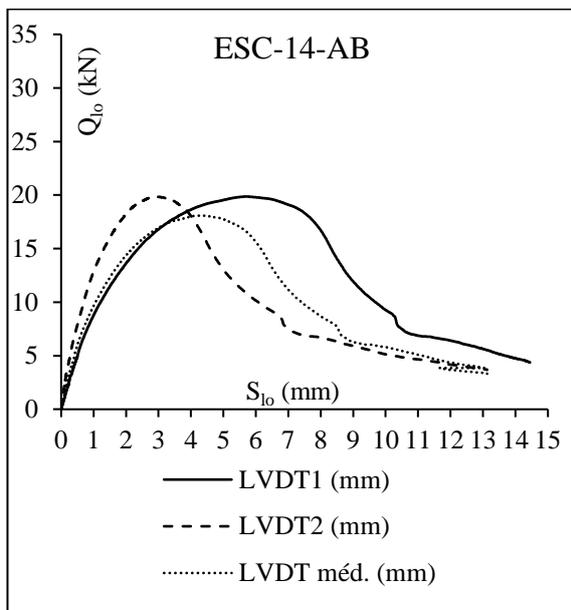
A partir desta seção, são apresentados os resultados obtidos nos testes de *push-out*. Nesta etapa do trabalho, são apresentados e discutidos a capacidade de carga última ($Q_{lo,u}$), o deslocamento médio ($S_{lo,u}$) correspondente ao pico e a rigidez (K_f) das conexões entre os conectores PERFOCuFRP e o concreto.

4.3.1. Comportamento carregamento versus deslocamento

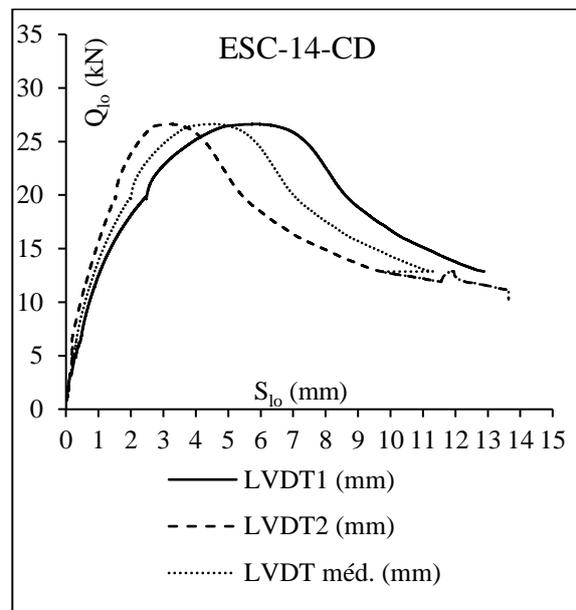
A Figura 38 mostra as curvas de carregamento *versus* deslocamento relativo dos conectores de cisalhamento embutidos nos espécimes de concreto submetidos ao ensaio de *push-out*. Os espécimes de concreto são compostos por dois conectores do mesmo grupo nominal, ou seja, conectores provenientes de compósitos laminados de CuFRP com a mesma gramatura nominal. No que concerne às propriedades do concreto utilizado, obteve-se: resistência à compressão de 43,25 MPa, resistência à tração de 4,60 MPa e módulo de elasticidade de 31,37 GPa. Os corpos de prova utilizados para os ensaios de caracterização mecânica apresentaram um diâmetro médio de 100,6 mm e um comprimento médio de 193,7 mm.

A força representada nos gráficos corresponde à força obtida no ensaio, dividida por dois, com o pressuposto de que cada conector, devido a simetria, absorveu metade da carga aplicada durante o ensaio. A leitura dos LVDT1 e LVDT2 é apresentada nos gráficos da Figura 38. O LVDT médio, apresentada nesses gráficos, representa a média das leituras dos LVDTs mencionados. Para facilitar a visualização das curvas médias de carga *versus* deslocamento para

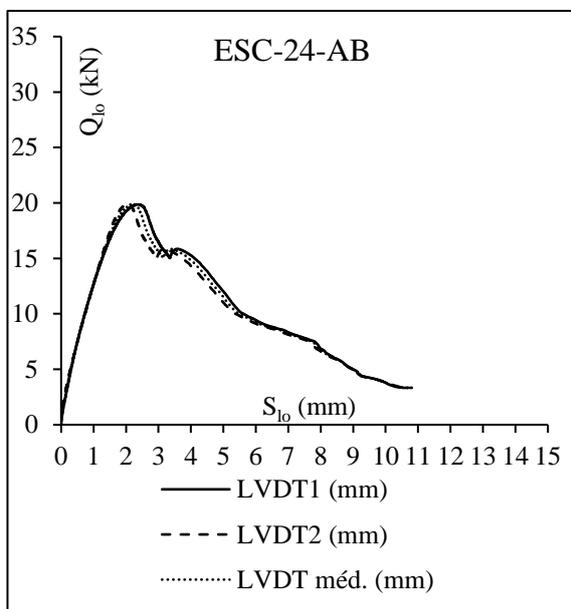
os espécimes que contêm conectores provenientes dos compósitos laminados de CuFRP de um mesmo grupo nominal, a Figura 39 é apresentada. Ainda, é válido mencionar que durante a realização do ensaio de *push-out*, o LVDT2 foi interrompido nos espécimes ESC-25-CD e ESC-26-AB devido a falhas no próprio LVDT, ou seja, para esses dois espécimes de concreto, a leitura média dos LVDTs é representada somente pela leitura do próprio LVDT1.



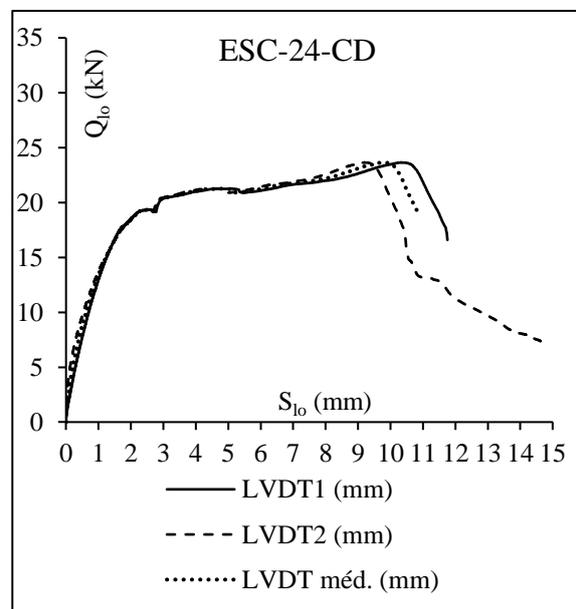
(a)



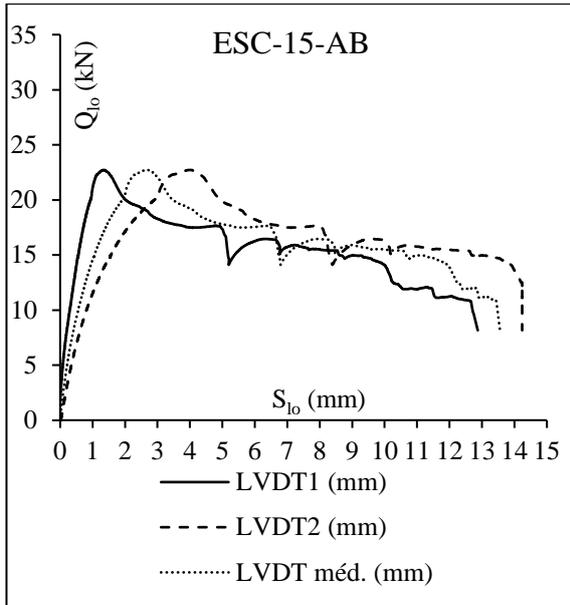
(b)



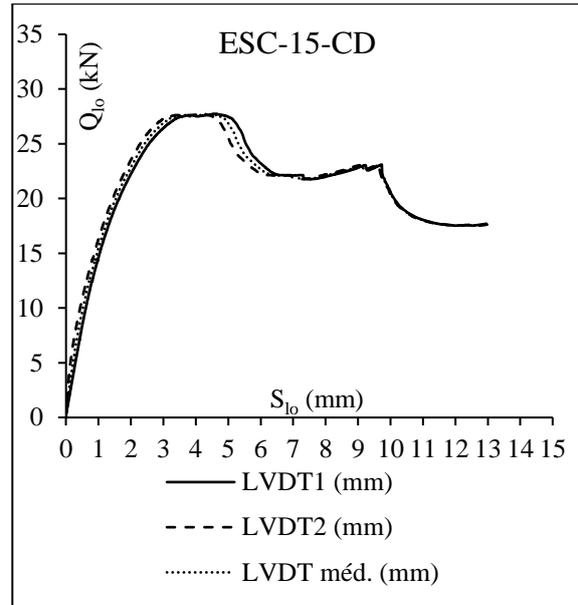
(c)



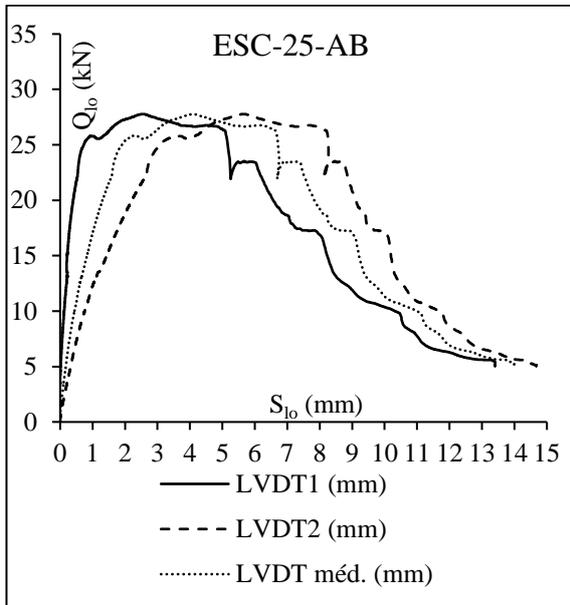
(d)



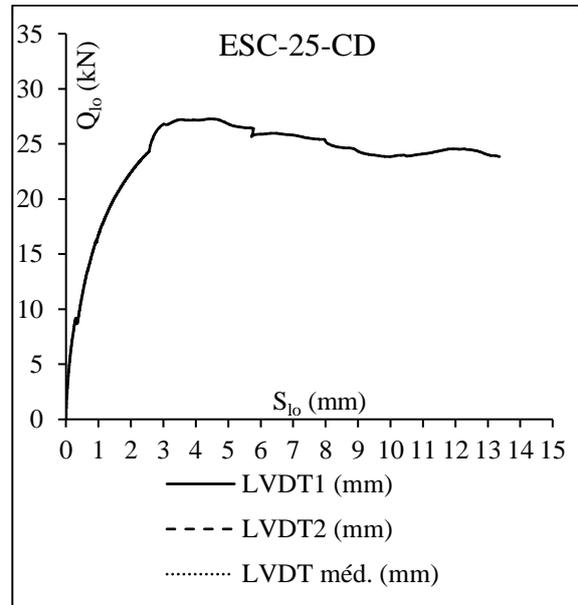
(e)



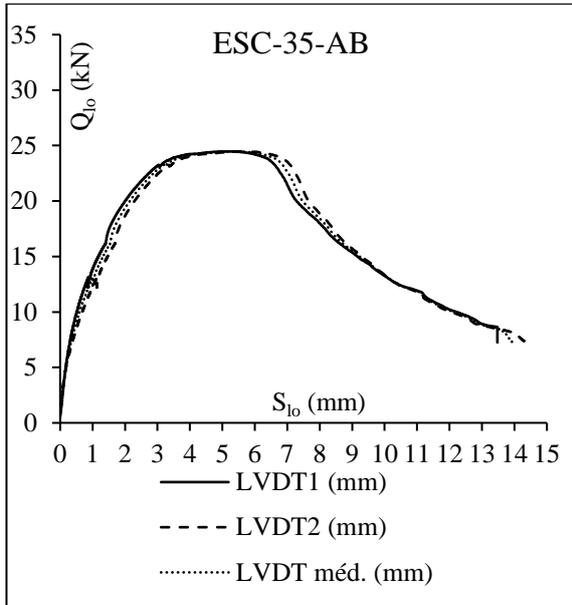
(f)



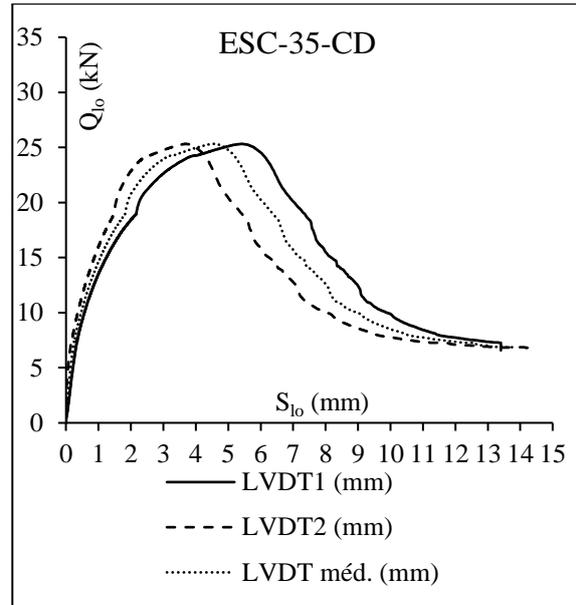
(g)



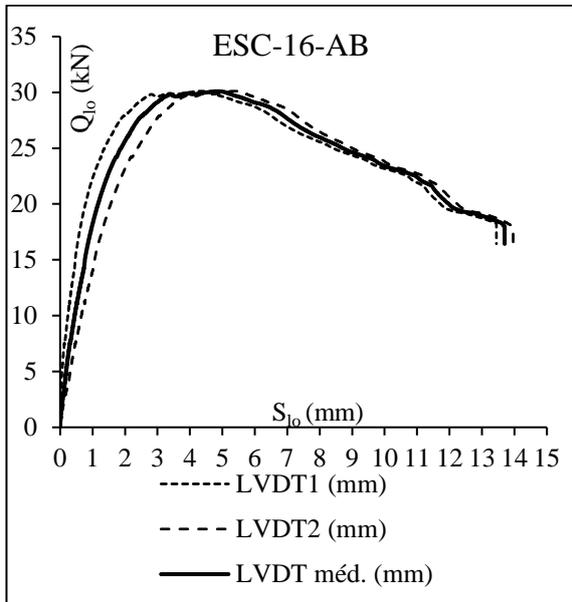
(h)



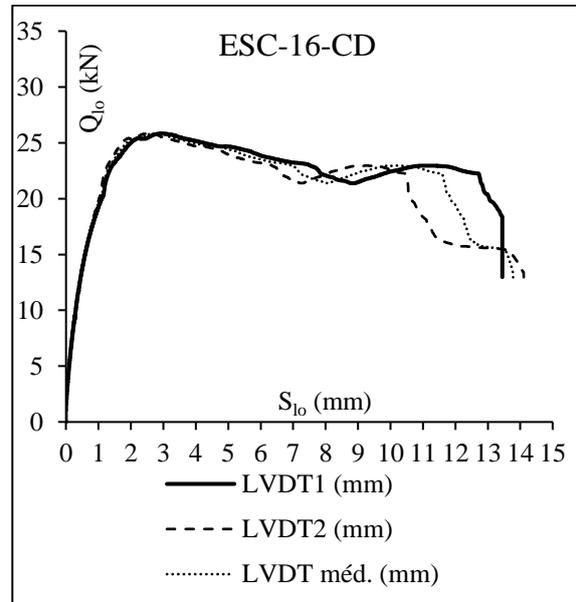
(i)



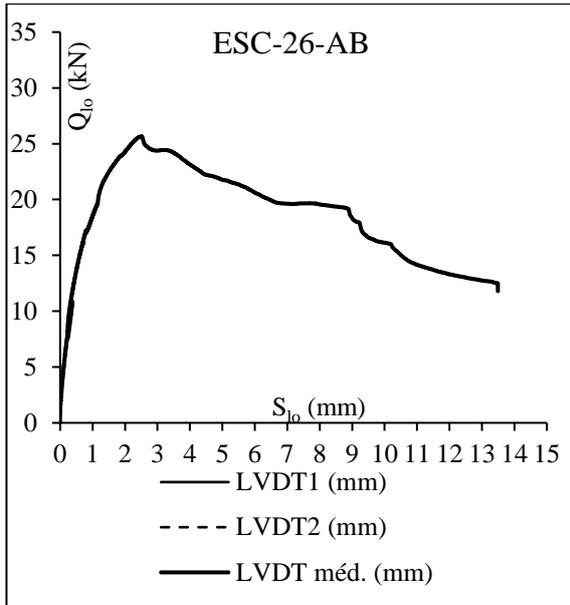
(j)



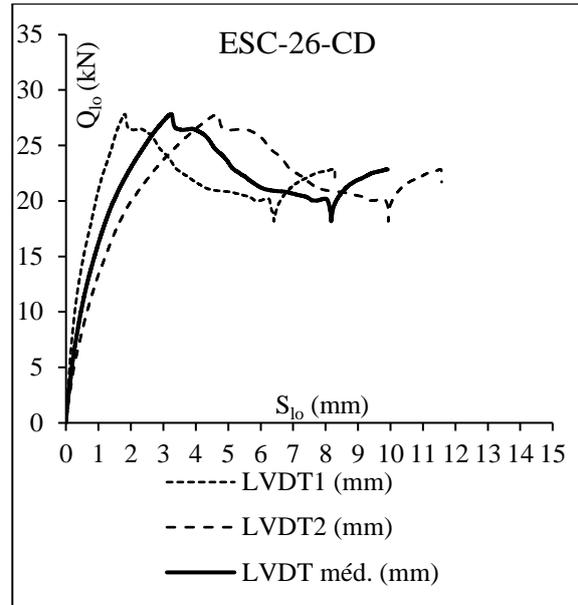
(k)



(l)

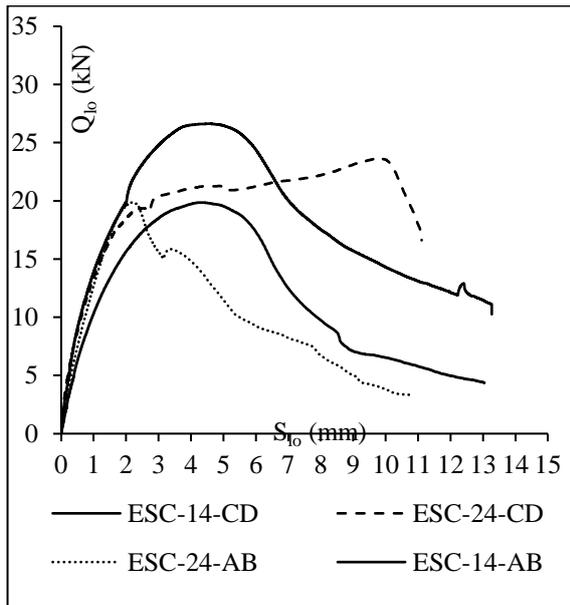


(m)

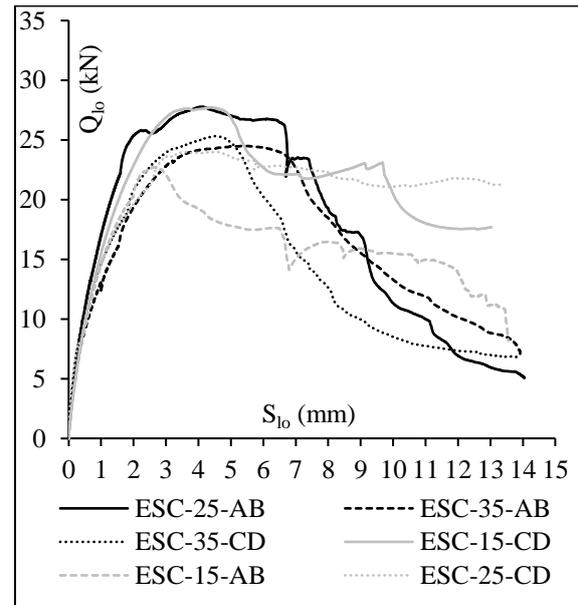


(n)

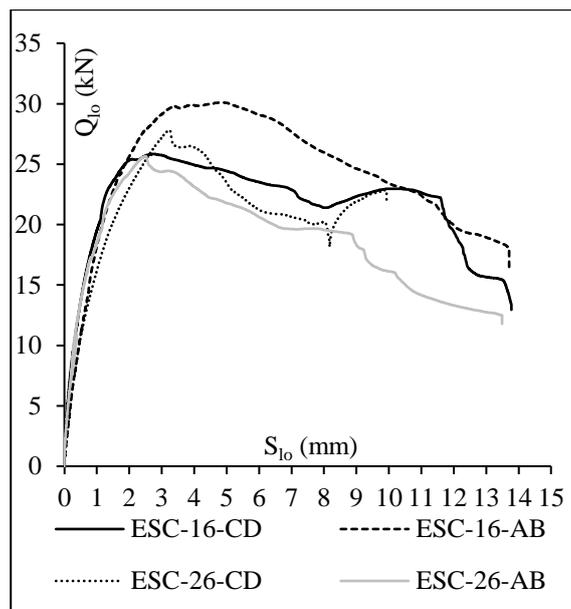
Figura 38 - Curvas de carga versus deslocamento de cada espécime de concreto.



(a)



(b)



(c)

Figura 39- Curvas de carga *versus* deslocamento dos espécimes separados por conectores do grupo nominal: GN1 (a); GN2 (b) e GN3 (c). Fonte: Autor (2023)

Após a análise dos gráficos, observou-se que as curvas apresentaram comportamento rígido até a ruptura do conector PERFOCuFRP × conexões de concreto, com menor deslocamento correspondente ao pico para conectores PERFOCuFRP × conexões de concreto com respostas mais rígidas. Na fase de pós ruptura (ou pós fissuramento) a redução de carga acompanhou maiores deslocamentos. Em comparação com os trabalhos de Lameiras (2015) e Huang e Dai (2019) e Silva (2020) as conexões PERFOCuFRP apresentaram uma resposta mais dúctil, provavelmente devido ao tipo de fibras utilizada na matriz. De acordo com isso, observou-se um padrão no que concerne a capacidade de carga última e a rigidez das conexões. É importante ressaltar que as curvas foram interrompidas quando o curso máximo dos LVDTs foi atingido.

Ainda cabe destacar que os níveis de carregamentos máximos observados acompanharam a gramatura nominal das conexões, isto é, quanto maior a quantidade de fibras contida nos conectores, maior seria a capacidade de carga última da conexão. No entanto, no que concerne aos deslocamentos máximos, observou-se que com relação aos outros mecanismos descritos, o comportamento decorreu-se de maneira inversamente proporcional, ou seja, quanto menor a gramatura nominal das conexões, maiores seriam os deslocamentos máximos na ruptura. Quanto a variedade do comportamento das curvas de carga *versus* deslocamento para conexões de mesma gramatura nominal, algumas apresentaram-se mais próximas umas das outras, principalmente na região anterior ao atingimento da carga última da

conexão. Isso é mais perceptível para as conexões de menor gramatura nominal, nas quais houveram menores proximidades.

4.3.2. Capacidade de carga última, deslocamento correspondente ao pico e rigidez inicial.

A Tabela 28 apresenta a capacidade de carga última ($Q_{lo,u}$), o deslocamento correspondente à carga de pico ($S_{lo,u}$) e a rigidez inicial (K_f) para os conectores PERFOCuFRP × conexões de concreto.

Tabela 28: Resultado dos ensaios *push-out* realizados.

Espécime	QTD	$Q_{lo,u}$		$S_{lo,u}$		K_f	
		Médio (kN)	CoV (%)	Médio (mm)	CoV (%)	Médio (kN/mm)	CoV (%)
ESC-GN1	4	22,50	12,63%	5,16	54,19%	5,54	43,33%
ESC-GN2	6	25,34	7,39%	4,20	18,79%	6,26	20,00%
ESC-GN3	4	27,34	6,60%	3,24	24,47%	8,78	15,66%

Fonte: Autor (2023)

Conforme com os trabalhos realizados por Lameiras (2015), Huang e Dai (2019), Silva (2020) e Naito *et al.* (2012) os coeficiente de variação obtidos do ensaio *push-out* para os conectores produzidos com fibra de vidro, analisados nesta pesquisa, foram na ordem de 11,8%, 7,4%, 8,8% e 16% para a capacidade de carga final da conexão, 19,3%, 28,6%, 29,1% e 11% para deslocamento relativo e 12,0%, 10,0%, 26,0% e 5,2% para rigidez inicial da conexão, respectivamente. O erro computado por Huang e Dai (2019) para as conexões perfuradas no formato de placas deu-se por meio de análise pelo método de elementos finitos, e o coeficiente de variação para o deslocamento relativo foi calculado conforme a mesma abordagem adotada nos trabalhos que foram mencionados. Na pesquisa desenvolvida por Naito *et al.* (2012) encontrou-se valores médios de 16,3%, 11,0%, 5,2%, para os coeficientes de variação em relação à obtenção da capacidade de carga ao cisalhamento em alguns dos conectores GFRP, cujos os valores estão próximos aos que foram obtidos neste trabalho. Assim, pode-se observar que os coeficientes de variação para a capacidade de carga última, o deslocamento correspondente à carga de pico e a rigidez inicial obtidos neste estudo para o conector PERFOCuFRP × conexões de concreto estão dentro dos valores citados na literatura, com exceção dos dados de deslocamento e rigidez para as conexões dos espécimes de grupo nominal CH-GN1, com valores de 54,19 % e 43,33 %, respectivamente.

Conforme a análise dos resultados obtidos na Tabela 28, o menor valor médio encontrado para a capacidade de carga foi nos espécimes do grupo nominal “1” (CH-GN1); por

outro lado, o maior valor médio encontrado foi nos espécimes do grupo nominal “3” (GN3). Quanto aos deslocamentos, o menor valor médio encontrado foi nos espécimes do grupo nominal “3” (GN3); e o maior valor médio encontrado foi nos espécimes do grupo nominal “1” (CH-GN1). Nos resultados de rigidez, o menor valor médio encontrado foi nos espécimes do grupo nominal “1” (CH-GN1); e o maior valor médio encontrado foi nos espécimes do grupo nominal “3” (GN3). Ou seja, o aumento de fibras na conexão contribuiu positivamente nas melhorias de capacidade de carga e rigidez inicial da conexão.

4.3.3. Padrões de fissuração

Estudos prévios com conectores PERFOFRP indicam que existem vários mecanismos que atuam para promover a ancoragem entre esse tipo de conector e o concreto (LAMEIRAS *et al.*, 2013a, 2013b, 2018a, 2018b; 2015; SILVA, 2020; SILVA; RIBEIRO; LAMEIRAS, 2021). Os furos nos conectores criam pinos de concreto que promovem o intertravamento mecânico. Dependendo do número de furos, diâmetro dos furos, distância entre os furos e distância entre os furos e as bordas nos conectores, a ruptura da ligação pode ocorrer no próprio conector, ou nos pinos de concreto. A possibilidade de ruptura no próprio conector é uma característica que diferencia o PERFOFRP dos conectores de aço do tipo PERFOBOND, usualmente utilizados em estruturas mistas de aço e concreto (VALENTE; CRUZ, 2004). Portanto, após a realização dos ensaios *push-out*, os conectores foram cuidadosamente removidos dos corpos de prova de concreto para análise visual dos diferentes modos de ruptura e dos parâmetros que contribuíram para a capacidade de carga máxima da ligação.

Os modos de ruptura foram observados para os conectores PERFOCuFRP dos espécimes ESC-GN1, ESC-GN2 e ESC-GN3. Dentre os conectores embutido nos espécimes de concreto, observou-se uma tendência da ocorrência da ruptura em somente uma das conexões, ou seja, maiores danos foram causados em somente um dos conectores PERFOCuFRP do espécime de concreto. Desse modo, para cada espécime de concreto, constatou um padrão de formação de fissuras, conforme pode ser observado na Figura 40. Para auxiliar na identificação da localização dos conectores com relação a camada interna e externas do espécime de concreto, no que consiste na posição dos conectores embebidos nas camadas de concreto, os conectores apresentam-se com o lado esquerdo orientado para o lado que estava embebido na camada externa de concreto, ou seja, que estava sobre o apoio metálico. O lado direito do conector apresenta-se orientado para o lado que estava embebido na camada interna de concreto, ou seja, na qual foi aplicado o carregamento, como pode ser observado na figura Figura 26, do item 3.2.2.



(a) Conectores PERFOCuFRP dos espécimes ESC-GN1. Apresentam-se nesta ordem: “CO-14-A”; “CO-14-C”; “CO-24-C” e “CO-24-A”.



(b) Conectores PERFOCuFRP dos espécimes ESC-GN2. Apresentam-se nesta ordem: “CO-15-B”; “CO-15-C”; “CO-25-A”; “CO-25-D”; “CO-35-A” e “CO-35-D”.



(c) Conectores PERFOCuFRP dos espécimes ESC-GN3. Apresentam-se nesta ordem: “CO-16-B”; “CO-16-C”; “CO-24-B” e “CO-26-C”.

Figura 40 – Padrões de fissuração dos conectores PERFOCuFRP dos espécimes (a) ESC-GN1; (b) ESC-GN2 e (c) ESC-GN3. Fonte: Autor (2023)

Não foi possível observar a formação de fissuração no concreto. Dessa maneira, conforme observado durante e após os ensaios de *push-out*, afirma-se que a capacidade de carga última das conexões foi atingida com a ruptura dos conectores PERFOCuFRP. Silva (2020) e Lameiras (2015) também identificaram esses padrões, ou seja, observaram que a capacidade de carga última das conexões foi limitada pela ruptura dos conectores GFRP.

De modo geral, os conectores PERFOCuFRP apresentaram padrões de fissuração semelhantes entre conectores pertencentes a um mesmo grupo nominal. Nos espécimes ESC-GN1 as fissuras do conector decorreram-se na direção vertical do conector, na sua região central livre (embebida no EPS) tangente a camada interna de concreto. Nos espécimes ESC-GN2 as fissuras dos conectores “CO-35-A” e “CO-35-D” também se decorreram na direção vertical do conector, na sua região central livre tangente a camada interna dos espécimes, com formação de fissuras na direção diagonal ao conector na extremidade inferior do conector. Os conectores “CO-25-A” e “CO-25-D” formaram fissuras direcionadas do canto superior direito do conector (lado embebido na camada interna de concreto) ao canto inferior esquerdo do conector (lado embebido na camada externa de concreto), passando pela sua região central livre e furos do conector. Os conectores “CO-15-B” e “CO-15-C” formaram fissuras na direção vertical do conector do lado direito do conector, passando pelos furos do conector. Nos espécimes ESC-GN3 as fissuras dos conectores “CO-26-B” e “CO-26-C” concentraram-se na direção vertical, passando pelos furos, do lado direito do conector. Os conectores “CO-16-B” e “CO-16-C” apresentaram comportamentos semelhantes, porém, no primeiro surgiu uma fissura formada na diagonal do conector, direcionada para a região central livre. Cabe destacar os ensaios *push-out* decorreram-se com os conectores sem frente de concreto, na qual foi garantida pela alocação

de blocos de EPS de 50×50 mm, destacando as características de ruptura por cisalhamento. Além disso, não se constatou a ocorrência de desgaste superficial da região de contato entre o conector e o concreto.

A natureza das fibras e a sua distribuição também influenciou no direcionamento das fissuras no conector. As fibras foram distribuídas aleatoriamente, de maneira manual, conforme a gramatura nominal adotada, o que induz às fissuras a surgirem nas regiões de menor quantidade de fibras ou falhas localizadas. De modo geral, a ruptura das conexões ocorreu de maneira mais dúctil, se comparado os conectores PERFOCuFRP com os resultados obtidos com os conectores perfurados de GFRP de Silva (2020) e de Lameiras (2015). Esse comportamento foi garantido até a falha das conexões, cujo os deslocamentos foram observados até o limite dos LVDTs. Desse modo, nos experimentos realizados por esses autores, foi verificado um comportamento rígido das conexões, comparado com as conexões PERFOCuFRP, visto que, os mesmos utilizaram fibras de vidro na composição dos conectores perfurados de GFRP do tipo CSM (PERFOFRP). Esses autores também observaram pequenos deslocamentos dos conectores causados pelo cisalhamento, possivelmente devido ao maior módulo de elasticidade do GFRP.

O gráfico apresentado na Figura 41 ilustra a relação entre a carga e o deslocamento relativo das ligações dos conectores PERFOCuFRP e PERFOGFRP com o concreto. Nessa representação, é possível visualizar a curva média geral obtida pela média das cargas em cada deslocamento relativo medido. Além disso, são apresentadas as curvas dos limites inferior e superior, correspondentes às cargas mínimas e máximas para cada deslocamento relativo da junta PERFOCuFRP com o concreto. É importante mencionar que as curvas médias obtidas nesta pesquisa são comparadas com os resultados da pesquisa realizada por Silva (2020), que utilizou conectores PERFOGFRP com o mesmo diâmetro e espaçamento entre furos, características também adotadas no conector PERFOCuFRP, conforme observado na Figura 25. Essa uniformidade nas características dos conectores utilizados na pesquisa contribui para a validade e precisão da análise da relação entre carga e deslocamento relativo em conectores de fibras de curauá e fibras de vidro.

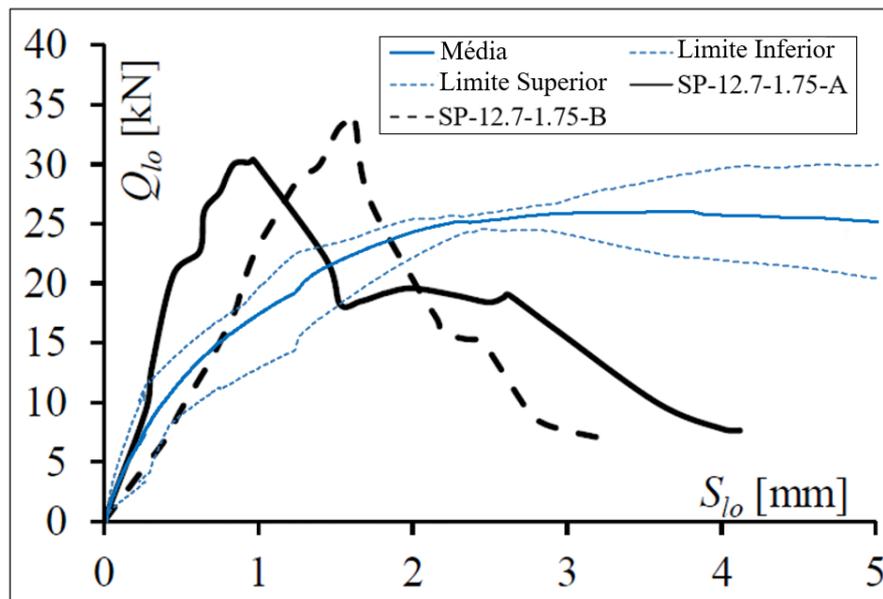


Figura 41 - Gráfico de carga *versus* deslocamento relativo das conexões dos conectores PERFOCuFRP e PERFOGFRP com concreto

Huang e Dai (2019) observou que a ruptura ocorrida em seus conectores (de formato de placa plana e compostos por fibras de vidro longas e alinhadas) foi gerada na mesma direção das fibras, com exceção de algumas fissuras na direção vertical na região de contato com o isolamento embutido. Silva (2020) constatou também que as fissuras geradas em seus conectores (de distribuição aleatória de fibras de vidro em camadas do tipo CSM), apresentaram uma tendência de inclinação na região central livre dos conectores, região na qual ocorreu a ruptura dos conectores que foram observados, com variação ligeiramente significativa da quantidade de fissuras apresentadas de conector para conector. Lameiras (2015) observou diferentes mecanismos de falha - em chapas planas com furos e sem furos em diferentes tipos de GFRP com a presença da frente de concreto e sem a presença de concreto – na ruptura das conexões. Para este caso, observou-se somente as conexões GFRP, do tipo CSM, sem a presença do efeito *end-bearing*. Nesse contexto, observou-se que os conectores perfurados GFRP (laminado de CSM) produzidos por Lameiras (LAMEIRAS *et al.*, 2013a, 2013b, 2018a, 2018b, 2021b; 2015) quando sem o efeito *end-bearing*, exibiam mecanismos de ruptura relacionados ao cisalhamento dos pinos de concreto, formados pelos furos no próprio conector, semelhante ao que também foi verificado nos conectores PERFOCuFRP.

4.3.4. Efeito da variação da quantidade de fibras no conector

Na Figura 42 apresentou-se a análise da influência da variação da distribuição das fibras nos conectores PERFOCuFRP acerca do comportamento mecânico. Para isso, utilizou-se

gráficos de barra para ilustrar o valor médio dos dados e barras de erro (relacionada às medidas de espessura da chapa) para representar a incerteza dos resultados, considerando o valor mínimo e máximo. Os dados foram plotados com o objetivo de avaliar a relação do carregamento em função da distribuição das fibras de curauá nos conectores de acordo com as suas respectivas gramaturas nominais. Para fins de comparação, considerou-se apenas a distinção entre as gramaturas nominais, independente da avaliação da qualidade dos compósitos laminados, cujas foram produzidas para a extração dos conectores para o ensaio *push-out*.

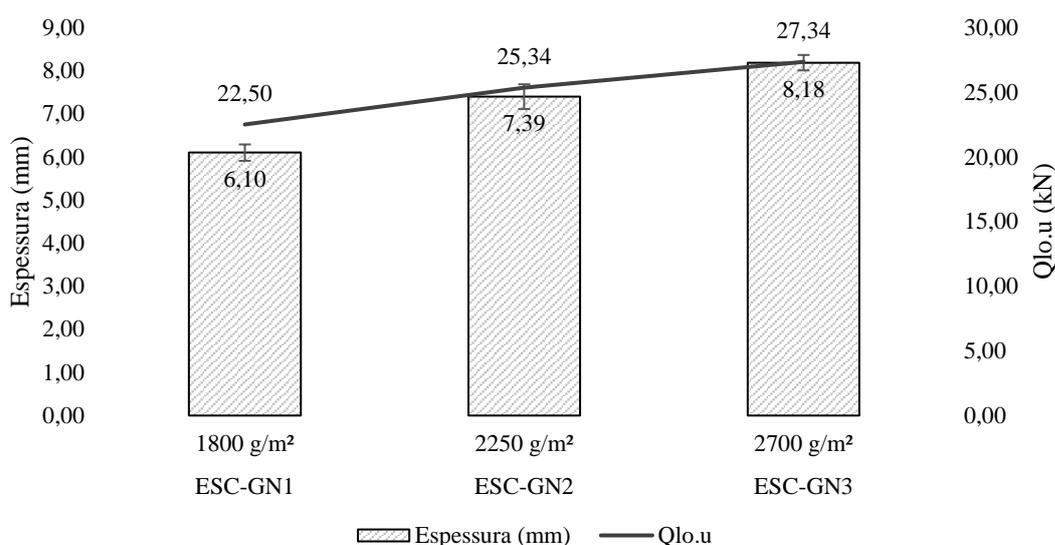


Figura 42 – Gráficos da espessura (mm) acompanhado das barras de erro e carregamento último (kN) dos conectores em função da gramatura nominal (g/m²) dos conectores embebido nos espécimes de concreto.

De acordo com a análise dos gráficos da Figura 42, acima, notou-se que os espécimes ESC-GN3, com conectores de gramatura nominal de 2700 g/m², apresentaram os resultados de melhor desempenho mecânico, com valor médio de 27,34 kN para a propriedade de capacidade última da conexão. Por sua vez, os espécimes ESC-GN2, com conectores de gramatura nominal de 2250 g/m², apresentaram o segundo maior valor médio (de 25,34 kN) para essa mesma propriedade analisada. Dessa maneira, com vista a essa tendência, observa-se que o aumento gradual da quantidade de fibras distribuída nos conectores acarreta em maior valor médio para a capacidade de carga.

De acordo com isso, observa-se que existem duas consequências importantes com vista a análise dos resultados mencionados. A primeira delas seria o aumento da espessura média dos conectores, que são proporcionais ao aumento da quantidade de fibras incorporadas no conector. A segunda delas está relacionada às regiões de fragilidade dos conectores devido a

qualidade de produção dos conectores, já que, as fibras podem se concentrar nas regiões de maior fragilidade da conexão sob carregamento, o que pode gerar menores valores quanto ao desempenho mecânico. Se existe menos fibra distribuídas no conector, implica-se que existe maior probabilidade de dispersão das fibras nessas regiões de maior fragilidade, o que aumenta a chance da ruptura em zonas mais frágeis.

Considerando o pressuposto, a espessura dos conectores tem uma influência significativa sobre seu comportamento mecânico nos ensaios *push-out*. Uma espessura maior pode impactar na capacidade de carga, bem como na sua rigidez. No geral, os conectores com espessura elevada apresentam maior capacidade de carga, bem como maior rigidez e menor capacidade de deformação, como pode ser visualizado na Tabela 28. Além disso, a espessura do conector pode afetar a resistência da ligação entre o conector e a camada de concreto, que por sua vez é fortalecida pelos pinos de ancoragem. Conectores de espessura aumentada, conforme a gramatura nominal, proporcionam uma área de superfície maior no interior do orifício do pino de ancoragem para o estabelecimento da ligação, resultando em uma conexão mais forte e eficiente na transferência de carga para o concreto.

Outro ponto importante que também podem ser considerados pelo efeito da espessura dos conectores traduzem-se na forma como as cargas são distribuídas no interior do conector. Conectores mais espessos podem distribuir as cargas de maneira mais uniforme, reduzindo a concentração de tensões e deformações na interface entre o conector e a camada de isolamento, como observado nos padrões de fissuração dos conectores.

Além disso, outro fator crucial a ser considerado quanto ao comportamento mecânico da conexão seria a distribuição das fibras curtas de curauá de maneira aleatória e não uniforme - conforme a avaliação da qualidade dos compósitos - no interior do conector, o que evidentemente contribui para o desempenho mecânico. Em particular, uma distribuição heterogênea das fibras no conector afeta a sua resistência frente aos carregamentos aplicados que por sua vez também afeta a rigidez. Em algumas regiões, a concentração de fibras pode ser maior, resultando em uma maior resistência às cargas, enquanto em outras, a concentração de fibras pode ser menor, resultando na redução do desempenho mecânico, ou seja, algumas regiões do conector podem ser mais sujeitas à fissuração e conseqüente ruptura. As deformações também podem ser mais susceptíveis em determinadas regiões do conector quando leva-se em consideração esse aspecto. Isso acarreta deformações não uniformes no interior da conexão, resultando em comportamento complexo, potencialmente mais frágil e de difícil descrição de comportamento das falhas mecânicas. Portanto, traduz-se que uma distribuição mais

homogênea das fibras aumenta a capacidade última da conexão com vista a redução de deformações residuais, aumentando a estabilidade e a durabilidade dos conectores.

De acordo com a análise dos padrões formado pelas fissuras, julga-se que a concentração de fibras em uma região específica dos conectores pode levar a um desequilíbrio na distribuição de carga, resultando em uma capacidade última da conexão menor, já que, o método de produção dos conectores empregado para a elaboração dos conectores, principalmente dos de menor gramatura nominal, aumenta a probabilidade das fibras se concentrarem em determinadas regiões do conector. Dessa maneira, observa-se que as fissuras geradas nos conectores de menor gramatura nominal ocorreram na interface entre a camada de isolamento e concreto, ou seja, os pinos de ancoragem ao concreto, predominantemente, não foram solicitados nesses conectores. Determinando, portando, essas regiões com sendo as de menor fragilidade, não possuindo fibras suficientes para solicitar os pinos de concreto.

No presente contexto, foi possível observar que a comparação entre os espécimes ESC-GN1 e ESC-GN2, que possuem conectores de gramaturas nominais de 1800 g/m² e 2250 g/m², respectivamente (correspondendo a 80,00% e 82,46% da quantidade de fibras curtas de curauá e da espessura dos conectores), resultou em uma resistência de 88,81% do espécime ESC-GN1 em relação aos espécimes ESC-GN2. Além disso, a comparação entre os espécimes ESC-GN1 e ESC-GN3, que contam com conectores de gramaturas nominais de 1800 g/m² e 2700 g/m², respectivamente (correspondendo a 66,67% e 74,51% da quantidade de fibras curtas de curauá e da espessura dos conectores), demonstrou que o espécime ESC-GN1, com gramatura nominal menor, apresentou uma resistência de 82,31% em relação ao espécime ESC-GN3, que possui uma gramatura nominal maior. Já a comparação entre os espécimes ESC-GN2 e ESC-GN3, com gramaturas nominais de 2250 g/m² e 2700 g/m², respectivamente (correspondendo a 83,33% e 90,36% da quantidade de fibras curtas de curauá e da espessura dos conectores), indicou que o espécime ESC-GN2, que possui uma gramatura nominal menor, apresentou uma resistência de 92,68% em relação ao espécime ESC-GN3, que possui gramatura nominal maior. Esses resultados evidenciam que a gramatura nominal, assim como a espessura dos conectores é um fator crucial para a determinação da resistência mecânica dos mesmos. Em resumo, no que se refere a análise dos resultados, conforme a Tabela 28 apresentada anteriormente, é possível verificar as observações acima acerca das variações da gramatura nominal e espessura dos conectores em termos percentuais, comparando-se as propriedades do espécime da esquerda com as propriedades do espécime da direita, na

Tabela 29 a seguir.

Tabela 29 – Comparativo em termos percentuais entre os resultados dos espécimes

Espécimes	Gramatura	Espessura (mm)	$Q_{10,u}$	$S_{10,u}$	K_f
			Médio (kN)	Médio (mm)	Médio (kN/mm)
ESC-GN1 - ESC-GN2	80.00%	82.46%	88.81%	122.71%	88.55%
ESC-GN1 - ESC-GN3	66.67%	74.51%	82.31%	159.27%	63.13%
ESC-GN2 - ESC-GN3	83.33%	90.36%	92.68%	129.79%	71.30%

Fonte: Autor (2023)

Em síntese, considera-se essencial levar em conta a gramatura dos conectores, no qual infere em duas características de suma importância para a determinação do desempenho mecânico dos conectores, que são: a distribuição das fibras curtas e aleatórias no interior do conector e a espessura dos mesmos, que está intimamente ligada a gramatura nominal adotada. Portanto, é importante que a gramatura dos conectores seja cuidadosamente selecionada, a fim de garantir um desempenho mecânico satisfatório. O gráfico Figura 43 apresenta a capacidade última das conexões em função da gramatura nominal adotada para os conectores.

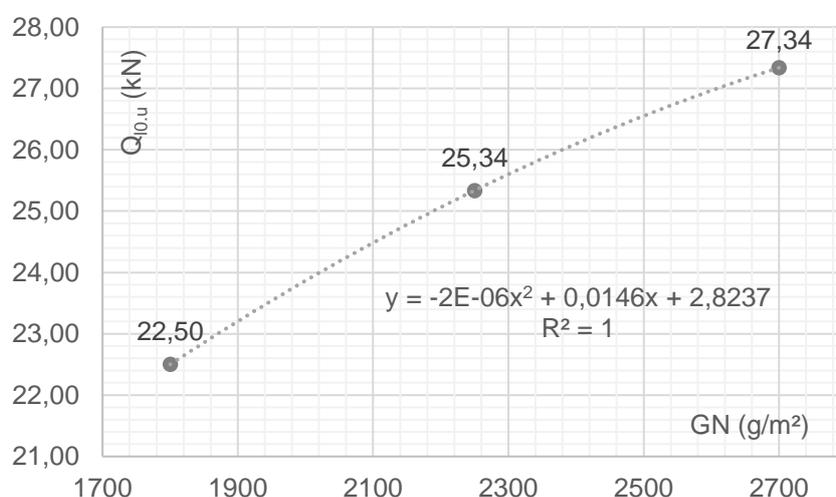


Figura 43 – carregamento último versus gramatura nominal adotada para os conectores

A partir da curva polinomial obtida da capacidade de carga última $Q_{10,u}$ (kN), dada em função da gramatura nominal adotada GN (g/m^2) tem-se equação 4.1.

$$Q_{10,u} = -0,000002 \times GN^2 + 0,0146 \times GN + 2,8237 \quad (4.1)$$

4.3.5. Conectores PERFOCuFRP versus conectores PERFOGFRP

Nesta seção, foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos nos ensaios de *push-out* conduzidos em espécimes de concreto com conectores PERFOCuFRP e espécimes equivalentes que empregaram conectores PERFOGFRP. Os conectores PERFOCuFRP foram retirados dos compósitos laminados que fazem parte do grupo nominal GN3, ou seja, dos compósitos laminados com uma gramatura nominal de 2700 g/m². Para embasar a comparação, utilizou-se os estudos prévios conduzidos por Lameiras (2015), Huang e Dai (2019) e Silva (2020), os quais realizaram ensaios semelhantes, porém utilizando conectores PERFOGFRP em seus espécimes de concreto. Os autores estudaram conectores de cisalhamento PERFOGFRP Por meio de ensaio *push-out* para aplicações em painéis de parede sanduíche de concreto. Dentre os conectores utilizados para comparação de desempenho mecânico, os conectores produzidos pelo primeiro autor apresentam o mesmo espaçamento entre furos, a mesma geometria e diâmetro dos furos adotados para os conectores estudados neste trabalho.

De acordo com os estudos de Silva (2020), o menor valor médio encontrado para a capacidade de carga no ensaio *push-out* foi de 22,21 kN, para os espécimes com conectores (sem furos) do grupo de controle (CLT), ou seja, dos espécimes SP-CLT; o segundo menor valor médio para os espécimes submetidos ao *push-out* foi de 28,24 kN, para os espécimes com conectores com furos de 12,7 mm de diâmetro e espaçamento entre furos de $3,00 \times D$, ou seja, de 38,10 mm (de centro a centro da circunferência dos furos), dos espécimes SP-12.70-3.00; o maior valor médio de foi de 32,23 kN, para os espécimes com conectores com furos de 12,7 mm de diâmetro e espaçamento entre furos de $1,75 \times D$, ou seja, de 22,22 mm (de centro a centro da circunferência dos furos), dos espécimes SP-12.7-1.75. Esses espécimes possuem o menor e o maior espaçamento entre furos que foram adotados no trabalho elaborado por Silva (2020), ou seja, são espaçados de 22,22 mm ($1,75 \times D$) e 38,10 mm ($3,00 \times D$), além do grupo de controle (conexões sem furos).

Comparando os resultados dos espécimes de concreto ESC-GN3, com conectores PERFOCuFRP, conforme ilustrado na Tabela 28, com os resultados apresentados por Silva (2020), mostrou-se que a capacidade de carga última da conexão conector PERFOCuFRP \times concreto correspondem a 123,09 %, 96,80 % e 84,82 %; os deslocamentos correspondem a 236,35%, 311,35 % e 252,97 %, e; a rigidez inicial correspondem a 49,95 %, 31,26 % e 33,29 %, da conexão dos conectores GFRP \times concreto, dos espécimes SP-CLT, SP-12.70-3.00 e SP-12.70-1.75, respectivamente. Isso demonstra que a redução gradual do espaçamento entre os

furos, comparando com os conectores PERFOCuFRP, dentro das medidas adotados pelo autor, melhora a resistência da conexão conector PERFOCuFRP × concreto, ou seja, provoca aumento de capacidade de carga e ancoragem do conector ao concreto. Os deslocamentos, de modo geral, também aumentaram com a redução do espaçamento entre os furos, apesar do grupo de controle garantir a ancoragem no concreto pelo mecanismo de confinamento e aderência de contato com a camada de concreto embebido. Esses fatores também impactaram na redução da rigidez inicial das conexões conector PERFOCuFRP × concreto, de maneira geral, a rigidez sofreu aumento com maiores valores de espaçamento entre os furos. Dessa forma, afirma-se que a quantidade de furos, assim como o espaçamento entre furos, para conectores de mesma geometria e diâmetro dos furos, influenciou na ancoragem do conector ao concreto, contribuindo, portanto, na capacidade de carga da conexão conector PERFOCuFRP × concreto. Para todos os conectores PERFOCuFRP adotou-se furos de 12,70 mm de diâmetro, com espaçamento entre furos de 22,22 mm ($1,75 \times D$), no formato de chapas, conforme já descrito anteriormente.

De acordo com os estudos de Lameiras (2015), o menor valor médio encontrado para a capacidade de carga última no ensaio *push-out* foi de 29,35 kN, para os espécimes de conectores sem furos (0H), sem a contribuição do efeito da frente de concreto *end-bearing* (WO), ou seja, dos espécimes 0H-CSM-WO; o segundo menor valor médio para os espécimes submetidos ao *push-out* foi de 40,10 kN, para os espécimes com conectores com furos (3H) de 30 mm e espaçamento entre furos de $2,50 \times D$ (correspondente a 75 mm de centro a centro das circunferências dos furos), sem a contribuição do efeito *end-bearing* (WO), ou seja, dos espécimes 3H-CSM-WO; o maior valor médio de foi de 76,90 kN, para os espécimes com conectores com furos (3H) e espaçamento entre furos $2,50 \times D$, porém, com a contribuição do efeito *end-bearing* (EB), ou seja, dos espécimes 3H-CSM-EB.

Comparando os resultados dos espécimes de concreto ESC-GN3, com conectores PERFOCuFRP, conforme ilustrado na Tabela 28, com os resultados apresentados por Lameiras (2015), mostrou-se que a capacidade de carga última da conexão conector PERFOCuFRP × concreto correspondem a 93,14 %, 68,17 % e 35,55 %; os deslocamentos correspondem a 428,88 %, 276,75 % e 206,90 %; a rigidez inicial correspondem a 22,57 %, 25,13 % e 17,73 % da conexão dos conectores GFRP × concreto, dos espécimes 0H-CSM-WO, 3H-CSM-WO e 3H-CSM-EB, respectivamente. Diante disso, nota-se que os espécimes com conectores de menor capacidade de carga não apresentam furos e não portam do efeito *end-bearing*. Por outro lado, os espécimes com conectores de maior capacidade de carga apresentam furos e portam do efeito *end-bearing*. Portanto, isso prova que os furos contribuem com a ancoragem do conector ao concreto, que por sua vez, melhora a capacidade de carga da conexão. Os deslocamentos

também aumentaram com a presença do efeito *end-bearing* e ausência de furos no conector. Esses fatores também impactaram na rigidez das conexões conector GFRP × concreto comparado com as conexões PERFOCuFRP × concreto, nos quais foram elaborados sem a contribuição do efeito *end-bearing*. Isso foi possível com a implementação de blocos de EPS na região de contato dos conectores PERFOCuFRP ao concreto, na qual apresenta o efeito da frente de concreto para os conectores no ensaio *push-out*.

Conforme os estudos de Huang e Dai (2019), o menor valor médio encontrado para a capacidade de carga no ensaio *push-out* foi de 15,8 kN, para os espécimes de conectores com duas camadas de fibra de vidro, de comprimento projetado de 100 mm, ou seja, dos espécimes F-100-2; o segundo menor valor médio para os espécimes submetidos ao *push-out* foi de 30,4 kN, para os espécimes de conectores com duas camadas de fibra de vidro, de comprimento projetado de 160 mm, ou seja, para os espécimes F-160-2; o maior valor médio de foi de 66,4 kN, para os espécimes de conectores com quatro camadas de fibra de vidro, de comprimento projetado de 160 mm, ou seja, para os espécimes F-160-4. Dessa forma, afirma-se uma contribuição positiva do comprimento projetado dos conectores no concreto e da quantidade de camadas de fibras de vidro. Para esse caso adotou-se fibras de vidro orientadas na direção biaxial de $\pm 45^\circ$.

Comparando os resultados dos espécimes de concreto ESC-GN3, com conectores PERFOCuFRP, conforme ilustrado na Tabela 28, com os resultados apresentados por Huang e Dai (2019), mostrou-se que a capacidade de carga última da conexão conector PERFOCuFRP × concreto correspondem a 173,02 %, 89,93 % e 41,17 %; os deslocamentos correspondem a 40,48 %, 53,97 %, 15,20 % e; a rigidez inicial correspondem a 58,12 %, 31,23 % e 21,51 % das conexões GFRP × concreto, dos espécimes F-100-2, F-160-2 e F-160-4, respectivamente. Os espécimes com conectores de menor capacidade de carga apresentam duas camadas de fibra de vidro e menor comprimento projetado. Por outro lado, os espécimes com conectores de maior capacidade de carga apresentam quatro camadas de fibra de vidro e maior comprimento projetado. Isso demonstra que a quantidade de camadas de fibras de vidro (ou vegetal) e comprimento projetado contribuem positivamente para melhorias na capacidade de carga última da conexão. Os deslocamentos aumentaram com acréscimo de camadas de fibra de vidro nas conexões. Esses fatores também impactaram na rigidez das conexões, isso significa que houve um aumento da rigidez das conexões proporcionalmente a quantidade de camadas de fibra de vidro dos conectores GFRP e de comprimento projetado.

De acordo com essas análises e dados da Tabela 5 e Tabela 28, elaborou-se a Tabela 30 com o intuito de facilitar a visualização dos parâmetros analisados. Nessa tabela apresenta o

comparativo dos resultados dos espécimes de concreto ESC-GN3, com conectores PERFOCuFRP, com os resultados dos estudos apresentados pelos autores que foram citados neste tópico, conforme o que foi descrito. Vale salientar que a ordem dos dados se apresenta na forma decrescente.

Tabela 30 - Tabela de comparativo dos resultados dos ESC-GN3

Autoria	$Q_{lo,u}$ (kN)		$S_{lo,u}$ (mm)		K_f (kN/mm)	
	Comparativo	Espécimes	Comparativo	Espécimes	Comparativo	Espécimes
Silva (2020)	123,09%	SP-CLT	311,35%	SP-12,70-3,00	49,95%	SP-CLT
	96,80%	SP-12,70-3,00	281,57%	SP-12,70-2,00	33,29%	SP-12,70-1,75
	90,07%	SP-12,70-2,50	276,52%	SP-12,70-2,50	31,26%	SP-12,70-3,00
	85,67%	SP-12,70-2,00	252,97%	SP-12,70-1,75	30,93%	SP-12,70-2,00
	84,82%	SP-12,70-1,75	236,35%	SP-CLT	24,42%	SP-12,70-2,50
Lameiras (2015)	93,14%	0H-CSM-WO	428,88%	0H-CSM-WO	29,51%	0H-CSM-EB
	68,17%	3H-CSM-WO	276,75%	3H-CSM-WO	25,13%	3H-CSM-WO
	41,05%	0H-CSM-EB	206,90%	3H-CSM-EB	22,57%	0H-CSM-WO
	35,55%	3H-CSM-EB	140,78%	0H-CSM-EB	17,73%	3H-CSM-EB
Huang e Dai (2019)	173,02%	F-100-2	53,97%	F-160-2	58,12%	F-100-2
	89,93%	F-160-2	40,48%	F-100-2	46,19%	F-100-4
	76,15%	F-100-4	17,22%	F-100-4	31,23%	F-160-2
	41,17%	F-160-4	15,20%	F-160-4	21,51%	F-160-4

Fonte: Autor (2023)

De modo geral, com vista aos dados da Tabela 30 e sendo a capacidade de carga última a propriedade mais importante, o menor valor encontrado foi de 15,80 kN, nos espécimes F-100-2 de Huang e Dai (2019). Esse dado corresponde a 173,02 % da capacidade de carga última dos conectores PERFOCuFRP, dos espécimes ESC-GN3. A característica que desempenhou a menor capacidade de carga última dos espécimes F-100-2 com relação aos conectores PERFOCuFRP, dos espécimes ESC-GN3, foi a quantidade de fibras utilizada na composição dos conectores. Os conectores PERFOCuFRP foram elaborados com gramatura nominal de 2700 g/m², ou seja, 157,89 % da quantidade de fibras de vidro utilizada na composição dos conectores dos espécimes F-100-2, cuja a gramatura era de 1710 g/m². Nesse ínterim, o maior valor encontrado foi de 76,90 kN, nos espécimes 3H-CSM-EB de Lameiras (2015). Esse dado corresponde a 35,55 % da capacidade de carga última dos espécimes ESC-GN3 com conectores PERFOCuFRP. A característica que desempenhou a maior capacidade de carga dos espécimes 3H-CSM-EB com relação aos espécimes ESC-GN3 com conectores PERFOCuFRP foi a presença de concreto na frente do conector (efeito *end-bearing*), assim como, a presença de furos nos conectores. Os conectores PERFOCuFRP foram elaborados com furos de 12,70 mm, ou seja, 42,33 % do diâmetro dos furos dos conectores dos espécimes 3H-CSM-EB, cujo os

furos eram de 30 mm, espaçados por 75 mm, em conector de 350 × 250 mm. O comprimento projetado, diâmetro e o espaçamento entre furos também exercem contribuições significativas para o desempenho mecânico dos conectores, cujos os valores foram fixados para os conectores PERFOCuFRP, como já mencionado.

De acordo com os dados da Tabela 28, do resultado dos ensaios *push-out* dos espécimes de concreto ESC-GN3, com conectores PERFOCuFRP, os CoV apresentaram-se dentro de valores admissíveis, comparado com o resultado apresentado pelos autores citados, conforme apresentado na Tabela 10. De acordo com isto, os resultados da Tabela 28 apresentaram um erro médio dentro dos erros admitidos por outros autores, o que demonstra aceitabilidade para a comparação. Uma das principais motivações para a comparação dos resultados dos ensaios *push-out* foi demonstrar uma alternativa sustentável dos conectores já existentes na literatura e compará-los com conectores de polímero reforçado com fibras curtas de curauá. Com base nisso, estudos como o de Woltman, Tomlinson e Fam (2013), no qual estudou-se sobre os conectores de GFRP, utilizando o ensaio *push-out*, foram avaliadas experimentalmente as resistências ao cisalhamento de conectores de GFRP revestidos com areia, considerando a interação entre o isolamento e o concreto. Os resultados indicaram variações de resistência entre 60 e 112 MPa (superiores às variações sem revestimento), dependendo do tipo de GFRP utilizado. Esses valores correspondem a 45,6% e 24,41% dos resultados dos espécimes de concreto ESC-GN3, com conectores PERFOCuFRP. Mesmo que os conectores PERFOCuFRP apresentem valores de menor resistência, é viável dimensioná-los. No entanto, ao compará-los com os conectores GFRP nas mesmas condições de projeto, é necessário utilizar uma quantidade maior do número de conectores no dimensionamento. Nesta demonstração, em vez de utilizar o valor médio obtido, foi calculado um valor característico para a resistência dos conectores com base nos dados experimentais. Com base nos ensaios de *push-out* realizados nos espécimes ESC-GN3, nos quais foram ensaiados 4 corpos de prova, os valores da resistência ao cisalhamento obtidos foram os seguintes: 25,8 kN, 30,09 kN, 27,81 kN e 25,65 kN (apêndice B). Para aplicar a equação (3), calculou-se a média aritmética (f_{cm}) e o desvio padrão (s) dos resultados.

$$f_{cc} = f_{cm} - 1,65 \times s \quad (3)$$

Onde:

1,65 é um coeficiente que garante que 95% dos corpos de prova tenham resistência maior ou igual a f_{cc} ;

Para determinar a quantidade necessária de metros lineares de conectores PERFOCuFRP para suportar a carga de um painel sanduíche, adotou-se uma situação hipotética para fins de demonstração. Suponhamos que o painel sanduíche possua 8 metros de comprimento e 3 metros de altura, sendo uma das camadas constituída de concreto com espessura de 6cm, enquanto a outra camada é suportada pelos conectores PERFOCuFRP. Com base nos resultados dos ensaios de *push-out* realizados nos espécimes ESC-GN3, calculou-se a carga por metro que o conector deve suportar. É importante ressaltar que a resistência dos conectores foi reduzida por um fator de 1,4 e que foi considerado um fator de segurança de 1,5 para a carga de cálculo, conforme a equação (4). Após obter o valor característico da resistência dos conectores, determinou-se a quantidade necessária de conectores em metros lineares utilizando a equação (5).

$$P_c = c \times h \times e \times \rho \times \gamma_c \quad (4)$$

$$Q_m = \frac{P_c \times \gamma_a \times l}{f_{cc}} \quad (5)$$

Onde:

P_c é o peso da camada de concreto do painel suportada pelos conectores;

c é o comprimento da camada de concreto do painel suportada pelos conectores;

h é a altura da camada de concreto do painel suportada pelos conectores;

e é a espessura da camada de concreto do painel suportada pelos conectores;

ρ é o peso específico do concreto armado;

γ_c é o fator de segurança;

f_{cc} é a resistência característica do conector;

l é o comprimento do conector em *metros* e;

γ_a é o fator de segurança do conector.

Com base nesse exemplo, foi obtido um valor de Q_m igual a 0,62 m, o que significa que são necessários 0,62 metros de conectores PERFOCuFRP para suportar a carga de cálculo (P_c). Nessas mesmas condições, é possível determinar a quantidade necessária de conectores PERFOFRPV para suportar a mesma carga de cálculo. Com base nos ensaios de *push-out* realizados no trabalho de Silva (2020) nos espécimes SP-12.70-1.75, nos quais foram ensaiados 2 corpos de prova, foram obtidos os seguintes valores de resistência ao cisalhamento: 30,38 kN

e 34,08 kN. Com base nesses dados experimentais, também foi calculado um valor característico para a resistência dos conectores. Portanto, obteve-se um valor de Q_m igual a 0,52 *metros*, o que significa que são necessários 0,52 *metros* de conectores PERFOFRPV para suportar a carga de cálculo (P_c). É importante ressaltar que os conectores utilizados nesta demonstração, desenvolvidos por Silva (2020), possuem as mesmas características em termos de diâmetro dos furos, espaçamento entre furos geometria e tamanho dos conectores PERFOCuFRP estudados neste trabalho. Portanto, confirma-se que, apesar da menor capacidade de carga dos conectores PERFOCuFRP, é possível utilizar uma quantidade maior de conectores para compensar as forças solicitantes do painel.

Em síntese, foi possível observar que além das características intrínsecas do próprio conector FRP, como o tipo de material, configuração e geometria utilizada, existem outras características que contribuem significativamente para o seu desempenho. Dentre essas características, destacam-se: a ancoragem do conector no concreto, confinamento do conector ao concreto, distribuição dos conectores no painel e aderência do núcleo de isolamento ao concreto. É importante considerar esses fatores para garantir um melhor desempenho nas aplicações nos painéis de parede sanduíche o que faz necessário outros estudos que colaboram com esse conjunto de características para o melhoramento do desempenho dos conectores PERFOCuFRP.

5. CONCLUSÕES

Neste estudo, foram descritas as técnicas utilizadas na fabricação de mantas de fibras curtas de curauá e da produção de conectores de polímero reforçado com fibras curtas de curauá (PERFOCuFRP). Foi realizada uma avaliação da qualidade dos compósitos produzidos para a aplicação em painéis de parede sanduíche de concreto com isolamento incorporado. Os compósitos laminados foram produzidos utilizando uma técnica que emprega um sistema de produção de baixo custo de infusão de resina à vácuo. Para avaliar o comportamento mecânico das conexões conector PERFOCuFRP × concreto, foram realizados ensaios *push-out* em quatorze espécimes de concreto, comparando-os com os encontrados na literatura. Com base nos resultados obtidos, foi possível obter as seguintes conclusões:

1. A variação da gramatura nominal utilizada nos laminados de polímero reforçado com fibras curtas de curauá (CuFRP) exerceu uma influência significativa sobre suas propriedades mecânicas. Conforme a gramatura nominal aumenta, nota-se um acréscimo nas espessuras médias dos laminados, bem como uma tendência de aumento no módulo de elasticidade e na tensão última à tração. Entretanto, é importante ressaltar que a proporção média de fibras não apresenta uma correlação clara com a gramatura nominal, pois variou de forma sutil entre os diferentes compósitos laminados. Isso sugere que, apesar da variação na quantidade de material utilizado, a quantidade de resina consumida também aumentou, o que pode ser justificado pelo aumento da espessura média dos laminados durante o processo de fabricação dos laminados de CuFRP.
2. Dentre as chapas avaliadas, destaca-se a chapa do grupo nominal 3 (CH-GN3), que possui a maior gramatura nominal de 2700 g/m², e apresentou os melhores resultados em termos de tensão última à tração, demonstrando uma maior resistência à ruptura. Além disso, essa chapa também obteve o maior módulo de elasticidade, indicando a maior rigidez dentre as outras chapas de CuFRP.
3. As chapas de polímero reforçado com fibras longas de curauá (CuLFRP) revelou que o tratamento químico aplicado às fibras resultou em melhorias em suas propriedades mecânicas. Ao analisar as propriedades médias do compósito, verificou-se que as chapas submetidas ao tratamento químico (CHFT) apresentaram resultados distintos das chapas não tratadas (CHFNT). Especificamente, os valores médios de tensão última à tração e módulo de elasticidade foram superiores nas chapas que receberam o tratamento

químico. Observou-se uma diferença de 9,81% na tensão última à tração e 20,76% no módulo de elasticidade entre as chapas. Esses resultados demonstram que o tratamento químico aplicado às fibras de curauá foi eficiente em aprimorar as propriedades mecânicas da chapa de CuLFRP.

4. Foi realizada uma análise estatística em três níveis para avaliar a qualidade da produção dos laminados de CuFRP. Ao observar os coeficientes de variação, verificou-se a necessidade de abordagens estatísticas adicionais. No segundo nível de análise, constatou-se que a distribuição normal dos dados para a propriedade de tensão última à tração, considerada a mais importante, foi homogênea entre as chapas dos diferentes grupos nominais. Contudo, para as outras propriedades, foi verificada a existência de características não homogêneas entre as chapas com diferentes gramaturas nominais. Com o objetivo de comparar as chapas em um cenário ideal de qualidade de produção com os resultados obtidos, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) e um teste de simultaneidade de Tukey no terceiro nível de análise. Esta análise incluiu todas as chapas, bem como as chapas separadas por grupo nominal. Verificou-se que a hipótese alternativa da propriedade de tensão última à tração na combinação CH-GN2 & CH-GN1 não foi validada, pois não apresentaram diferenças significativas entre si. No entanto, as combinações CH-GN3 & CH-GN2 e CH-GN3 & CH-GN1 apresentaram diferenças significativas entre as médias desses grupos para a propriedade de tensão última à tração, demonstrando uma diferença significativa entre as chapas de maior gramatura nominal e as de menor gramatura nominal.
5. A disposição e a natureza das fibras influenciaram a orientação das fissuras ocorridas nos conectores PERFOCuFRP. Neste estudo, as fibras foram distribuídas manualmente, o que resultou no aparecimento de fissuras em áreas com menor quantidade de fibras, falhas ou menor ductilidade. Em comparação com os conectores GFRP elaborados nos trabalhos de Silva (2020) e Lameiras (2015), a ruptura das conexões conector PERFOCuFRP × concreto ocorreu de forma mais dúctil. Esse comportamento foi observado até o momento em que as conexões atingiram o limite dos LVDTs. Os experimentos realizados por esses autores mostraram um comportamento rígido das conexões conectores GFRP × concreto feitas com conectores perfurados de CSM de fibra de vidro (PERFOFRP). Além disso, esses autores observaram pequenos deslocamentos correspondentes à carga de pico dos conectores devido ao cisalhamento. Portanto, a disposição e a natureza das fibras influenciaram no comportamento

mecânico das conexões, sendo importante levá-las em consideração ao prever o comportamento mecânico das conexões conector PERFOCuFRP × concreto.

6. Com base na análise dos resultados do ensaio *push-out*, foi verificado que os espécimes ESC-GN3, que utilizaram conectores PERFOCuFRP de gramatura nominal de 2700 g/m², apresentaram o melhor desempenho mecânico. A propriedade de capacidade de carga última da conexão conector PERFOCuFRP alcançou um valor médio de 27,34 kN, indicando a resistência máxima que a conexão pode suportar antes da ruptura por cisalhamento.
7. Uma análise comparativa dos resultados dos ensaios *push-out* foi realizada em espécimes de concreto ESC-GN3 com conectores PERFOCuFRP e em espécimes de concreto com conectores perfurados reforçados com fibras de vidro (PERFOFRP), elaborados por outros autores. Os resultados mostraram que a capacidade de carga última, deslocamento correspondente à carga de pico e as propriedades de rigidez das conexões conector PERFOCuFRP × concreto correspondem a 84,82%, 252,97% e 33,29% das conexões SP-12.70-1.75 de Silva (2020); 68,17%, 276,75% e 25,13% das conexões 3H-CSM-WO de Lameiras (2015) e; 41,17%, 15,20% e 21,51% das conexões F-160-4 de Huang e Dai (2019).
8. Foi feita uma comparação entre os conectores PERFOCuFRP utilizados nos painéis sanduíche deste estudo e os conectores PERFOGFRP utilizados em outros estudos semelhantes. Verificou-se que os conectores PERFOCuFRP têm menor resistência, mas ainda podem ser dimensionados adequadamente. Para conseguir isso, uma quantidade maior desses conectores é necessária. Ensaio *push-out* foram realizados para determinar a resistência ao cisalhamento dos conectores PERFOCuFRP e determinar o número de conectores necessários para suportar a carga em um painel sanduíche. Quando comparados aos conectores PERFOGFRP, verificou-se que a menor capacidade de carga dos conectores PERFOCuFRP poderia ser compensada pelo aumento do número de conectores utilizados. Por exemplo, um painel sanduíche de 8,00 m x 3,00 m requer 0,52 m de conectores PERFOGFRP, enquanto requer 0,62 m de conectores PERFOCuFRP. Isso representa apenas um consumo excessivo de 20% da quantidade necessária de conectores GFRP.
9. No estudo em questão, foi constatado que, além das características intrínsecas do conector de cisalhamento, como o tipo de material, configuração e geometria, há outras características que têm influência significativa no desempenho dos conectores. Por essa razão, é necessário realizar estudos adicionais para aprimorar os conectores de

cisalhamento reforçados com fibras vegetais para utilização em painéis de parede sanduíche de concreto.

Em suma, é fundamental levar em conta a gramatura dos conectores reforçados com fibras vegetais, pois ela afeta duas características importantes para o desempenho mecânico das conexões conector PERFOCuFRP × concreto: a distribuição das fibras curtas e aleatórias no interior do conector e a espessura do mesmo, que está diretamente relacionada à gramatura nominal adotada. Portanto, a escolha da gramatura adequada para a produção dos conectores é essencial para garantir um desempenho mecânico satisfatório. Ademais, embora a qualidade das infusões de resina a vácuo e a distribuição das fibras na composição das mantas de fibras curtas de curauá possam variar entre os diferentes níveis avaliados, a produção dos compósitos pode ser aprimorada por meio da fabricação de mantas com intervalos maiores entre as gramaturas nominais estabelecidas no estudo. Isso permitiria a experimentação de novas técnicas de produção de mantas e, conseqüentemente, melhoraria a técnica de distribuição das fibras, resultando, potencialmente, em um cenário mais próximo do ideal em termos de qualidade de produção dos compósitos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE. Panorama dos Resíduos no Brasil 2020. **Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE**, p. 51, 2020.

ADVANCED VACUUM. **Advanced Vacuum Hitech Composites**. Disponível em: <<https://www.advancedvacuum.com.br/tecido/fibra-de-vidro>>. Acesso em: 15 mar. 2021.

ALMEIDA JÚNIOR, J. H. S. *et al.* Study of hybrid intralaminar curaua/glass composites. **Materials & Design**, v. 42, p. 111–117, dez. 2012.

ALMEIDA, J. H. S. *et al.* Hybridization effect on the mechanical properties of curaua/glass fiber composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 55, p. 492–497, dez. 2013.

ALSUBARI, S. *et al.* Potential of natural fiber reinforced polymer composites in sandwich structures: A review on its mechanical properties. **Polymers**, v. 13, n. 3, p. 1–20, 2021.

ANGRIZANI, C. A. *et al.* Influência Do Comprimento Da Fibra De Sisal E Do Seu Tratamento Químico Nas Propriedades De Compósitos Com Poliéster. **17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, n. September, p. 1–11, 2006.

ARAUJO, M. *et al.* Curaua leaf fiber (*Ananas comosus* var. *erectifolius*) reinforcing poly (lactic acid) biocomposites: Formulation and performance. *Polymer Composites*, v. 36, n. 8, p. 1520–1530, ago. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16889: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, Brasil, 2020. Disponível em: <<https://www.target.com.br/produtos/normas-tecnicas/45497/nbr16889-concreto-determinacao-da-consistencia-pelo-abatimento-do-tronco-de-cone>>. Acesso em: 7 ago. 2023

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, Brasil, 2018. Disponível em: <<https://www.target.com.br/produtos/normas-tecnicas/36306/nbr5739-concreto-ensaio-de-compressao-de-corpos-de-prova-cilindricos>>. Acesso em: 7 ago. 2023

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR14931: Execução de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, Brasil, 2004. Disponível em: <<https://www.target.com.br/produtos/normas-tecnicas/27279/nbr14931-execucao-de-estruturas-de-concreto-armado-protendido-e-com-fibras-requisitos>>. Acesso em: 7 ago. 2023

ASTM. **ASTM D2584 - Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resin**. West Conshohocken, 2018. Disponível em: <<https://www.en-standard.eu/astm-d2584-18-standard-test-method-for-ignition-loss-of-cured-reinforced-resins/>>. Acesso em: 6 out. 2022

ASTM. **ASTM D3039/D3039M - Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. West Conshohocken, 2017. Disponível em: <<https://webstore.ansi.org/standards/astm/astmd3039d3039m00?gclid=Cj0KCQjw37iTBhC>>

WARIsACBt1IzZojXa-TfKvlpNOBTZvj8In4bEtGW0jtATkPaFd1P3NjULc639d-4aAlxAEALw_wcB>. Acesso em: 1 maio. 2022

ASTM. **ASTM D638 - Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**. West Conshohocken, 2022. Disponível em: <<https://www.astm.org/Standards/D638>>. Acesso em: 30 mar. 2021.

AZEVEDO, M. P. **Estudo do comportamento de painéis sandwich com conectores em GFRP**. Ensaios à escala real. Dissertação de Mestrado—Portugal: Universidade do Minho, 2013.

AZWA, Z. N. *et al.* A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres. **Materials and Design**, v. 47, p. 424–442, 2013.

BAKIS, C. E. *et al.* Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction - State-of-the-Art Review. **Perspectives in Civil Engineering: Commemorating the 150th Anniversary of the American Society of Civil Engineers**, v. 6, n. May, p. 369–383, 2003.

BELTRAMI, L. V. R.; SCIENZA, L. C.; ZATTERA, A. J. Efeito do tratamento alcalino de fibras de curauá sobre as propriedades de compósitos de matriz biodegradável. **Polimeros**, v. 24, n. 3, p. 388–394, 2014.

BERNARDI, S. T. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida kevlar**. Dissertação de Mestrado—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

BESSA, J. *et al.* Influence of surface treatments on the mechanical properties of fibre reinforced thermoplastic composites. **Procedia Engineering**, v. 200, p. 465–471, 2017.

BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose based fibres. **Progress in Polymer Science**, v. 24, n. 2, p. 221–274, 1 maio 1999.

BORSOI, C.; SCIENZA, L. C.; ZATTERA, A. J. Characterization of composites based on recycled expanded polystyrene reinforced with curaua fibers. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 128, n. 1, p. 653–659, 2013.

BOUMAAZA, M.; BELAADI, A.; BOURCHAK, M. The Effect of Alkaline Treatment on Mechanical Performance of Natural Fibers-reinforced Plaster: Optimization Using RSM. **Journal of Natural Fibers**, v. 00, n. 00, p. 1–21, 2020.

BURAKOWSKI, L.; REZENDE, M. C. Modificação da rugosidade de fibras de carbono por método químico para aplicação em compósitos poliméricos. **Polímeros**, v. 11, p. 51–57, jun. 2001.

CALDAS, B. G. S. **Estrutura sanduíche de matriz poliéster reforçado com tecido de sisal conformado por infusão a vácuo**. Dissertação de Mestrado—Bahia, Brasil: Universidade Federal da Bahia, 20 jun. 2016

CÂNDIDO, G. M.; ALMEIDA, S. F. M.; REZENDE, M. C. Processing of advanced structural polymeric composite laminates with molded edges (in portuguese). **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 10, n. n1, p. 31–41, 2000.

CARVALHO, F. *et al.* Polyaniline and magnetite on curaua fibers for molecular interface improvement with a cement matrix. **Journal of Molecular Structure**, v. 1233, p. 130101, 5 jun. 2021.

CERCHIARO, J. R. **Comportamento mecânico de compósitos com poliéster e tecidos de sisal por moldagem manual**. Dissertação de Mestrado—Salvador, Brasil: Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 11 jan. 2016.

CHAND, S. Carbon fibers for composites. **Journal of Materials Science**, v. 35, n. 6, p. 1303–1313, 2000.

CHANDEKAR, H.; CHAUDHARI, V.; WAIGAONKAR, S. A review of jute fiber reinforced polymer composites. **Materials Today: Proceedings**, v. 26, p. 2079–2082, 2020.

CHEGDANI, F. *et al.* Effect of flax fiber orientation on machining behavior and surface finish of natural fiber reinforced polymer composites. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 54, n. November 2018, p. 337–346, 2020.

CHEN, A. *et al.* Experimental investigation and finite element analysis of flexural behavior of insulated concrete sandwich panels with FRP plate shear connectors. **Engineering Structures**, v. 98, p. 95–108, 1 set. 2015.

CHEN, D. *et al.* Shear Behavior of FRP Connectors in Precast Sandwich Insulation Wall Panels. **Buildings**, v. 12, n. 8, p. 1095, ago. 2022.

CHOI, I. *et al.* Effects of grid-type shear connector arrangements used for insulated concrete sandwich wall panels with a low aspect ratio. **Journal of Building Engineering**, v. 46, p. 103754, 1 abr. 2022.

CHOI, I.; KIM, J.; YOU, Y.-C. Effect of cyclic loading on composite behavior of insulated concrete sandwich wall panels with GFRP shear connectors. **Composites Part B: Engineering**, v. 96, p. 7–19, 1 jul. 2016.

CHOI, W.; JANG, S.-J.; YUN, H.-D. Design properties of insulated precast concrete sandwich panels with composite shear connectors. **Composites Part B: Engineering**, v. 157, p. 36–42, 15 jan. 2019.

CZŁONKA, S. *et al.* Bio-Based Rigid Polyurethane Foam Composites Reinforced with Bleached Curauá Fiber. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 22, n. 20, p. 11203, jan. 2021.

D'ALMEIDA, A.; TOLEDO FILHO, R.; MELO FILHO, J. Cement composites reinforced by short curaua fibers. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 15, p. 151–156, 2010.

DE AZEVEDO, A. R. G. *et al.* Natural Fibers as an Alternative to Synthetic Fibers in Reinforcement of Geopolymer Matrices: A Comparative Review. **Polymers**, v. 13, n. 15, p. 2493, jan. 2021.

DE FÁTIMA V. MARQUES, M. *et al.* Improvement of mechanical properties of natural fiber-polypropylene composites using successive alkaline treatments. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 132, n. 12, p. 1–12, 2015.

DE OLIVEIRA, R. B. **Desempenho térmico de uma edificação com painéis sanduiche produzidos com diferentes conectores**. Dissertação de Mestrado—Brasília: Universidade de Brasília, 2023.

DEL PINO, G. G. *et al.* Hybrid epoxy composites made from treated curauá fibres and organophilic clay. **Journal of Composite Materials**, v. 55, n. 1, p. 57–69, 2021.

DIPROFIBER. **Fibras de Vidro - Tipos de Fibras de Vidro**. Disponível em: <<https://diprofiber.com.br/fibra-de-vidro/>>. Acesso em: 15 mar. 2021.

DUPONT. **DuPont™ Kevlar®**. Disponível em: <<https://www.dupont.com.br/brands/kevlar.html>>. Acesso em: 4 jun. 2023.

EGBON, B.; TOMLINSON, D. Experimental investigation of longitudinal shear transfer in insulated concrete wall panels with notched insulation. **Journal of Building Engineering**, v. 43, p. 103173, 1 nov. 2021.

EUROCODE. EN 1994-1-1. **EUROPEAN STANDARD Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures-Part 1-1: General rules and rules for buildings**. 1994.

FARUK, O. *et al.* Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. **Progress in Polymer Science**, v. 37, n. 11, p. 1552–1596, 2012.

FARUK, O. *et al.* Progress report on natural fiber reinforced composites. **Macromolecular Materials and Engineering**, v. 299, n. 1, p. 9–26, 2014.

FERRARA, G. *et al.* Mechanical Response and Analysis of Cracking Process in Hybrid TRM Composites with Flax Textile and Curauá Fibres. **Polymers**, v. 13, n. 5, p. 715, jan. 2021.

FIBERTEX. **Fibertex - Tecendo Tecnologia**. Disponível em: <<http://www.fibertex.com.br/>>. Acesso em: 18 jan. 2023

GIACOMINI, N. P.; NEIS, A.; LEÃO, A. L. **Unsaturated Polyester Based Composites Reinforced with Curauá Fiber - Preliminary Studies**. Warrendale, PA: SAE International, 1 dez. 2000. Disponível em: <<https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2000-01-3171/>>. Acesso em: 22 jul. 2023

GIESE, A. C. H. **Utilização de argamassa reforçada com têxtil de fibra de vidro álcali resistente para reforço à flexão de vigas de concreto armado**. Dissertação de Mestrado—Porto Alegre, Brasil: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.

GOUDARZI, N. *et al.* Characterization of the shear behavior of Z-shaped steel plate connectors used in insulated concrete panels. **PCI Journal**, v. 61, n. 2, p. 23–37, 2016.

HARNNECKER, F.; SANTOS ROSA, D. DOS; LENZ, D. M. Biodegradable Polyester-Based Blend Reinforced with Curauá Fiber: Thermal, Mechanical and Biodegradation Behaviour. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 20, n. 1, p. 237–244, 2012.

HARRIS, B. **Engineering composite materials**. London: The Institute of Materials, 1999.

HE, Z. *et al.* Experimental and Numerical Investigation of Novel I-Shaped GFRP Connectors for Insulated Precast Concrete Sandwich Wall Panels. **Journal of Composites for Construction**, v. 24, n. 5, p. 04020040, 2020.

HODICKY, K. *et al.* Experimental and Numerical Investigation of the FRP Shear Mechanism for Concrete Sandwich Panels. **Journal of Composites for Construction**, v. 19, n. 5, p. 04014083, 1 out. 2015.

HUANG, J. *et al.* Experimental study on precast concrete sandwich panel with cross-shaped GFRP connectors. **Magazine of Concrete Research**, v. 72, n. 3, p. 149–162, fev. 2020.

HUANG, J. *et al.* Structural performance of a façade precast concrete sandwich panel enabled by a bar-type basalt fiber-reinforced polymer connector. **Frontiers of Structural and Civil Engineering**, 12 jan. 2023.

HUANG, J. Q.; DAI, J. G. Direct shear tests of glass fiber reinforced polymer connectors for use in precast concrete sandwich panels. **Composite Structures**, v. 207, n. September 2018, p. 136–147, 2019

HUANG, J.-Q. *et al.* Structural performance and section optimization of precast concrete sandwich panels with pin-type GFRP connectors. **Advances in Structural Engineering**, v. 24, n. 11, p. 2351–2363, 1 ago. 2021.

JUNIOR, V. *et al.* Mechanical behavior of short curaua fibres as reinforcement of different polymeric composites. **Brasilian Conference on Composite Materials**. São Paulo, Brasil: 18 jan. 2021.

KANNAN, G.; THANGARAJU, R. Evaluation of Tensile, Flexural and Thermal Characteristics on Agro-Waste Based Polymer Composites Reinforced with Banana Fiber/Coconut Shell Filler. **Journal of Natural Fibers**, v. 20, n. 1, p. 2154630, 31 dez. 2023.

KAZEM, H. *et al.* CFRP shear strengthening system for steel bridge girders. **Engineering Structures**, v. 175, p. 415–424, 15 nov. 2018.

KEMERICH, P. D. DA C. *et al.* Fibras de vidro: caracterização, disposição final e impactos ambientais gerados. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, p. 2112–2121, 7 abr. 2013.

KIM, J.; YOU, Y.-C. Composite Behavior of a Novel Insulated Concrete Sandwich Wall Panel Reinforced with GFRP Shear Grids: Effects of Insulation Types. **Materials**, v. 8, n. 3, p. 899–913, mar. 2015.

KONG, S. Y.; YANG, X.; LEE, Z. Y. Mechanical performance and numerical simulation of GFRP-concrete composite panel with circular hollow connectors and epoxy adhesion. **Construction and Building Materials**, v. 184, p. 643–654, 2018.

KOOHESTANI, B. *et al.* Comparison of different natural fiber treatments: a literature review. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 16, n. 1, p. 629–642, 2019.

KU, H. *et al.* A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 42, n. 4, p. 856–873, 2011.

LAMEIRAS, R. *et al.* Development of sandwich panels combining fibre reinforced concrete layers and fibre reinforced polymer connectors. Part I: Conception and pull-out tests. **Composite Structures**, v. 105, p. 446–459, nov. 2013a.

LAMEIRAS, R. *et al.* Development of sandwich panels combining fibre reinforced concrete layers and fibre reinforced polymer connectors. Part II: Evaluation of mechanical behaviour. **Composite Structures**, v. 105, p. 460–470, 1 nov. 2013b.

LAMEIRAS, R. *et al.* Pull-out behaviour of Glass-Fibre Reinforced Polymer perforated plate connectors embedded in concrete. Part I: Experimental program. **Construction and Building Materials**, v. 162, p. 155–169, fev. 2018a.

LAMEIRAS, R. *et al.* Pull-out behaviour of glass-fibre reinforced polymer perforated plate connectors embedded in concrete. Part II: Prediction of load carrying capacity. **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 142–164, 30 abr. 2018b.

LAMEIRAS, R. *et al.* Seismic behaviour of precast sandwich wall panels of steel fibre reinforced concrete layers and fibre reinforced polymer connectors. **Engineering Structures**, v. 237, n. September 2019, p. 112149, 2021.

LAMEIRAS, R. M. *et al.* Caracterização ao corte da ligação entre conector de GFRP e betão auto-compactável reforçado com fibras de aço. **Encontro Nacional de Betão Estrutural**. Portugal: FEUP, out. 2012. Disponível em: <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/>>. Acesso em: 1 maio. 2022

LAMEIRAS, R. M. *et al.* **Caracterização ao corte da ligação entre conector de GFRP e betão auto-compactável reforçado com fibras de aço**. FEUP, out. 2012. Disponível em: <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/>>. Acesso em: 1 maio. 2022

LAMEIRAS, R. M. **Sandwich structural panels comprising thin-walled SFRSCC and GFRP connectors: from material features to structural behaviour**. Doctoral Thesis—Portugal: Universidade do Minho, 2015.

LEE, B. J.; PESSIKI, S. Thermal performance evaluation of precast concrete three-wythe sandwich wall panels. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 8, p. 1006–1014, 2006.

LI, X.; TABIL, L. G.; PANIGRAHI, S. Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: A review. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 15, n. 1, p. 25–33, 2007.

LIMA, J. E. S. *et al.* Estudo preliminar de reforço de material polimérico por meio de fibras de carbono. **Caleidoscópio**, v. 9, n. 1, p. 22–29, 27 jul. 2017.

LOPES, F. P. D. **Estudos adicionais dos compósitos poliméricos reforçados por fibras de curauá**. Dissertação de Mestrado—Campos dos Goytacazes: Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2011.

- LOPES, I. A. F. **Estudo do processo de infusão a vácuo em materiais compósitos: Produção de tampa de bagageira para autocarro.** Dissertação de Mestrado—Porto, Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009
- LORANDI, N. P.; CIOFFI, M. O. H.; ORNAGHI JR, H. Análise Dinâmico-Mecânica de Materiais Compósitos Poliméricos. **Scientia cum Industria**, p. 44–55, 2016.
- LOU, X. *et al.* Shear behavior of stainless-steel plate connectors for insulated precast concrete sandwich panels. **Structures**, v. 44, p. 1046–1056, 1 out. 2022.
- MAK, K.; FAM, A.; MACDOUGALL, C. Flexural Behavior of Sandwich Panels with Bio-FRP Skins Made of Flax Fibers and Epoxidized Pine-Oil Resin. **Journal of Composites for Construction**, v. 19, n. 6, p. 04015005, 1 dez. 2015.
- MANIGANDAN, S. *et al.* Characterization of polyurethane coating on high performance concrete reinforced with chemically treated Ananas erectifolius fiber. **Progress in Organic Coatings**, v. 150, n. July 2020, p. 105977, 2021.
- MARINUCCI, G. **Materiais Compósitos Poliméricos: Fundamentos e Tecnologia.** São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2011.
- MARQUES, M. DE F. V. *et al.* Improvement of mechanical properties of natural fiber–polypropylene composites using successive alkaline treatments. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 132, 1 dez. 2014.
- MARTEL, W. **Estudo da interface de fibras de curauá em diferentes matrizes cimentícias.** Dissertação de Mestrado—Rio de Janeiro, Brazil: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RIO), 29 mar. 2019.
- MCCALL, C. W. Thermal Properties of Sandwich Panels. **Concrete International**, v. 7, n. 1, p. 35–41, 1 jan. 1985.
- MENDONÇA, P. DE T. R. **Materiais Compostos e Estruturas-Sanduíche: Projeto e Análise.** 1. ed. Barueri-SP: Editora Manole, 2003.
- MINILLO, L. Q. *et al.* Materials Today : Proceedings Design of nautical cleat for small – medium boats using hybrid curaua – glass fiber – reinforced epoxy. v. 34, p. 341–349, 2021.
- MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; DRZAL, L. T. Surface modifications of natural fibers and performance of the resulting biocomposites: An overview. **Composite Interfaces**, v. 8, n. 5, p. 313–343, 2001.
- MONTEIRO, S. N.; AQUINO, R. C. M. P.; LOPES, F. P. D. Performance of curaua fibers in pullout tests. **Journal of Materials Science**, v. 43, n. 2, p. 489–493, 2008.
- MOURA, M. F. S. F. DE; MORAIS, A. B. DE; MAGALHÃES, A. G. **Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico.** 1o ed. Porto, Portugal: Publindústria, 2006.
- MUNTEANU, V. *et al.* Application of Modern Polymeric Composite Materials in Industrial Construction. **Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy**, v. LVI, n. Lx, p. 121–130, 2010.

NAGAVALLY, R. R. Composite Materials - History, Types, Fabrication Techniques, Advantages, and Applications. **International Journal of Mechanical and Production Engineering**, v. 5, n. 9, p. 82–87, 2017.

NAGLIS, M. M. M.; D'ALMEIDA, J. R. M. Avaliação dos modos de falha sob impacto de compósitos de matriz polimérica reforçados por fibras. **Polímeros**, v. 8, p. 54–60, mar. 1998.

NAITO, C. *et al.* Performance and characterization of shear ties for use in insulated precast concrete sandwich wall panels. **Journal of Structural Engineering**, v. 138, n. 1, p. 52–61, 2012.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. Compósitos estruturais: ciência e tecnologia. 1º ed. São Paulo, Brasil: Blucher, 2006.

NETO, M. **Obtenção, caracterização e utilização de um compósito com matriz de resina poliéster e carga de fibras de sisal.** Tese de Doutorado — Natal, Brasil: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 4 mar. 2016.

O'HEGARTY, R.; KINNANE, O. Review of precast concrete sandwich panels and their innovations. **Construction and Building Materials**, v. 233, p. 117145, 10 fev. 2020.

O'HEGARTY, R. *et al.* Composite behaviour of fibre-reinforced concrete sandwich panels with FRP shear connectors. **Engineering Structures**, v. 198, p. 109475, 1 nov. 2019.

OLIVEIRA, F. H. **Avaliação comparativa de compósitos unidirecionais de poliéster com fibras de vidro ou de curauá.** Dissertação de Mestrado—Rio Grande do Norte: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2015.

OMRANI, E.; MENEZES, P. L.; ROHATGI, P. K. State of the art on tribological behavior of polymer matrix composites reinforced with natural fibers in the green materials world. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 19, n. 2, p. 717–736, 2016.

PALED, A.; BENTUR, A.; MOBASHER, B. **Textile Reinforced Concrete.** London: CRC Press, 2017.

PCI COMMITTEE REPORT. State-of-the-art of precast/prestressed sandwich wall panels. **PCI Journal**, v. 42, n. 2, p. 92–134, 2011.

PESSIKI, S.; MLYNARCZYK, A. Experimental Evaluation of the precast concrete walls. **PCI Journal**, 2003. Disponível em: <http://www.pci.org/uploadedFiles/Siteroot/Publications/PCI_Journal/2003/DOI_Articles/jl-03-march-april-5.pdf>

PICANCO, M. DE S. **Cementitious composites reinforced with curauá fibers (in Portuguese).** Dissertação de Mestrado—Rio de Janeiro, Brazil: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RIO), 2005.

PIMENTEL-GOMES, F. **Experimental Statistics Course.** 15. ed. Piracicaba: FEALQ, 2009.

PINTO, A. **Fibras de curauá e sisal como reforço em matrizes de solo**. Dissertação de Mestrado—Rio de Janeiro, Brazil: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 31 jan. 2008.

PIRES, E. N. **Efeito do tratamento de superfície em fibras de juta no comportamento mecânico de compósitos de matriz epóxi**. Dissertação de Mestrado — Florianópolis, Brasil: Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

PIRES, E. N. *et al.* Efeito do Tratamento Alcalino de Fibras de Juta no Comportamento Mecânico de Compósitos de Matriz Epóxi. **Polimeros**, v. 22, n. 4, p. 339–344, 2012.

RAHMAN, R.; PUTRA, S. 5 - Tensile properties of natural and synthetic fiber-reinforced polymer composites. **Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites**. p. 81–102, 2019

RAJAK, D. K. *et al.* Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications. **Polymers**, v. 11, n. 10, p. 1667, out. 2019.

REZENDE, M. C.; BOTELHO, E. C. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. **Polímeros**, v. 10, n. 2, p. e4–e10, 2000.

RODRIGUES, J.; SOUZA, J. A.; FUJIYAMA, R. Compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais da Amazônia fabricados por infusão. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 20, p. 946–960, dez. 2015.

ROKBI, M. *et al.* Effect of chemical treatment on flexure properties of natural fiber-reinforced polyester composite. **Procedia Engineering**, v. 10, p. 2092–2097, 2011.

SALGADO, I. **Avaliação do comportamento mecânico de painéis sanduíche com compósitos laminados reforçados com fibra de curauá e núcleo de concreto celular autoclavado**. Dissertação de Mestrado—Rio de Janeiro, Brazil: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RIO), 3 jul. 2019.

SALMON, D. C. *et al.* Full Scale Testing of Precast Concrete Sandwich Panels. **Structural Journal**, v. 94, n. 4, p. 354–362, 1 jul. 1997.

SANTOS, N. S. S. **Análise Experimental e Teórica do Comportamento Mecânico sob Carregamentos Quase-estáticos de Compósitos Reforçados com Fibras Vegetais**. Tese de Doutorado—São Paulo, Brasil: Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 2010.

SCHIAVON, M. A.; REDONDO, S. U. A.; YOSHIDA, I. V. P. Caracterização térmica e morfológica de fibras contínuas de basalto. **Cerâmica**, v. 53, p. 212–217, jun. 2007.

SHI, L. *et al.* Enhancing interfacial performance of epoxy resin composites via in-situ nucleophilic addition polymerization modification of carbon fibers with hyperbranched polyimidazole. **Composites Science and Technology**, v. 201, n. October 2020, p. 108522, 2021.

SHIN, D. H.; KIM, H. J. Composite effects of shear connectors used for lightweight-foamed-concrete sandwich wall panels. **Journal of Building Engineering**, v. 29, n. July 2019, p. 10, 2020.

- SILVA, A. A. X.; KOEHLER, B.; AMICO, S. **Propriedades mecânicas de compósitos aramida/epóxi e aramida/poliéster produzidos por infusão á vácuo**. 15^a Congresso Brasileiro de Polímeros. 27 out. 2019.
- SILVA, F. D. R. **Modelação Dinâmica de um Processo de Infusão a Vácuo**. Dissertação de Mestrado—Porto, Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2016.
- SILVA, F. M. DA. **Caracterização mecânica de um compósito de matriz poliéster insaturado reforçado com fibras de sisal em diferentes orientações utilizando correlação digital de imagens**. Dissertação de Mestrado—Mossoró, Brasil: Universidade Federal Rural do Semiárido, 2 fev. 2018.
- SILVA, H. S. P. DA. **Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras de curauá e híbridos com fibras de vidro**. Dissertação de Mestrado—Porto Alegre, Brasil: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.
- SILVA, J. K. F. **Avaliação experimental sobre o comportamento mecânico de conectores de cisalhamento do tipo PERFOFRP em paredes pré-moldadas de concreto com isolamento incorporado**. Dissertação de Mestrado—Brasília: Universidade de Brasília, 2020.
- SILVA, J. K. F.; RIBEIRO, R. R.; LAMEIRAS, R. DE M. Evaluation of production quality and mechanical behavior of low-cost shear connectors manufactured with perforated GFRP plates. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 14, p. e14301, 7 abr. 2021.
- SILVA, R. V.; AQUINO, E. M. F. Curaua fiber: A new alternative to polymeric composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 27, n. 1, p. 103–112, 2008.
- SILVEIRA, M. V.; CASAGRANDE, M. D. T. Effects of Degradation of Vegetal Fibers on the Mechanical Behavior of Reinforced Sand. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 39, n. 5, p. 3875–3887, 1 jun. 2021.
- SOARES, R. R. *et al.* Influência do tipo de fibra nas propriedades de compósitos processados por moldagem por transferência de resina. **9º Congresso Brasileiro de Polímeros**. Rio Grande do Sul, Brasil: 2007.
- SOLTAN, D. G. *et al.* Introducing a curauá fiber reinforced cement-based composite with strain-hardening behavior. **Industrial Crops & Products**, v. 103, p. 1–12, 2017.
- SPINACÉ, M. A. S. *et al.* Characterization of lignocellulosic curaua fibres. **Carbohydrate Polymers**, v. 77, n. 1, p. 47–53, 2009.
- SPINACÉ, M. A. S. *et al.* Poliolefinas reforçadas com fibras vegetais curtas: sisal × curauá. **Polímeros**, v. 21, n. 3, p. 168–174, 17 jun. 2011.
- SRINIVAS, K.; LAKSHUMU NAIDU, A.; RAJU BAHUBALENDRUNI, M. V. A. A review on chemical and mechanical properties of natural fiber reinforced polymer composites. **International Journal of Performability Engineering**, v. 13, n. 2, p. 189–200, 2017.
- SZABÓ, J. S.; CZIGÁNY, T. Static fracture and failure behavior of aligned discontinuous mineral fiber reinforced polypropylene composites. **Polymer Testing**, v. 22, n. 6, p. 711–719, 1 set. 2003.

TAJ, S.; MUNAWAR, M. A.; KHAN, S. Natural fiber-reinforced polymer composites NATURAL FIBER-REINFORCED POLYMER COMPOSITES. **Pakistan Academy of sciences**, n. January 2007, p. 129–144, 2007.

TEIXEIRA, F. P.; DE ANDRADE SILVA, F. On the use of natural curauá reinforced cement based composites for structural applications. **Cement and Concrete Composites**, v. 114, p. 103775, 1 nov. 2020.

TEIXEIRA, L. A. **O efeito da modificação química das fibras de curauá nas propriedades morfológicas, térmicas e mecânicas de compósitos de poliéster**. Dissertação de Mestrado—Brasília: Universidade de Brasília, 9 ago. 2019

TEIXEIRA, R. S. *et al.* Extrudability of cement-based composites reinforced with curauá (*Ananas erectifolius*) or polypropylene fibers. **Construction and Building Materials**, v. 205, p. 97–110, 2019.

TOMLINSON, D. G.; TEIXEIRA, N.; FAM, A. New Shear Connector Design for Insulated Concrete Sandwich Panels Using Basalt Fiber-Reinforced Polymer Bars. **Journal of Composites for Construction**, v. 20, n. 4, p. 04016003, 1 ago. 2016.

TOMLINSON, D.; FAM, A. Analytical approach to flexural response of partially composite insulated concrete sandwich walls used for cladding. **Engineering Structures**, v. 122, p. 251–266, 1 set. 2016b.

TOMLINSON, D.; FAM, A. Combined Loading Behavior of Basalt FRP-Reinforced Precast Concrete Insulated Partially-Composite Walls. **Journal of Composites for Construction**, v. 20, n. 3, p. 04015060, 1 jun. 2016a.

TOMLINSON, D.; FAM, A. Experimental Investigation of Precast Concrete Insulated Sandwich Panels with Glass Fiber-Reinforced Polymer Shear Connectors. **Structural Journal**, v. 111, n. 3, p. 595–606, 1 maio 2014.

VALENTE, I.; CRUZ, P. J. S. Experimental analysis of Perfobond shear connection between steel and lightweight concrete. **Journal of Constructional Steel Research**, Eurosteel 2002 Third European Conference on Steel Structures. v. 60, n. 3, p. 465–479, 1 mar. 2004.

VELOSO, F. *et al.* Polyaniline and magnetite on curaua fibers for molecular interface improvement with a cement matrix. **Journal of Molecular Structure**, v. 1233, p. 130101, 2021.

VENKATARAJAN, S.; ATHIJAYAMANI, A. An overview on natural cellulose fiber reinforced polymer composites. **Materials Today: Proceedings**, International Conference on Newer Trends and Innovation in Mechanical Engineering: Materials Science. v. 37, p. 3620–3624, 1 jan. 2021.

VIDRADO. **Tipos de fibras de vidro**. Disponível em: <<https://vidrado.com/noticias/artigos/tipos-de-fibras-de-vidro/>>. Acesso em: 4 jun. 2023.

WANG, H. *et al.* Application of Wall and Insulation Materials on Green Building: A Review. **Sustainability**, v. 10, n. 9, p. 3331, set. 2018.

WOLTMAN, G.; NOEL, M.; FAM, A. Experimental and numerical investigations of thermal properties of insulated concrete sandwich panels with fiberglass shear connectors. **Energy and Buildings**, v. 145, p. 22–31, jun. 2017.

WOLTMAN, G.; TOMLINSON, D.; FAM, A. Investigation of Various GFRP Shear Connectors for Insulated Precast Concrete Sandwich Wall Panels. **Journal of Composites for Construction**, v. 17, n. 5, p. 711–721, 1 out. 2013.

XIE, J. *et al.* Flexural behaviour of full-scale precast recycled concrete sandwich panels with BFRP connectors. **Journal of Building Engineering**, v. 56, p. 104816, 15 set. 2022.

ZAH, R. *et al.* Curauá fibers in the automobile industry - a sustainability assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 15, n. 11–12, p. 1032–1040, 2007.

ZUKOWSKI, B. *et al.* Mechanical Properties of Hybrid PVA–Natural Curaua Fiber Composites. **Materials**, v. 15, n. 8, p. 2808, jan. 2022.

APÊNDICE A

Apêndice A - Resultados individuais dos ensaios de tração nos compósitos

Corpos de prova (amostras)	Chapas e Resina	Grupo Nominal	Espessura (mm)	Largura (mm)	Área Transversal (mm ²)	Força Máx. (kN)	$\sigma_{pt.u}$ (MPa)	Equação da Reta	Deformação na ruptura $\mu\epsilon$ (mm/mm)	Deformação na Ruptura (%)	$\sigma_{pt.25\%}$ (MPa)	$\sigma_{pt.50\%}$ (MPa)	$\sigma_{pt.50\%} - \sigma_{pt.25\%}$ (MPa)	$\mu\epsilon_{pt.25\%}$ (mm/mm)	$\mu\epsilon_{pt.50\%}$ (mm/mm)	$\mu\epsilon_{pt.50\%} - \mu\epsilon_{pt.25\%}$ (mm/mm)	E_{pt} (GPa)	Proporção de fibras (%)
CP14A	CH14	CH-GN1	5,51	25,56	140,90	1,69	11,98	y = 0,0026x - 0,0353	4623,19	0,46%	3,10	6,06	2,96	1196,20	2343,20	1147,00	2,58	33,28%
CP14B	CH14	CH-GN1	6,01	25,18	151,28	3,15	20,85	y = 0,0035x + 0,82	5721,55	0,57%	5,25	10,42	5,18	1261,74	2621,80	1360,06	3,81	30,29%
CP14C	CH14	CH-GN1	6,53	25,23	164,71	3,87	23,47	y = 0,0046x + 0,2895	5038,94	0,50%	5,87	11,80	5,93	1179,80	2425,20	1245,40	4,76	25,77%
CP14D	CH14	CH-GN1	5,53	25,42	140,45	3,75	26,73	y = 0,0048x + 0,8597	5388,91	0,54%	6,81	13,47	6,66	1147,04	2572,60	1425,56	4,67	29,30%
CP14E	CH14	CH-GN1	7,10	25,00	177,38	4,97	28,04	y = 0,0049x + 0,0327	5716,7	0,57%	7,11	14,11	7,00	1343,66	2785,60	1441,94	4,85	23,67%
CP14F	CH14	CH-GN1	6,88	25,10	172,61	4,04	23,40	y = 0,0052x + 1,2939	4250,57	0,43%	5,89	11,73	5,83	786,54	2015,40	1228,86	4,75	23,61%
CP14G	CH14	CH-GN1	6,54	25,00	163,45	4,29	26,26	y = 0,0044x + 1,4826	5632,2	0,56%	6,60	13,19	6,60	1097,88	2425,20	1327,32	4,97	24,15%
CP14H	CH14	CH-GN1	4,25	25,30	107,63	2,11	19,56	y = 0,0042x + 0,6613	4500,87	0,45%	5,01	9,92	4,91	1032,32	2146,60	1114,28	4,41	41,43%
CP14I	CH14	CH-GN1	4,38	25,00	109,48	2,36	21,56	y = 0,0043x + 0,9685	4788,34	0,48%	5,58	10,97	5,39	1032,32	2163,00	1130,68	4,77	41,36%
CP14J	CH14	CH-GN1	4,95	25,00	123,80	3,17	25,64	y = 0,004x + 0,6994	6234,48	0,62%	6,49	12,90	6,41	1441,98	2933,20	1491,22	4,30	34,00%
CP14K	CH14	CH-GN1	7,07	25,00	176,73	4,81	27,23	y = 0,0044x + 0,5453	6064,03	0,61%	6,91	13,70	6,79	1392,82	2965,80	1572,98	4,32	23,68%
CP14M	CH14	CH-GN1	6,65	24,60	163,47	4,50	27,51	y = 0,0051x + 1,8251	5035,44	0,50%	7,03	13,88	6,85	901,24	2195,80	1294,56	5,29	24,56%
CP15B	CH15	CH-GN2	5,25	25,00	131,33	3,14	23,94	y = 0,0049x + 0,9702	4686,91	0,47%	6,04	12,01	5,96	983,18	2179,40	1196,22	4,99	36,13%
CP15C	CH15	CH-GN2	5,30	25,10	132,93	2,92	21,96	y = 0,0048x + 0,7128	4427,23	0,44%	5,51	11,02	5,51	934,02	2048,20	1114,18	4,95	36,43%
CP15D	CH15	CH-GN2	6,97	25,20	175,74	4,95	28,19	y = 0,0058x + 1,7609	4556,6	0,46%	7,06	14,12	7,06	852,08	2081,00	1228,92	5,75	28,08%
CP15E	CH15	CH-GN2	9,97	26,00	259,25	4,02	15,50	y = 0,0044x + 0,9428	3308,36	0,33%	3,92	7,81	3,88	655,44	1458,36	802,92	4,84	18,30%
CP15F	CH15	CH-GN2	6,86	25,90	177,62	4,18	23,54	y = 0,0059x + 0,6109	3886,07	0,39%	5,93	11,74	5,81	901,24	1884,40	983,16	5,91	26,97%
CP15G	CH15	CH-GN2	7,29	25,40	185,27	5,68	30,64	y = 0,0089x + 3,0819	3096,29	0,31%	7,69	15,37	7,69	507,98	1261,74	753,76	10,20	25,00%
CP15H	CH15	CH-GN2	6,47	25,80	166,80	3,45	20,67	y = 0,0047x + 0,1744	4361,79	0,44%	5,24	10,43	5,18	1097,88	2228,60	1130,72	4,58	28,04%
CP15I	CH15	CH-GN2	11,59	25,50	295,62	5,65	19,10	y = 0,0047x - 0,2989	4127,01	0,41%	4,78	9,60	4,82	1048,72	2015,40	966,68	4,98	15,92%
CP15J	CH15	CH-GN2	6,96	25,60	178,18	3,45	19,35	y = 0,0057x - 0,1238	3417,24	0,34%	4,91	9,71	4,80	884,86	1769,70	884,84	5,42	25,92%
CP15K	CH15	CH-GN2	11,30	25,40	286,97	5,23	18,22	y = 0,005x - 1,2656	3897,27	0,39%	4,57	9,11	4,54	1278,12	2146,60	868,48	5,22	16,14%
CP15M	CH15	CH-GN2	10,78	25,40	273,79	6,02	22,00	y = 0,0043x - 0,9464	5335,43	0,53%	5,57	11,04	5,46	1638,62	2867,60	1228,98	4,44	17,37%
CP16A	CH16	CH-GN2	7,70	26,06	200,80	5,83	29,03	y = 0,0075x + 0,7415	3771,71	0,38%	7,35	14,59	7,24	835,70	1851,64	1015,94	7,13	28,70%
CP16B	CH16	CH-GN2	7,77	25,82	200,55	7,27	36,27	y = 0,0055x - 0,145	6620,53	0,66%	9,13	18,21	9,08	1704,16	3342,80	1638,64	5,54	28,81%
CP16C	CH16	CH-GN2	7,14	25,08	179,17	6,25	34,86	y = 0,0068x - 0,0127	5128,4	0,51%	8,80	17,60	8,80	1245,34	2589,00	1343,66	6,55	31,55%
CP16D	CH16	CH-GN2	8,13	24,58	199,71	5,92	29,65	y = 0,0044x - 0,4929	6849,55	0,68%	7,44	14,87	7,44	1884,40	3473,80	1589,40	4,68	28,41%
CP16E	CH16	CH-GN2	9,12	26,40	240,69	8,37	34,78	y = 0,0057x + 1,3627	5863,37	0,59%	8,71	17,46	8,75	868,46	2785,60	1917,14	4,56	23,50%
CP16F	CH16	CH-GN2	7,45	27,10	201,81	7,40	36,65	y = 0,0042x - 0,1797	8767,95	0,88%	9,27	16,79	7,51	2310,40	4014,60	1704,20	4,41	28,69%
CP16G	CH16	CH-GN2	7,57	26,00	196,74	7,80	39,66	y = 0,0058x + 1,2076	6629,47	0,66%	9,93	19,85	9,93	1376,44	3244,40	1867,96	5,31	28,92%
CP16I	CH16	CH-GN2	7,42	27,00	200,34	7,48	37,32	y = 0,0067x + 0,0594	5561,44	0,56%	9,44	18,79	9,34	1114,26	2392,40	1278,14	7,31	29,32%
CP16J	CH16	CH-GN2	8,95	26,50	237,15	8,59	36,20	y = 0,0061x + 2,7336	5487	0,55%	9,18	18,19	9,01	966,78	2458,00	1491,22	6,04	24,39%
CP16L	CH16	CH-GN2	9,57	25,40	242,95	9,86	40,57	y = 0,0054x + 1,023	7324,11	0,73%	10,26	20,35	10,09	1671,38	3457,40	1786,02	5,65	22,06%
CP24A	CH24	CH-GN1	6,36	25,52	162,42	2,86	17,60	y = 0,005x + 0,1354	3492,76	0,35%	4,45	8,83	4,38	868,46	1704,16	835,70	5,25	25,39%
CP24B	CH24	CH-GN1	5,28	25,45	134,29	2,71	20,15	y = 0,0072x - 0,8409	2915,38	0,29%	5,08	8,18	3,11	835,70	1163,42	327,72	9,48	31,88%
CP24C	CH24	CH-GN1	5,90	25,07	147,99	3,17	21,45	y = 0,0059x - 0,3385	3692,49	0,37%	5,43	10,93	5,50	983,18	1884,40	901,22	6,10	27,32%
CP24D	CH24	CH-GN1	6,82	25,42	173,28	3,76	21,72	y = 0,0048x + 0,8284	4352,82	0,44%	5,46	10,92	5,46	950,40	2015,40	1065,00	5,13	23,49%
CP24F	CH24	CH-GN1	6,63	25,36	168,08	4,43	26,33	y = 0,0035x + 0,9618	7247,08	0,72%	6,60	13,25	6,66	1573,08	3441,00	1867,92	3,56	22,37%

CP24G	CH24	CH-GN1	5,47	25,11	137,30	4,40	32,08	$y = 0,0053x + 1,1243$	5841,07	0,58%	8,22	16,23	8,00	1163,42	2752,80	1589,38	5,03	28,05%
CP24H	CH24	CH-GN1	7,00	25,44	178,13	3,60	20,22	$y = 0,0044x + 0,8964$	4390,83	0,44%	5,08	10,11	5,03	884,86	2048,20	1163,34	4,32	22,76%
CP24I	CH24	CH-GN1	6,51	25,42	165,37	3,29	19,87	$y = 0,0036x - 0,0147$	5523,35	0,55%	4,98	9,97	4,98	1409,22	2785,60	1376,38	3,62	24,92%
CP25A	CH25	CH-GN2	7,60	26,14	198,61	5,46	27,51	$y = 0,0073x + 2,0754$	3483,51	0,35%	6,97	13,93	6,97	589,90	1425,60	835,70	8,34	23,60%
CP25B	CH25	CH-GN2	6,03	25,20	151,97	3,98	26,17	$y = 0,0037x + 0,2431$	7008,15	0,70%	6,63	13,12	6,49	1655,00	3523,00	1868,00	3,48	30,94%
CP25C	CH25	CH-GN2	7,26	26,86	194,98	4,30	22,07	$y = 0,0031x - 0,2981$	7215,38	0,72%	5,53	11,06	5,53	1900,80	3686,80	1786,00	3,10	25,87%
CP25D	CH25	CH-GN2	5,46	24,70	134,94	3,14	23,30	$y = 0,0063x - 0,1925$	3728,25	0,37%	5,88	11,69	5,81	1015,94	1851,64	835,70	6,95	35,28%
CP25E	CH25	CH-GN2	8,86	25,80	228,54	7,59	33,21	$y = 0,0068x + 2,4856$	4517,72	0,45%	8,32	16,65	8,32	770,14	2081,00	1310,86	6,35	20,25%
CP25F	CH25	CH-GN2	7,10	26,00	184,50	6,24	33,80	$y = 0,0068x + 2,4856$	4605,01	0,46%	8,60	16,98	8,38	1392,82	2916,80	1523,98	5,50	24,94%
CP25G	CH25	CH-GN2	9,84	24,80	244,11	5,68	23,25	$y = 0,0035x - 0,9413$	6912,88	0,69%	5,83	11,71	5,88	2081,00	3473,80	1392,80	4,22	23,04%
CP25H	CH25	CH-GN2	8,91	25,00	222,63	5,75	25,82	$y = 0,0043x + 1,6274$	5625,58	0,56%	6,49	12,93	6,44	1065,10	2441,60	1376,50	4,68	20,23%
CP25I	CH25	CH-GN2	9,10	26,00	236,47	6,89	29,12	$y = 0,0051x + 3,3851$	5046,8	0,50%	7,31	14,58	7,27	655,44	1949,96	1294,52	5,62	20,38%
CP25J	CH25	CH-GN2	8,87	26,10	231,53	8,12	35,06	$y = 0,0062x + 0,238$	5616,63	0,56%	8,79	17,66	8,88	1360,06	2736,40	1376,34	6,45	20,73%
CP25K	CH25	CH-GN2	6,67	26,30	175,53	6,34	36,11	$y = 0,0075x + 1,6969$	4587,92	0,46%	9,10	18,08	8,98	802,92	2015,40	1212,48	7,41	26,64%
CP25L	CH25	CH-GN2	6,85	25,90	177,31	5,22	29,43	$y = 0,0067x + 1,8999$	4109,24	0,41%	7,40	14,80	7,40	753,76	1769,70	1015,94	7,28	25,36%
CP26A	CH26	CH-GN2	6,40	25,66	164,16	3,77	22,99	$y = 0,0034x - 0,7225$	6974,38	0,70%	5,82	11,59	5,76	1949,96	3637,80	1687,84	3,41	37,21%
CP26D	CH26	CH-GN2	7,86	25,57	201,00	7,46	37,10	$y = 0,0051x + 0,543$	7167,7	0,72%	9,31	18,68	9,36	1687,78	3555,80	1868,02	5,01	28,53%
CP26E	CH26	CH-GN2	8,28	24,52	202,92	3,04	14,99	$y = 0,0096x - 0,4447$	1607,7	0,16%	3,81	7,52	3,71	426,04	786,54	360,50	10,29	26,55%
CP26F	CH26	CH-GN2	8,19	25,01	204,67	4,36	21,32	$y = 0,0031x - 0,9181$	7174,29	0,72%	5,37	10,74	5,37	2113,80	3621,40	1507,60	3,56	29,02%
CP26G	CH26	CH-GN2	8,62	25,00	215,40	5,53	25,69	$y = 0,002x + 0,0261$	12832,59	1,28%	6,47	12,94	6,47	606,28	1327,28	721,00	8,97	24,90%
CP26H	CH26	CH-GN2	9,05	25,20	228,06	7,45	32,65	$y = 0,006x - 1,1425$	5632,26	0,56%	8,16	16,41	8,25	1523,92	2916,80	1392,88	5,92	24,14%
CP26I	CH26	CH-GN2	9,33	25,50	237,97	7,60	31,93	$y = 0,0042x + 1,8757$	7156,53	0,72%	8,04	16,07	8,04	1441,98	3097,00	1655,02	4,86	23,85%
CP26J	CH26	CH-GN2	7,42	25,60	190,05	5,85	30,78	$y = 0,0083x + 2,6973$	3383,09	0,34%	7,76	15,47	7,71	540,74	1491,14	950,40	8,11	29,53%
CP26K	CH26	CH-GN2	9,09	25,10	228,03	6,54	28,68	$y = 0,0059x + 0,9324$	4703,73	0,47%	7,18	14,41	7,23	901,24	2179,40	1278,16	5,65	24,46%
CP26L	CH26	CH-GN2	9,53	25,10	239,20	6,28	26,24	$y = 0,0049x + 2,2163$	4902,72	0,49%	6,63	13,18	6,55	737,38	2146,60	1409,22	4,65	23,69%
CP26M	CH26	CH-GN2	7,65	25,70	196,58	5,81	29,55	$y = 0,0061x + 1,7216$	4561,77	0,46%	7,40	14,90	7,50	934,02	2031,80	1097,78	6,84	28,51%
CP26N	CH26	CH-GN2	8,02	26,00	208,57	6,47	31,02	$y = 0,0058x + 2,1321$	4980,59	0,50%	7,90	15,56	7,66	852,08	2212,20	1360,12	5,63	27,03%
CP35A	CH35	CH-GN2	6,41	27,06	173,51	3,14	18,12	$y = 0,0093x + 0,8444$	1857,25	0,19%	4,57	9,09	4,51	360,50	901,24	540,74	8,35	32,55%
CP35B	CH35	CH-GN2	6,51	25,14	163,74	5,19	31,69	$y = 0,0069x + 2,5634$	4220,63	0,42%	7,95	15,90	7,95	671,84	1835,26	1163,42	6,84	29,15%
CP35C	CH35	CH-GN2	6,63	25,22	167,21	4,18	25,00	$y = 0,0048x - 0,1095$	5232,16	0,52%	6,27	12,65	6,39	1343,66	2605,40	1261,74	5,06	29,69%
CP35D	CH35	CH-GN2	7,03	25,18	176,88	3,20	18,12	$y = 0,0022x - 0,2837$	8363,82	0,84%	4,54	9,14	4,60	2343,20	3949,00	1605,80	2,87	29,62%
CP35E	CH35	CH-GN2	6,08	25,60	155,65	4,72	30,33	$y = 0,0104x + 1,3855$	2782,69	0,28%	7,65	15,29	7,65	491,58	1409,22	917,64	8,33	32,85%
CP35F	CH35	CH-GN2	6,11	26,00	158,91	3,85	24,20	$y = 0,0054x + 1,0154$	4293,01	0,43%	6,08	12,16	6,08	966,78	1999,12	1032,34	5,89	33,94%
CP35H	CH35	CH-GN2	6,55	26,50	173,52	4,22	24,33	$y = 0,0071x + 1,8656$	3163,93	0,32%	6,21	12,19	5,98	540,74	1147,04	606,30	9,86	31,95%
CP35I	CH35	CH-GN2	6,81	26,20	178,40	4,29	24,06	$y = 0,0042x + 1,307$	5418,31	0,54%	6,10	12,20	6,10	1114,26	2425,20	1310,94	4,65	30,16%
CP35J	CH35	CH-GN2	6,01	26,90	161,59	3,91	24,17	$y = 0,0049x + 2,1666$	4491,39	0,45%	6,04	12,09	6,04	688,22	1851,64	1163,42	5,19	35,01%
CP35K	CH35	CH-GN2	6,06	26,00	157,61	2,77	17,56	$y = 0,0046x + 0,9279$	3614,75	0,36%	4,45	8,84	4,39	704,60	1687,78	983,18	4,46	34,61%
CP35L	CH35	CH-GN2	6,24	26,30	164,14	3,69	22,50	$y = 0,0055x + 0,7204$	3959,47	0,40%	5,64	11,34	5,70	884,86	1851,64	966,78	5,90	33,21%
FNT01	CHFNT	-	3,44	24,13	83,07	7,55	90,86	$y = 0,0107x + 6,9039$	7846,37	0,78%	22,90	45,55	22,65	1376,44	3457,40	2080,96	10,89	42,84%
FNT03	CHFNT	-	3,69	24,78	91,42	14,75	161,34	$y = 0,0174x + 3,1334$	9092,38	0,91%	40,50	0,00	-40,50	2064,60	0,00	-2064,60	19,62	42,84%
FNT09	CHFNT	-	3,91	24,64	96,37	14,08	146,10	$y = 0,0116x + 11,76$	7817,27	0,78%	36,74	73,15	36,42	2212,20	4948,60	2736,40	13,31	42,84%
FNT06	CHFNT	-	4,27	24,57	104,86	10,74	102,44	$y = 0,0128x + 6,0291$	10942,88	1,09%	25,61	51,32	25,71	917,62	2900,40	1982,78	12,97	42,84%
FT04	CHFT	-	3,23	24,29	78,50	12,02	153,18	$y = 0,0164x + 5,7953$	8986,72	0,90%	38,36	76,72	38,36	1868,02	4063,80	2195,78	17,47	42,46%
FT06	CHFT	-	3,74	24,38	91,15	11,10	121,76	$y = 0,0154x + 12,422$	7099,74	0,71%	30,58	61,16	30,58	1032,32	2851,20	1818,88	16,81	42,46%
RP01	RP	-	2,93	-	36,30	0,86	23,64	$y = 0,0009x + 0,803$	25369,70	0,03	6,19	11,83	5,65	5779,15	11628,39	5849,24	0,97	-
RP02	RP	-	3,19	-	39,62	0,79	19,85	$y = 0,001x + 0,502$	19346,00	0,02	5,70	10,17	4,48	4940,03	9107,83	4167,80	1,07	-
RP03	RP	-	2,65	-	32,52	0,82	25,31	$y = 0,0011x + 0,8218$	22260,31	0,02	6,43	12,92	6,49	4950,88	10628,22	5677,34	1,14	-

<i>RP04</i>	<i>RP</i>	-	2,49	-	32,73	0,84	25,66	$y = 0,0013x + 0,9476$	19010,38	0,02	6,66	13,04	6,38	4259,59	8927,94	4668,36	1,37	-
<i>RP05</i>	<i>RP</i>	-	2,8	-	35,06	1,45	41,33	$y = 0,0008x + 3,625$	47136,85	0,05	10,57	20,80	10,23	9687,78	20039,92	10352,13	0,99	-
<i>RP06</i>	<i>RP</i>	-	2,7	-	33,37	0,92	27,58	$y = 0,0009x + 1,1215$	29403,66	0,03	6,70	13,36	6,66	5939,01	12623,31	6684,30	1,00	-
<i>RP07</i>	<i>RP</i>	-	2,65	-	33,07	1,24	37,51	$y = 0,001x + 1,8783$	35636,17	0,04	9,13	17,95	8,82	7235,41	15251,28	8015,87	1,10	-
<i>RP08</i>	<i>RP</i>	-	2,69	-	33,89	0,81	23,78	$y = 0,0008x + 0,6246$	28949,90	0,03	5,92	11,61	5,68	6269,10	12625,34	6356,24	0,89	-
<i>RP09</i>	<i>RP</i>	-	2,74	-	34,91	1,08	30,95	$y = 0,0009x + 1,2137$	33039,48	0,03	7,83	15,71	7,88	7273,20	15250,68	7977,49	0,99	-
<i>RP10</i>	<i>RP</i>	-	2,86	-	36,24	1,02	28,26	$y = 0,0011x + 1,2739$	24532,19	0,02	7,44	14,76	7,32	5572,56	11920,33	6347,78	1,15	-

APÊNDICE B

Apêndice B - Resultados individuais dos ensaios *push-out*

<i>Espécime</i>	<i>Q_{lo.u}</i>			<i>S_{lo.u}</i>			<i>K_f</i>		
	(kN)	<i>Médio</i> (kN)	<i>Erro</i> (%)	(mm)	<i>Médio</i> (mm)	<i>Erro</i> (%)	(kN/mm)	<i>Médio</i> (kN/mm)	<i>Erro</i> (%)
<i>ESC-14-CD</i>	26,63	22,50	12,63	4,43	5,16	54,19	6,01	5,54	43,33
<i>ESC-24-CD</i>	23,66			9,75			2,43		
<i>ESC-24-AB</i>	19,86			2,19			9,06		
<i>ESC-14-AB</i>	19,86			4,25			4,67		
<i>ESC-25-AB</i>	27,78	25,34	7,39	4,07	4,20	18,79	6,83	6,26	20,00
<i>ESC-35-AB</i>	24,48			5,28			4,64		
<i>ESC-35-CD</i>	25,32			4,53			5,59		
<i>ESC-15-CD</i>	27,72			4,32			6,42		
<i>ESC-15-AB</i>	22,73			2,65			8,58		
<i>ESC-25-CD</i>	23,99			4,37			5,49		
<i>ESC-16-CD</i>	25,80	27,34	6,60	2,71	3,24	24,47	9,51	8,78	15,66
<i>ESC-16-AB</i>	30,09			4,53			6,65		
<i>ESC-26-CD</i>	27,81			3,23			8,61		
<i>ESC-26-AB</i>	25,65			2,48			10,34		

Fonte: Autor (2023)

APÊNDICE C

Tabela 31 – Dimensões individuais dos corpos de prova de resina pura (RP)

<i>Corpos de Prova de Resina Pura (RP)</i>	<i>Dimensões (mm)</i>			
	<i>WOa</i>	<i>WOb</i>	<i>Wc</i>	<i>T</i>
<i>RP01</i>	18,18	18,2	12,39	2,93
<i>RP02</i>	18,14	18,21	12,42	3,19
<i>RP04</i>	18,27	18,39	12,76	2,49
<i>RP10</i>	18,41	18,3	12,67	2,86
<i>RP03</i>	17,98	18,25	12,27	2,65
<i>RP06</i>	18,02	18	12,36	2,7
<i>RP07</i>	18,2	18,18	12,48	2,65
<i>RP08</i>	18,21	18,2	12,6	2,69
<i>RP09</i>	18,46	18,35	12,74	2,74
<i>RP05</i>	18,23	18,28	12,52	2,8
<i>Desvio padrão</i>	0,14	0,10	0,16	0,18
<i>Média</i>	18,21	18,24	12,52	2,77
<i>CoV</i>	0,78%	0,56%	1,27%	6,56%



