

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL SOBRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
CONECTORES DE CISALHAMENTO DO TIPO PERFOFRP EM PAREDES PRÉ-
MOLDADAS DE CONCRETO COM ISOLAMENTO INCORPORADO**

JOHN KENNEDY FONSÊCA SILVA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

BRASÍLIA – DF

MARÇO – 2020

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

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL SOBRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
CONECTORES DE CISALHAMENTO DO TIPO PERFOFRP EM PAREDES PRÉ-
MOLDADAS DE CONCRETO COM ISOLAMENTO INCORPORADO**

JOHN KENNEDY FONSÊCA SILVA

ORIENTADOR: RODRIGO DE MELO LAMEIRAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

BRASÍLIA – DF

MARÇO – 2020

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL SOBRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
CONECTORES DE CISALHAMENTO DO TIPO PERFOFRP EM PAREDES PRÉ-
MOLDADAS DE CONCRETO COM ISOLAMENTO INCORPORADO**

JOHN KENNEDY FONSÊCA SILVA

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.

APROVADO POR:

Profº. Rodrigo de Melo Lameiras, *D.Sc.* (Universidade de Brasília)
(Orientador)

Profº. Marcos Honorato de Oliveira, *D.Sc.* (Universidade de Brasília)
(Examinador Interno)

Profª. Maria Isabel Brito Valente, *D.Sc.* (Universidade do Minho)
(Examinadora Externa)

Brasília – DF, 13 de março de 2020.

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, JOHN KENNEDY FONSÊCA

Avaliação experimental sobre o comportamento mecânico de conectores de cisalhamento do tipo *Perfofrp* em paredes pré-moldadas de concreto com isolamento incorporado. [Distrito Federal] 2020.

xv, 80 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2020).

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

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Polímero Reforçado com Fibra (PRF)

2. Concreto Armado

3. Estruturas Compósitas

4. Conectores

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, J. K. F. (2020). 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 em Estruturas e Construção Civil, Publicação M20-04A, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 80 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: John Kennedy Fonsêca Silva

TÍTULO: Avaliação experimental sobre o comportamento mecânico de conectores de cisalhamento do tipo *Perfofrp* em paredes pré-moldadas de concreto com isolamento incorporado.

GRAU: Mestre

ANO: 2020

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.

John Kennedy Fonsêca Silva

e-mail: kennedy1317@gmail.com

Dedico este trabalho a Adilson, Sônia, Admilson e Phernanda.

AGRADECIMENTOS

Sou grato à Deus, fonte de vida e inspiração.

Agradeço ao meu orientador, professor Rodrigo de Melo Lameiras, por todo o suporte prestado durante o desenvolvimento da dissertação de mestrado.

Agradeço aos meus pais Adilson e Sônia, e ao meu irmão Admilson, pelo apoio e incentivo concedidos. Agradeço a minha namorada Phernanda Vargas pelo amor e companheirismo durante todo esse tempo.

Agradeço aos colegas e aos professores do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC), pelas valiosas lições compartilhadas. Em especial aos amigos Matheus Galvão, Nathaniel Lima, Renan Ribeiro, Henrique Castro, Luciano Lins, Jordana Ferreira, Brenda Fontes, Amir Mahdi, Éder Leonardo, Jonas Falcão, Paulo Fernando, Pedro Paulo, Wallas Borges, Iago Almeida, Calos Valdson, Augusto Pippi, Izabel Castro, Yuri Sotero, Érica Nóbrega, Jerfson Lima, Larissa Mota, Wilber Vélez, Ana Luiza, Mara Monalisa, Iarly Vanderly, Pedro Luna, Iana Damasceno, Myrelle Câmara, Lucas Ghedini, Guilherme Gurgel, João Paulo, Renata Piazza e Victor Dalosto. Agradeço, também, aos amigos e alunos de IC, Ian e Gianluca pela ajuda durante a execução dos ensaios experimentais.

Agradeço aos coordenadores de laboratório, professor Marcos Honorato e professor Elton Bauer pelo suporte prestado, e aos técnicos de laboratório Gabriel, Patrícia, Sr. Severo e Sr. Magno pelo essencial auxílio. Agradeço, também, ao coordenador do PECC professor João Henrique e aos servidores da secretaria do PECC Ricardo, Vitor e Rebeca, pelo auxílio prestado nas questões administrativas. Agradeço aos professores examinadores da banca, professor Marcos Honorato e professora Isabel Valente, pelas valorosas contribuições ao texto final desta dissertação.

Sou grato à Universidade de Brasília (UnB) por todo o suporte prestado, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida. Agradeço, também, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento da pesquisa.

RESUMO

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL SOBRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONECTORES DE CISALHAMENTO DO TIPO PERFOFRP EM PAREDES PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO COM ISOLAMENTO INCORPORADO

Autor: John Kennedy Fonsêca Silva

Orientador: Rodrigo de Melo Lameiras

Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, março de 2020.

As paredes pré-moldadas de concreto com isolamento incorporado (painéis sanduíche) consistem em duas camadas externas de concreto unidas por um conector, entre as quais, encontra-se inserida uma camada interna de material isolante, com o objetivo de melhorar a sua performance térmica e acústica. Uma das grandes preocupações no que diz respeito ao desempenho desses painéis, refere-se à eliminação das pontes térmicas ocasionadas pelas conectores metálicos, que minam a sua eficiência energética. Uma das proposições para sanar parte desse problema consiste no emprego dos conectores *Perfofrp*, que são chapas planas perfuradas fabricadas com polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV), confeccionados com um determinado número de furos por onde o concreto passa criando pinos de ancoragem, que promovem resistência ao cisalhamento e à separação das paredes de concreto. Objetivou-se, com esta pesquisa, detalhar e avaliar a fabricação desse tipo de conexão, empregando-se um sistema de produção de baixo custo. Além disso, após a fabricação das conexões, 46 espécimes confeccionados com a conexão citada foram submetidos ao ensaio *push-out*, com o objetivo de avaliar o desempenho mecânico da conexão mencionada. Os resultados apontaram para uma qualidade de produção com um nível de variação das características do compósito satisfatória, considerando: a variabilidade do compósito produzido, a variabilidade entre chapas oriundas de diferentes infusões, e a variabilidade entre lotes de produção. Além disso, os ensaios *push-out* demonstraram que as conexões constituídas por furos apresentaram, quando comparadas com as conexões sem perfurações: um ganho de resistência variando entre -6 % e 45 %, deslocamentos relativos menos elevados, além de maiores níveis de rigidez.

Palavras-chave: Polímero Reforçado com Fibras de Vidro (PRFV); Concreto Armado; Conectores; Estruturas Compósitas; Ensaio de Cisalhamento; *Perfofrp*.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF PERFOFRP SHEAR CONNECTORS IN INSULATED PRE-CAST CONCRETE WALL PANELS WITH INCORPORATED INSULATION

Author: John Kennedy Fonsêca Silva

Supervisor: Rodrigo de Melo Lameiras

Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, March 2020.

Insulated pre-cast concrete wall panels, also called sandwich panels, consist in two external concrete layers, in which an internal layer of thermal insulation material is inserted between, aiming better acoustic and thermal performance. One of the main concerns regarding the performance of these panels refers to the elimination of thermal bridges caused by metallic connectors, which jeopardize the panels' thermal efficiency. One of the proposals to solve this problem consists in the use of Perfofrp connectors, which are plane plates with perforated holes through its thickness, which are embedded into the concrete plates, creating anchorage pins that enhance the shear strength and the layers' debonding resistance. This research had the objective of evaluating the production quality of this type of connector, produced with a low-cost vacuum assisted resin infusion system. Also, 46 specimens, in the form of representative models of the shear connector in insulated pre-cast concrete wall panels, were subjected to push-out tests, in order to assess the mechanical performance of the connector. The results indicated a production quality with a satisfactory level of characteristics variation, considering: the variability in different parts of a single composite plate, the variability between composite plates from different infusion process, and the variability between different production batches. Furthermore, the push-out tests demonstrated that the perforated connectors presented, when compared to non-perforated connectors: a gain in shear strength from -6% to 45%, lower relative displacements, and higher levels of stiffness.

Keywords: Glass Fibre Reinforced Polymer (GFRP); Reinforced Concrete; Connectors; Composite Structures; Pull-out test; Perfofrp.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Exemplo de parede pré-moldada de concreto com isolamento incorporado, utilizando conector do tipo <i>Perfofrp</i> , com as medidas apresentadas em milímetros [mm].....	5
Figura 2.2: Parede pré-moldada de concreto com isolamento incorporado: (a) carregamento aplicado; (b) desenvolvimento de fluxo de cisalhamento. Adaptado de Naito <i>et al.</i> (2012).....	8
Figura 2.3: Geometria do corpo de prova utilizado no ensaio <i>push-out</i> , conforme recomendado pela EN 1994-1-1 (2004): (a) vista frontal; (b) vista lateral; (c) vista superior. Adaptado de Cruz <i>et al</i> (2006).	10
Figura 2.4: Ensaio <i>push-out</i> executado para determinação do carregamento último de conectores de cisalhamento para paredes pré-moldadas de concreto com isolamento incorporado.....	11
Figura 2.5: Conectores de cisalhamento: (a) grade de polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV); (b) pino compósito de PRFV; (c) pino não compósito de PRFV; (d) barra de PRFV; (e) barra de polímero reforçado com fibra de basalto (PRFB); (f) treliça de aço galvanizado em formato retangular; (g) treliça de aço galvanizado em formato triangular; (h) clipe de aço em formato de “M”; (i) clipe de aço em formato de “C”. Adaptado de Naito <i>et al.</i> (2012).	13
Figura 2.6: Ensaio <i>push-out</i> : (a) representação isométrica; (b) vista frontal; (c) conector metálico. Adaptado de Goudarzi <i>et al.</i> (2016).....	14
Figura 2.7: Conectores constituídos por PRFV: (a) em formato de “C” (MAXIMOS <i>et al.</i> , 2007); (b) em formato de barras treliçadas (OH; JANG; YUN, 2013); (c) em formatos de barras nervuradas (WOLTMAN; TOMLINSON; FAM, 2013); (d) em formato de barras roscadas (WOLTMAN; TOMLINSON; FAM, 2013); (e) em formato de pinos (WOLTMAN; TOMLINSON; FAM, 2013); (f) em formato de barras treliçadas (CHOI <i>et al.</i> , 2015); (g) em formato de barras treliçadas (AL-RUBAYE <i>et al.</i> , 2018); (h) em formato de pino compósito (AL-RUBAYE <i>et al.</i> , 2018); (i) em formato de cruz (AL-RUBAYE <i>et al.</i> , 2018); (j) em formato de chapa corrugada (AL-RUBAYE <i>et al.</i> , 2018); (k) em formato de grade (CHOI; JANG; YUN, 2019); (l) em formato de pino em cruz (HUANG <i>et al.</i> , 2020).....	15
Figura 2.8: Conectores constituídos por barras dobradas de polímero reforçado com fibra de basalto (PRFB), conforme Tomlinson, Teixeira e Fam (2016).	19
Figura 2.9: Conector do tipo <i>Perfobond</i> para estruturas compósitas de aço e concreto, apresentado em sua forma: (a) contínua; (b) discreta (VERÍSSIMO, 2007).....	20
Figura 2.10: Ensaio <i>push-out</i> : (a) sistema de ensaio; (b) conector PerfoFRP, com as medidas apresentadas em milímetros [mm];(c) conector PerfoFRP CSM com ruptura na região dos furos; (d) conector PerfoFRP SRF com ruptura na região dos furos e na região inferior; (e) conector PerfoFRP com ruptura por esmagamento na região inferior; (f) conector PerfoFRP com ranhuras na região de contato com o concreto. Adaptado de Lameiras (2015).....	23
Figura 2.11: Ensaio <i>push-out</i> : (a) sistema de ensaio; (b) conector em formato de placa plana; (c) conector em formato de placa ondulada; (d) conector <i>Perfofrp</i> 100 mm com rupturas inclinadas na região de contato com isolamento; (e) conector <i>Perfofrp</i> 160 mm com rupturas inclinadas na região de contato com o isolamento. Adaptado de Huang e Dai (2019).	25
Figura 3.1: Partes constituintes do sistema de infusão por resina à vácuo, empregado para a fabricação das chapas de PRFV.....	29
Figura 3.2: Processo de fabricação dos compósitos de PRFV: (a) preparação e corte dos materiais; (b) preparação e limpeza da placa de vidro; (c) demarcação da área de aplicação de cera e de infusão; (d) fixação das tubulações e dos materiais sobre a placa de vidro; (e) fixação das tubulações e dos materiais sobre a placa de vidro, vista lateral; (f) sistema de infusão por resina parcialmente pronto para uso, aguardando apenas fixação das últimas mangueiras.	31

Figura 3.3: Processo de fabricação dos compósitos: (a) aspecto dos laminados imediatamente após a cura parcial; (b) aspecto dos compósitos após a aparagem de algumas bordas, e após a remoção do <i>air flow</i> e do <i>peel ply</i> .	33
Figura 3.4: Ensaio para determinação da tensão última à tração: (a) execução do ensaio; (b) espécimes após o rompimento.	34
Figura 3.5: Ensaio para determinação do teor volumétrico de fibras: (a) amostras anteriormente à execução do ensaio; (b) amostras após a execução do ensaio.	35
Figura 3.6: Configuração dos blocos, com medidas apresentadas em milímetros [mm]: (a) vista frontal; (b) vista lateral; (c) vista superior.	36
Figura 3.7: Posicionamento do conector <i>Perfofrp</i> no bloco de concreto e posicionamento dos furos no conector <i>Perfofrp</i> , com omissão da armadura, e com as medidas apresentadas em milímetros [mm].	37
Figura 3.8: Configuração de furos e espaçamentos, com medidas em milímetros [mm]: (a) SP-12.70-1.75; (b) SP-12.70-2.00; (c) SP-12.70-2.50; (d) SP-12.70-3.00; (e) SP-19.05-2.00; (f) SP-19.05-3.00; (g) SP-25.40-1.75; (h) SP-25.40-2.00; (i) SP-25.40-3.00; (j) SP-31.75-2.00; (k) SP-31.75-3.00; (l) SP-CTL.	39
Figura 3.9: Configuração de furos e espaçamentos, com as medidas apresentadas em milímetros [mm]: (a) SP-6.35-3.00; (b) SP-6.35(2F)-3.00.	40
Figura 3.10: Montagem dos espécimes: (a) posicionamento dos elementos constitutivos; (b) concretagem; (c) bloco após a concretagem.	40
Figura 3.11: Ensaio <i>push-out</i> : (a) esquema de ensaio; execução do ensaio.	42
Figura 4.1: Curvas tensão <i>versus</i> deformação: (a) módulo de elasticidade longitudinal do Grupo 01; (b) módulo de elasticidade longitudinal do Grupo 02; (c) módulo de elasticidade longitudinal do Grupo 03; (d) módulo de elasticidade transversal dos Grupos 01 e 02.	45
Figura 4.2: Avaliação da qualidade dos compósitos de PRFV produzidos.	47
Figura 4.3: Tensão última à tração: (a) legenda; (b) Grupo 01; (c) Grupo 02; (d) Grupo 03.	48
Figura 4.4: Teor volumétrico de fibras: (a) legenda; (b) Grupo 01; (c) Grupo 02; (d) Grupo 03.	49
Figura 4.5: Distribuição normal da tensão última à tração: (a) todos os espécimes; (b) Grupo 01; (c) Grupo 02; (d) Grupo 03.	52
Figura 4.6: Distribuição normal da fração volumétrica de fibras: (a) todos os espécimes; (b) Grupo 01; (c) Grupo 02; (d) Grupo 03.	52
Figura 4.7: Diagrama de caixa: (a) legenda dos gráficos; (b) tensão última à tração; (c) fração volumétrica de fibras; (d) módulo de elasticidade longitudinal.	53
Figura 4.8: Padrões de fissuração ao final do ensaio, que foram apresentados pelos conectores: (a) SP-12.70-1.75; (b) SP-12.70-2.00; (c) SP-12.70-2.50; (d) SP-12.70-3.00; (e) SP-25.4-1.75; (f) SP-25.40-2.00; (g) SP-25.4-3.00; (h) SP-31.75-2.00; (i) SP-31.75-3.00; (j) SP-CTL.	55
Figura 4.9: Curvas carregamento <i>versus</i> deslocamento: (a) SP-12.70-1.75; (b) SP-12.70-2.00; (c) SP-12.70-2.50; (d) SP-12.70-3.00; (e) SP-19.05-2.00; (f) SP-19.05-3.00.	58
Figura 4.10: Curvas carregamento <i>versus</i> deslocamento: (a) SP-25.40-1.75; (b) SP-25.40-2.00; (c) SP-25.40-3.00; (d) SP-25.40-3.00 C; (e) SP-31.75-3.00; (f) SP-25.40-2.00.	59
Figura 4.11: Curvas carregamento <i>versus</i> deslocamento: (a) SP-6.35-3.00; (b) SP-6.35(2)-3.00; (c) SP(FA)-19.05-2.00; (d) SP(C50)-19.05-2.00; (e) SP-EPS.	60
Figura 4.12: Carregamento último [kN] e área total de furos [mm ²] <i>versus</i> diâmetro dos furos [mm], considerando espaçamentos de [mm/mm]: (a) 1.75; (b) 2.00; (c) 3.00.	65
Figura 4.13: Carregamento último [kN] e área total de furos [mm ²] <i>versus</i> espaçamento entre furos, considerando configurações de diâmetro de: (a) 12.70 mm; (b) 19.05 mm; (c) 25.40 mm; (d) 31.75 mm.	67
Figura 4.14: Carregamento último <i>versus</i> área total de furos: (a) todos os conectores; (b) conectores com furos de 12.70 mm; (c) conectores com furos de 25.40 mm.	69

Figura 4.15: Ganho de resistência em relação ao grupo controle: (a) furos com diâmetros de 6.35 mm e 12.70 mm; (b) furos com diâmetros de 2.40 mm, 19.05 mm e 25.40 mm.	72
Figura 4.16: Carregamento último <i>versus</i> quantidade de fileiras, considerando a configuração de furos com diâmetro de 6.35 mm e espaçamento de 3.00.	72
Figura 4.17: Carregamento último <i>versus</i> classe de resistência do concreto: (a) legenda do gráfico; (b) conectores com furos com diâmetro de 19.05 mm e espaçamento de 2.00.	73
Figura 4.18: Carregamento última <i>versus</i> tipo de concreto: (a) legenda do gráfico; (b) conectores com furos com diâmetros de 19.05 mm e espaçamento de 2.00.	74
Figura B.1: Corpo de prova empregada para a realização do ensaio de cisalhamento duplo (<i>push-out test</i>), posicionado dentro do pórtico de reação do Laboratório de Estruturas (LabEst), pertencente à Faculdade de Tecnologia (FT) da Universidade de Brasília (UnB).	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Resultados experimentais dos ensaios <i>push-out</i> conduzidos por Lameiras (2015), incluindo a capacidade última $Q_{lo.u}$ [kN] e o deslocamento relativo $S_{lo.u}$ [mm].	24
Tabela 2.2: Resultados experimentais dos ensaios <i>push-out</i> conduzidos por Huang e Dai (2019), incluindo a capacidade última $Q_{lo.u}$ [kN] e o deslocamento relativo $S_{lo.u}$ [mm].	26
Tabela 3.1: Identificação dos espécimes do grupo principal.	38
Tabela 3.2: Identificação dos espécimes do grupo secundário.	38
Tabela 4.1: Espessura, tensão última à tração e fração volumétrica de fibras das chapas de PRFV.	44
Tabela 4.2: Módulo de elasticidade longitudinal compósito de PRFV.	45
Tabela 4.3: Módulo de elasticidade transversal e coeficiente de Poisson para os compósitos de PRFV.	46
Tabela 4.4: Coeficiente de variação obtidos para os Grupos 01, 02 e 03 para os ensaios de tensão última à tração ($\sigma_{pt.u}$) e fração volumétrica de fibras (V_f).	50
Tabela 4.5: ANOVA realizada para os Grupos 01, 02 e 03	50
Tabela 4.6: ANOVA realizada para a avaliação da diferença nas características dos compósitos entre diferentes grupos de produção	54
Tabela 4.7: Resultados experimentais correspondentes aos ensaios <i>push-out</i> para análise da variação do diâmetro e do espaçamento entre furos, com dados obtidos a partir do grupo principal.	62
Tabela 4.8: Resultados experimentais correspondentes aos ensaios <i>push-out</i> para análise da: variação da resistência do concreto, duplicação da fileira de furos, substituição da armadura por fibras de aço e presença de EPS, com dados obtidos a partir do grupo secundário.	63
Tabela 4.9: Comparação entre o resultado experimental e o modelo empírico	71
Tabela A.1: Resultados individuais de cada ensaio <i>push-out</i> executado.	81

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{cc}	Área de concreto submetida ao cisalhamento;
A_f	Área total de furos;
A_{ps}	Área de aço protendido na camada de concreto tracionado;
A_{tr}	Área de aço;
b	Espessura da camada de concreto;
b_{em}	Comprimento de embebedimento do conector no concreto;
b_f	Comprimento de embebedimento da chapa de aço dentro do concreto;
b_{sp}	Largura da parede do painel sanduíche;
C	Máxima capacidade à compressão para a seção no meio do vão;
d_f	Diâmetro das perfurações;
D_h	Diâmetro dos furos;
$E_{pt.l}$	Módulo de elasticidade longitudinal;
$E_{pt.t}$	Módulo de elasticidade transversal;
f'_c	Resistência à compressão do concreto;
f_{ck}	Resistência característica à compressão do concreto;
f_{ps}	Tensão no aço protendido na capacidade última à flexão;
f_u	Resistência última especificada para o material do conector;
f_y	Limite de escoamento do aço;
h	Altura do conector
h_{ecs}	Distância entre a borda do conector e a borda da camada de concreto;
L_c	Comprimento longitudinal da chapa de aço;
L_{con}	Comprimento do conector;
n_h	Quantidade de furos;
N_{req}	Quantidade de conectores de cisalhamento requerido;
P_{Rk}	Resistência característica dos conectores de cisalhamento;
$Q_{lo.u}$	Capacidade última da conexão;
$Q_{lo.u}$	Capacidade última da conexão;
$Q_{lo.fr}^{pr}$	Mecanismo de fricção;

$Q_{lo.do}^{pr}$	Mecanismo do efeito dos pinos de concreto;
T	Máxima capacidade à tração para a seção no meio do vão;
t	Espessura do conector;
t_c	Espessura da camada de concreto comprimida;
V_{des}	Capacidade resistente individual ao cisalhamento de um conector;
V_f	Fração volumétrica de fibras;
V_{req}	Capacidade de cisalhamento requerida;
α_i	Parâmetro obtido por análise de regressão;
β_i	Coefficientes obtidos por análise de regressão;
γ_V	Fator parcial de segurança;
ε	Espessura dos compósitos;
ν	Coefficiente de Poisson;
ν_c	Tensão última do concreto, quando submetido ao cisalhamento;
$\sigma_{pt.u}$	Tensão última à tração;
τ_{fr}	Aderência entre o conector e o concreto.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Justificativa	2
1.2	Objetivos.....	3
1.2.1	Objetivo geral	3
1.2.2	Objetivos específicos.....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Paredes pré-moldadas de concreto com isolamento incorporado.....	5
2.1.1	Principais componentes	5
2.1.2	Aspectos do comportamento estrutural	7
2.2	Avaliação da capacidade resistente de conectores de cisalhamento	9
2.3	Comportamento mecânico de conectores de cisalhamento	12
2.3.1	Conectores de aço.....	13
2.3.2	Conectores de PRFV	14
2.3.3	Conectores de PRFB	18
2.3.4	Conectores do tipo <i>Perfobond</i>	19
2.3.5	Conectores do tipo <i>Perfofrp</i>	21
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	27
3.1	Compósitos de PRFV	27
3.1.1	Partes constituintes do sistema de infusão por resina à vácuo	28
3.1.2	Montagem do sistema de infusão por resina à vácuo	30
3.1.3	Fabricação dos compósitos de PRFV	32
3.1.4	Caracterização dos compósitos de PRFV.....	33
3.2	Conexões <i>Perfofrp</i>	35
3.2.1	Confecção dos modelos representativos da conexão	35
3.2.2	Sistema de ensaio	41
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO	43
4.1	Caracterização dos compósitos	43
4.2	Avaliação da qualidade dos compósitos	46
4.2.1	Ao longo da extensão superficial das chapas	47
4.2.2	Entre chapas constituídas por um mesmo grupo	48
4.2.3	Entre diferentes grupos de produção	51

4.3	Ensaio push-out.....	54
4.3.1	Padrões de fissuração	54
4.3.2	Comportamento carregamento <i>versus</i> deslocamento relativo.....	57
4.3.3	Capacidade última	62
4.3.4	Efeito da variação do diâmetro dos furos	63
4.3.5	Efeito da variação do espaçamento longitudinal entre furos.....	66
4.3.6	Efeito da variação da área de furos	68
4.3.7	Ganhos de resistência em virtude da perfuração dos conectores	71
4.3.8	Efeito da variação da duplicação da fileira de furos	72
4.3.9	Efeito da variação da resistência do concreto	73
4.3.10	Efeito da substituição da armadura por fibras de aço.....	73
4.3.11	Influência do material isolante no comportamento mecânico da conexão.....	74
5	CONCLUSÕES	75
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
	APÊNDICE A	81
	APÊNDICE B.....	83

1 INTRODUÇÃO

As paredes pré-moldadas de concreto com isolamento incorporado (painéis sanduíche) consistem, basicamente, em duas camadas externas de concreto, entre as quais uma camada interna constituída por material isolante é inserida, com intuito de prover um melhor desempenho térmico para a edificação. Para que o painel se mantenha unido durante as etapas de içamento, transporte e ao longo da vida útil da edificação, é necessária a utilização de conectores (que podem ser de cisalhamento ou não-compósitos), que são ancorados em ambas as camadas externas de concreto, passando através da camada interna de material isolante. As camadas externas geralmente são constituídas por paredes de concreto armado e as camadas internas por chapas de poliestireno expandido ou *expanded polystyrene* (EPS).

Os painéis sanduíche podem apresentar função estrutural, ou apenas de vedação, podendo ser utilizados tanto no exterior da edificação (uso mais comum), assim como no interior. Podem ser classificados nas seguintes categorias: (a) não-compósitos, onde cada uma das duas camadas de concreto atua de forma independente; (b) compósitos, onde as duas camadas de concreto trabalham juntas para resistirem aos esforços solicitantes; (c) e parcialmente compósitos, que consistem em um meio termo entre as duas opções anteriores (PCI COMMITTEE REPORT, 2011). O nível de ação compósita depende principalmente da rigidez, da resistência e da distribuição dos conectores ao longo do painel (HUANG; DAI, 2019).

Os painéis sanduíche são encontrados, de acordo com o PCI Committee Report. (2011), em todos os tipos de estruturas, incluindo: prédios residenciais, comerciais e industriais; escolas; ambientes com temperatura controlada; armazéns; fóruns de justiça; hospitais; entre outros. Apresentam as seguintes vantagens: durabilidade; economia; resistência ao fogo; possibilidade de vencer grandes vãos verticais entre apoios; performance energética superior e uma melhor proteção contra umidade, quando comparado com outros sistemas construtivos convencionais; resistência à impactos, furtos e vandalismo; e acabamento superficial do produto realizado sem a necessidade de grandes tratamentos.

Conforme aponta Naito *et al.* (2012), o painel sanduíche é considerado um significativo desenvolvimento para o conceito de arquitetura sustentável e uma grande vantagem para a obtenção de certificações para construções sustentáveis. Com os novos requerimentos e recomendações normativas de performance energética, a indústria tem procurado adotar o uso de painéis sanduíche para melhorar a performance térmica das

edificações, mantendo a rapidez de construção proporcionada pela adoção dos pré-moldados de concreto.

1.1 Justificativa

Como a tecnologia dos painéis sanduíche busca uma maior eficiência energética dos painéis de vedação, uma das grandes preocupações no que concerne a esse sistema construtivo, diz respeito à eliminação das pontes térmicas ocasionadas pelas conectores, que geralmente são constituídos por materiais metálicos e minam a eficiência energética dos painéis sanduíche. De acordo com estudo conduzido por MacCall (1985), o uso de conectores de pino de aço, que representa 0.08% da área do painel sanduíche, pode reduzir a performance térmica desses painéis em até 38%. Esse tipo de conexão, por apresentar boa condutividade térmica, fornece um caminho adequado para a transferência de calor de um ambiente interno para outro externo, sendo que o contrário também é válido. Tendo em vista os objetivos para o quais os painéis são dimensionados, esse fenômeno contraria o principal propósito almejado para esse tipo de sistema construtivo.

Uma das possíveis proposições para sanar esse problema consiste no emprego dos conectores constituídos por polímeros reforçados com fibras de vidro (PRFV), em formatos de chapas planas e perfuradas, denominados *Perfofrp*, que é um material com baixa condutividade térmica ($0.04 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), quando comparado com o aço ($50.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), e com o concreto ($0.8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), conforme dados de condutividade térmica apresentados por Young e Freedman (2008). Essas chapas são confeccionadas com um determinado número de furos por onde o concreto passa criando pinos de ancoragem, que promovem resistência ao cisalhamento e à separação das paredes de concreto. Os conectores *Perfofrp* apresentam algumas vantagens, pois podem ser facilmente padronizados para produção em massa ou customizados para uma determinada aplicação. Além disso, não necessitam de grandes plantas industriais para serem fabricados, assim como não exigem grande investimento em maquinário para serem produzidos.

A principal limitação associada aos conectores *Perfofrp* consiste no custo de fabricação da conexão. A escolha do tipo de PRFV para ser utilizado deverá buscar um equilíbrio entre custo de produção e a resistência mecânica da conexão. Materiais de melhor qualidade (como os de fibra orientada, por exemplo), que tendem a elevar a capacidade resistente da conexão, geralmente são mais caros. Assim, a utilização desse tipo de material, a

depende do custo de produção, pode tornar-se inviável. Por outro lado, materiais mais baratos (como os de fibra aleatória, por exemplo), que geralmente são menos resistentes, podem levar a um desempenho mecânico pouco satisfatório.

Os conectores *Perfofrp* foram originalmente propostos por Lameiras *et al.* (2013a, 2013b, 2018a, 2018b; 2015), com ambos os trabalhos realizados na Universidade do Minho, em Portugal, nos quais foram conduzidos diversos ensaios com o intuito de avaliar a capacidade resistente desse tipo de conexão. Os autores conduziram ensaios *push-out*, nos quais avaliaram a capacidade resistente desse tipo de conexão, utilizando furos com diâmetro de 30 mm, com um espaçamento constante entre furos. Verificaram que o tipo de PRFV (com fibras aleatórias ou com fibras orientadas) e a presença da frente de concreto exercem bastante influência no comportamento mecânico da conexão. Observaram, também, que a presença de furos e a aderência entre o concreto e PRFV exercem certa influência no comportamento mecânico na conexão.

Outros pesquisadores como Chen *et al.* (2015) e Norris e Chen (2016), ambos na *Iowa State University*, nos Estados Unidos, analisaram o comportamento desse tipo de conexão, quando submetida à ensaios de flexão. Mais recentemente, Huang e Dai (2019) conduziram, na *Hong Kong Polytechnic University*, uma série de ensaios de cisalhamento (ensaios *push-out*), com os conectores do tipo PerfoFRP. Os autores citados conduziram ensaios nos quais mantiveram constantes o diâmetro do furo (12,70 mm), o espaçamento entre furos, e o tipo de PRFV (de fibras orientadas). Mas variaram a altura da conexão (10 cm e 16 cm), e a espessura das chapas de PRFV (cerca de 1.35 mm e 2.65 mm). Os pesquisadores verificaram que ambos os parâmetros variados exerceram significativa influência no comportamento mecânico da conexão. Tendo as pesquisas anteriormente mencionadas determinado, portanto, a viabilidade da utilização dos conectores *Perfofrp*, a próxima etapa lógica consiste no estudo das propriedades e fatores que afetam a performance desses conectores com o objetivo de estabelecer um guia para o dimensionamento desse tipo de conexão.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar os efeitos que a variação da geometria dos conectores ocasiona no comportamento mecânico das conexões do tipo *Perfofrp*, empregando-

se dados obtidos com a realização de ensaios de cisalhamento duplo (*push-out tests*), em modelos experimentais representativos das paredes de concreto pré-moldada com isolamento incorporado.

1.2.2 Objetivos específicos

Consistem em objetivos específicos para a pesquisa:

- Realizar a fabricação dos conectores *Perfofrp* utilizando um processo de produção de baixo custo (infusão por resina à vácuo), e avaliar a qualidade dos compósitos produzidos;
- Avaliar o efeito da variação do diâmetro dos furos no comportamento mecânico de conexões constituídas por conectores *Perfofrp* e camadas de concreto armado quando submetidas ao ensaio de cisalhamento duplo;
- Avaliar o efeito da variação do espaçamento entre os furos no comportamento mecânico de conexões constituídas por conectores *Perfofrp* e camadas de concreto armado quando submetidas ao ensaio de cisalhamento duplo;
- Avaliar o efeito da variação da resistência do concreto no comportamento mecânico de conexões constituídas por conectores *Perfofrp* e camadas de concreto armado quando submetidas ao ensaio de cisalhamento duplo.
- Avaliar o efeito da variação do tipo de concreto no comportamento mecânico de conexões constituídas por conectores *Perfofrp* e camadas de concreto (com armadura de aço ou com fibras de aço) quando submetidas ao ensaio de cisalhamento duplo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Paredes pré-moldadas de concreto com isolamento incorporado

As paredes pré-moldadas de concreto com isolamento incorporado (comodamente chamadas de painéis sanduíche) são compostas por duas camadas externas de concreto separadas entre si por uma camada interna de material isolante (Figura 2.1). Os painéis sanduíche são empregados com as funções de realizar a transferência de esforços entre os diversos componentes estruturais, além de prover isolamento térmico e acústico para a edificação. Esses elementos podem ser empregados como paredes internas ou externas (uso mais comum), apresentando apenas funções de vedação, ou funções estruturais (PCI COMMITTEE REPORT, 2011).

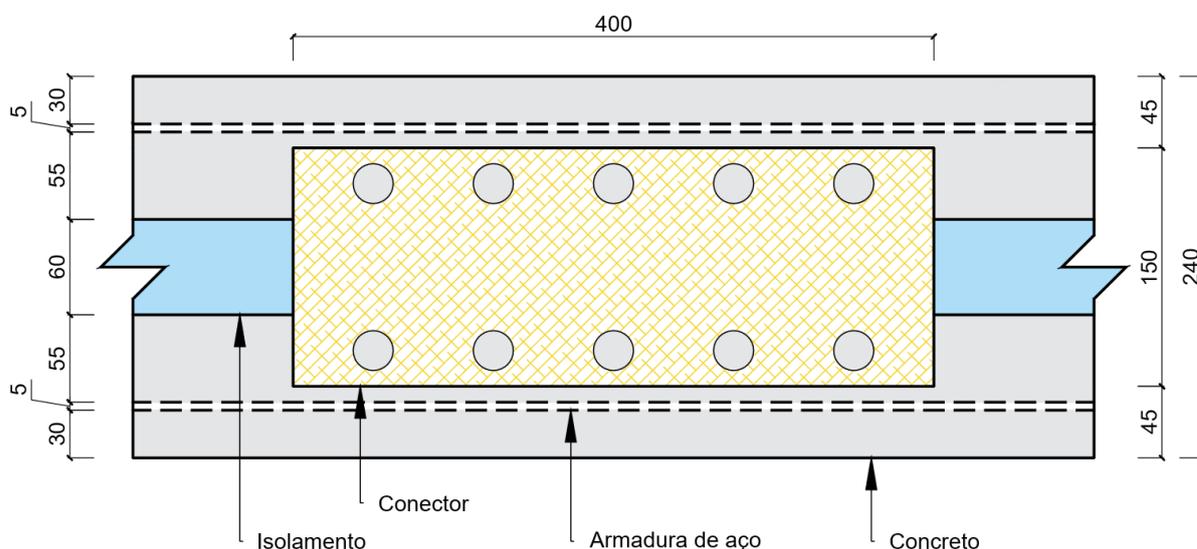


Figura 2.1: Exemplo de parede pré-moldada de concreto com isolamento incorporado, utilizando conector do tipo *Perfofrp*, com as medidas apresentadas em milímetros [mm].

2.1.1 Principais componentes

2.1.1.1 Concreto

Embora o concreto seja o material mais empregado nas camadas externas dos painéis sanduíche, algumas soluções em argamassa, associadas à utilização de malhas de aço, também são empregadas, principalmente nos casos onde o sistema construtivo moldado *in loco* é utilizado (BERTINI, 2002). Além disso, os painéis sanduíche podem ser pré-fabricados ou

construídos no local, podendo ser empregado, inclusive, concreto protendido (AZEVEDO, 2013).

Atualmente, estudam-se soluções para substituir parcialmente ou totalmente a armadura por fibras de aço, com o intuito aumentar a durabilidade dos painéis, conforme estudo conduzido por Lameiras (2015). Consegue-se obter, com isto, camadas de concreto com espessura mais reduzida, pois o recobrimento das armaduras deixa de ser uma limitação. Além disso, obtém-se um material mais dúctil, em comparação ao concreto simples, devido à adição de fibras que garantem um melhor comportamento após a fissuração (AZEVEDO, 2013).

2.1.1.2 Conectores

Os conectores são utilizados com o principal intuito de interligar as camadas externas de concreto e garantir uma performance estrutural satisfatória (O'HEGARTY; KINNANE, 2020), sendo classificados em duas categorias: os que transferem esforços de cisalhamento, e os que não transferem esforços de cisalhamento (PCI COMMITTEE REPORT, 2011). Estes conectores podem ser constituídos por zonas sólidas de concreto, elementos em aço, ou mais recentemente por materiais poliméricos reforçados com fibras (PRV). Além disso, podem ser fabricados com diferentes geometrias, exemplificam-se: os em formato de “C”, “Z” e “M”, além das buchas de metal, dos ganchos, das grelhas metálicas, das treliças metálicas, dos pinos de plástico, e das malhas de fibra de carbono (AZEVEDO, 2013).

Os conectores possuem uma variedade de funções, sendo responsáveis por resistirem aos esforços de tração causados pelo peso da camada inferior de concreto, quando são erguidos após serem concretados horizontalmente. Devem resistir, também, aos esforços de tração, fora do plano, resultantes da sucção do vento e de forças sísmicas (PCI COMMITTEE REPORT, 2011).

2.1.1.3 Isolamento

A espessura e o material constituinte da camada de isolamento são escolhidos em função do local de execução da obra, e do desempenho térmico almejado. Exige-se que o material de isolamento possua baixa capacidade de absorção de água, para evitar que a água de amassamento seja absorvida durante a concretagem (AZEVEDO, 2013). Além disso, o núcleo

deve ser leve e apresentar rigidez suficiente para possibilitar a montagem do painel sanduíche (BERTINI, 2002).

Os dois tipos de materiais mais utilizados como isolamento nos painéis sanduíche são: a espuma de poliestireno expandido, ou *expanded polystyrene* (EPS); e a espuma de poliestireno extrudido, ou *extruded polystyrene* (XPS). A diferença entre ambos consiste no modo de fabricação, que resulta em diferentes densidades para cada material (AZEVEDO, 2013).

A contribuição do isolamento à resistência ao cisalhamento do painel sanduíche depende majoritariamente do tipo de isolamento e das práticas construtivas que são adotadas no local de construção. No caso do EPS, é observada uma excelente aderência entre o concreto e o isolamento, que é mantida após o esgotamento da capacidade última da conexão. Outros materiais de isolamento, no entanto, não exibem a mesma aderência ou resistência (BUSH; STINE, 1994). Recomenda-se que esta aderência não seja utilizada para finalidades de dimensionamento, devido às perdas de aderência que podem ocorrer durante as etapas de manuseio e de transporte, e ao longo da vida útil da edificação.

2.1.2 Aspectos do comportamento estrutural

Do ponto de vista estrutural, os painéis sanduíche podem atuar como vigas (*beams*), vigas-parede (*bearing walls*) ou pilares-parede (*shear walls*) (PCI COMMITTEE REPORT, 2011). Quando existe a necessidade de vencer grandes vãos, podem ainda serem protendidos (AZEVEDO, 2013).

O comportamento estrutural dos painéis sanduíche e, conseqüentemente, o nível de ação compósita (Figura 2.2) depende principalmente da rigidez, da resistência e da distribuição dos conectores ao longo do painel (HUANG; DAI, 2019); sendo que, o nível de aderência entre o concreto e o material isolante também exerce alguma influência no comportamento estrutural (PCI COMMITTEE REPORT, 2011). Quando a resistência e a rigidez dos conectores são suficientemente elevados para transferir os esforços de cisalhamento (que surgem quando o painel é submetido aos esforços de flexão) de uma camada de concreto para outra, ele é chamado de totalmente compósito. Conectores com baixos níveis de resistência transferem uma força de cisalhamento mínima entre as camadas de concreto, sendo que, os painéis que utilizam este tipo de conexão são chamados de não-compósitos. Painéis parcialmente compósitos, por sua vez, encontram-se entre estes dois extremos, garantindo algum nível razoável de

transferência de forças de cisalhamento, entre as duas camadas de concreto. Com relação à deformação ocasionada pelos esforços de cisalhamento entre as camadas de concreto, não é considerada negligenciável para os casos de painéis não-compósitos e de parcialmente compósitos. No caso de painéis compósitos, no entanto, pode ser considerada negligenciável (SALMON *et al.*, 1997).

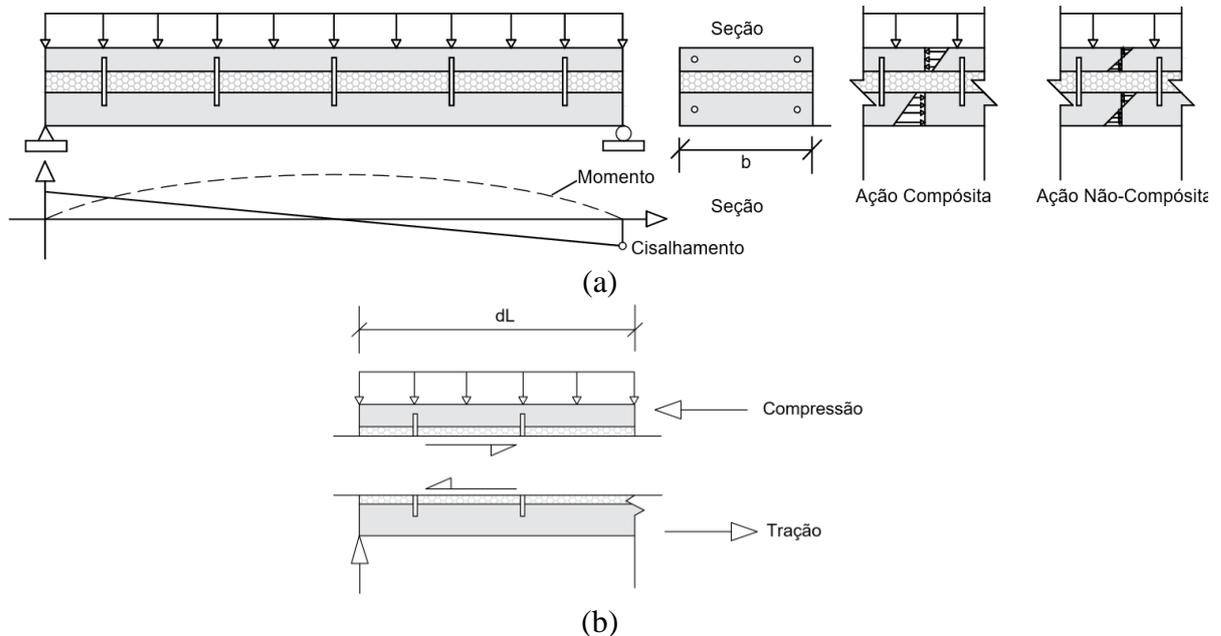


Figura 2.2: Parede pré-moldada de concreto com isolamento incorporado: (a) carregamento aplicado; (b) desenvolvimento de fluxo de cisalhamento. Adaptado de Naito *et al.* (2012).

O PCI Committee Report (2011) recomenda, conforme descrito por Naito *et al.* (2012), que a demanda de cisalhamento seja calculada empregando-se a capacidade de flexão da seção. Essa prática, no entanto, é recomendada apenas para conexões constituídas por conectores que apresentem comportamento marcadamente dúctil, pois pressupõe uma distribuição elástica dos esforços. A força de cisalhamento horizontal máxima é calculada utilizando o menor entre os dois valores de: máxima capacidade à compressão ou máxima capacidade à tração, ambos para a seção no meio do vão. A quantidade de conectores necessários para resistir à força de cisalhamento deve ser colocada em cada uma das metades do painel, partindo do meio do vão até o suporte. Para simplificar o cálculo, assume-se que toda a espessura de uma das camadas externas de concreto encontra-se em compressão. A capacidade de cisalhamento requerida, V_{req} , pode ser calculado através das Equações 2.1, 2.2 e 2.3, conforme se segue:

$$V_{req} = \min(T, C) \quad 2.1$$

$$T = A_{ps}f_{ps} + A_s f_y \quad 2.2$$

$$C = 0.85 f'_c b t_c \quad 2.3$$

Onde A_{ps} é à área de aço protendido na camada de concreto tracionado; A_s é área aço não protendido na camada de concreto tracionada; f_{ps} é a tensão no aço protendido na capacidade última à flexão; f_y é a tensão de escoamento do aço não protendido; f'_c é a resistência à compressão do concreto, b é a largura da parede, e t_c é a espessura da camada de concreto comprimida. Para obter um comportamento totalmente compósito para o painel, a quantidade requerida de conectores de cisalhamento, N_{req} , pode ser calculada empregando-se a Equação 2.4.

$$N_{req} = \frac{V_{req}}{V_{des}} \quad 2.4$$

Onde V_{des} é capacidade resistente individual ao cisalhamento de um conector.

2.2 Avaliação da capacidade resistente de conectores de cisalhamento

O ensaio *push-out* (Figura 2.3) descrito pela EN 1994-1-1 (2004) foi concebido para avaliar a capacidade resistente de conectores de cisalhamento, empregados em estruturas mistas de aço e concreto. A referida norma regulamenta as especificações e procedimentos de ensaio. Para cada modelo em estudo, devem ser executados, no mínimo, três ensaios. Os resultados entre as cargas máxima de cada modelo e a carga máxima média não deve exceder em 10 %. Caso a diferença seja superior a 10 %, pelo menos mais três ensaios devem ser realizados e avaliados de acordo com o Anexo D da EN 1994-1-1 (2004). A resistência de cálculo do conector pode ser determinada pela Equação 2.5.

$$P_{Rd} = \frac{f_u}{f_{ut}} \times \frac{P_{Rk}}{\gamma_V} \leq \frac{P_{Rk}}{\gamma_V} \quad 2.5$$

Onde:

- P_{Rk} é a resistência característica, considerada como sendo a carga de ruptura mínima dentre os modelos, dividido pelo número de conectores e reduzido em 10 %;
- f_u é a resistência última especificada para o material do conector;
- f_{ut} é a resistência última do material do conector obtido por meio de ensaio;
- γ_V é o fator parcial de segurança (recomendado como 1.25, conforme apresenta a EN 1994-1-1 (2004)).

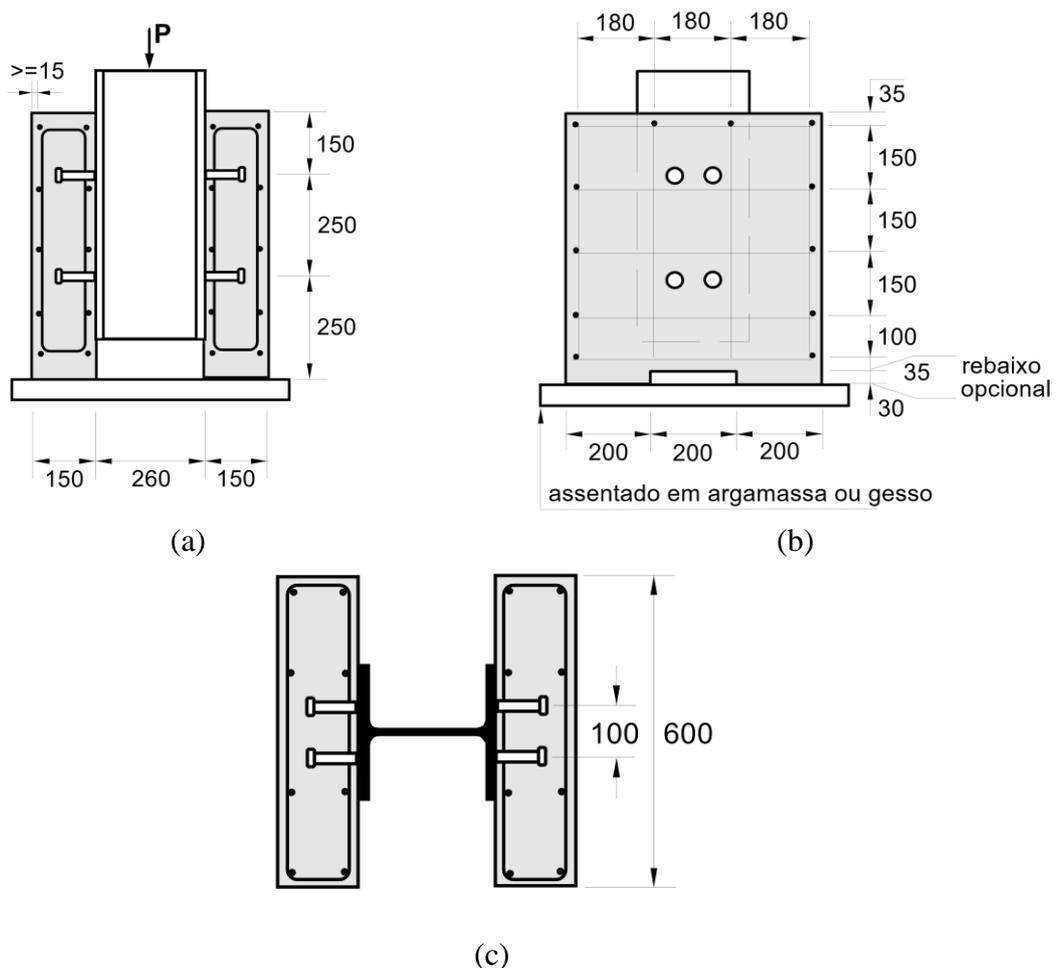


Figura 2.3: Geometria do corpo de prova utilizado no ensaio *push-out*, conforme recomendado pela EN 1994-1-1 (2004): (a) vista frontal; (b) vista lateral; (c) vista superior. Adaptado de Cruz *et al* (2006).

O modelo de ensaio consiste em duas lajes de concreto armado, com dimensões de 600 mm × 650 mm × 150 mm, conectadas a um perfil de aço por meio dos conectores de cisalhamento, que se deseja avaliar. As lajes são apoiadas na parte inferior e o carregamento é aplicado na parte superior do perfil de aço, até que ocorra o colapso da conexão. Ao final do ensaio, um conjunto de dados é adquirido, e a curva carga-deslizamento pode ser plotada. A

avaliação do comportamento do conector de cisalhamento consiste basicamente na determinação de três características: a capacidade resistente, ductilidade e *upflit*. Os dois primeiros parâmetros são obtidos a partir da curva carga-deslizamento. Além do deslizamento longitudinal entre o perfil de aço e a laje, deve-se computar também, o deslocamento transversal entre esses membros (*upflit*). O *upflit* necessita condizer com as prescrições da EN 1994-1-1 (2004), sendo aferido quando o carregamento alcança 80 % da carga de ruptura do modelo. De acordo com a EN 1994-1-1 (2004), o *upflit* deve ser inferior a 50 % do deslizamento longitudinal, para um mesmo carregamento (LIMA, 2018).

O ensaio *push-out*, nos últimos anos, tem sido bastante utilizado, também, para avaliar a capacidade resistente de conectores de cisalhamento para painéis sanduíche (Figura 2.4)., com algumas adaptações na forma de ensaio. Estas adaptações, consistem, basicamente, em realizar a substituição do perfil “I” por uma camada interna de concreto. Entre as duas interfaces que se formam entre as camadas de concreto externas e a camada de concreto interna, inserem-se, também, chapas de isolamento. Os conectores são embebidos nas camadas externas e interna de concreto, passando através das chapas de isolamento. São ensaiados, portanto, no mínimo dois conectores, um para cada interface.

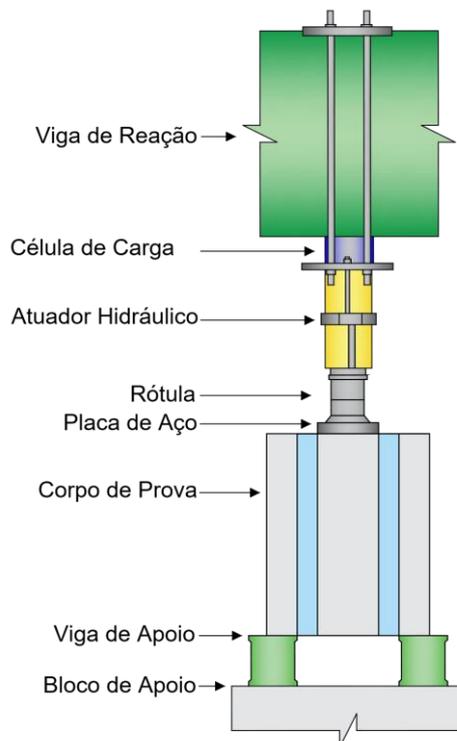


Figura 2.4: Ensaio *push-out* executado para determinação do carregamento último de conectores de cisalhamento para paredes pré-moldadas de concreto com isolamento incorporado.

2.3 Comportamento mecânico de conectores de cisalhamento

Objetivando-se realizar uma revisão sistemática da literatura sobre o comportamento de conectores de cisalhamento para painéis sanduíche, empregou-se a Teoria do Enfoque Meta Analítico Consolidado (TEMAC), proposta Mariano e Rocha (2017). Foram adotadas três bases de dados principais, que foram: *Science Direct*, *Scopus* e *Web of Science*. A busca pelos artigos foi realizada de março de 2019 até fevereiro de 2020, empregando-se a palavra-chave “*sandwich wall panels*”, considerando-se o máximo período possível para cada uma das bases de dados. Estando de posse dos registros encontrados, realizou-se uma análise dos títulos e dos resumos de cada artigo de modo a eliminar aqueles que não correspondem ao campo de pesquisa adotado neste trabalho. Como critério de artigos para serem empregados nesta pesquisa, consideraram-se aqueles que realizaram ensaios experimentais em paredes pré-moldadas de concreto com isolamento incorporado, analisando o comportamento mecânico de conectores de cisalhamento, quando submetidos, principalmente, a ensaios experimentais do tipo *push-out*.

Naito *et al.* (2012), que realizaram um dos principais trabalhos sobre o tema, estudaram a performance de 14 tipos de conectores comerciais disponíveis nos Estados Unidos (Figura 2.5) e desenvolveu um modelo simplificado tri-linear que relaciona a força de cisalhamento com o deslocamento relativo para o uso em análises estruturais de performance de paredes pré-moldadas de concreto com isolamento incorporado. Dispondo dos resultados experimentais, os autores concluíram que a performance dos conectores quando submetidos ao cisalhamento duplo variou bastante, dependendo do conector ensaiado. Para os conectores discretos, a resistência variou entre 5.5 kN e 18.4 kN, já para os conectores contínuos (ou distribuídos) a resistência variou entre 17.2 kN/m e 57.8 kN/m. Os autores observaram, também, que a rigidez dos conectores se apresentou bastante sensível à geometria das conexões. Os conectores do tipo treliça apresentaram grande rigidez inicial, quando comparados com os conectores do tipo pino, que trabalham em modo de flexão. A resistência ao cisalhamento foi melhorada em 21%, quando o EPS foi utilizado em substituição ao XPS. Isso foi atribuído a grande rugosidade apresentada pela superfície do EPS.

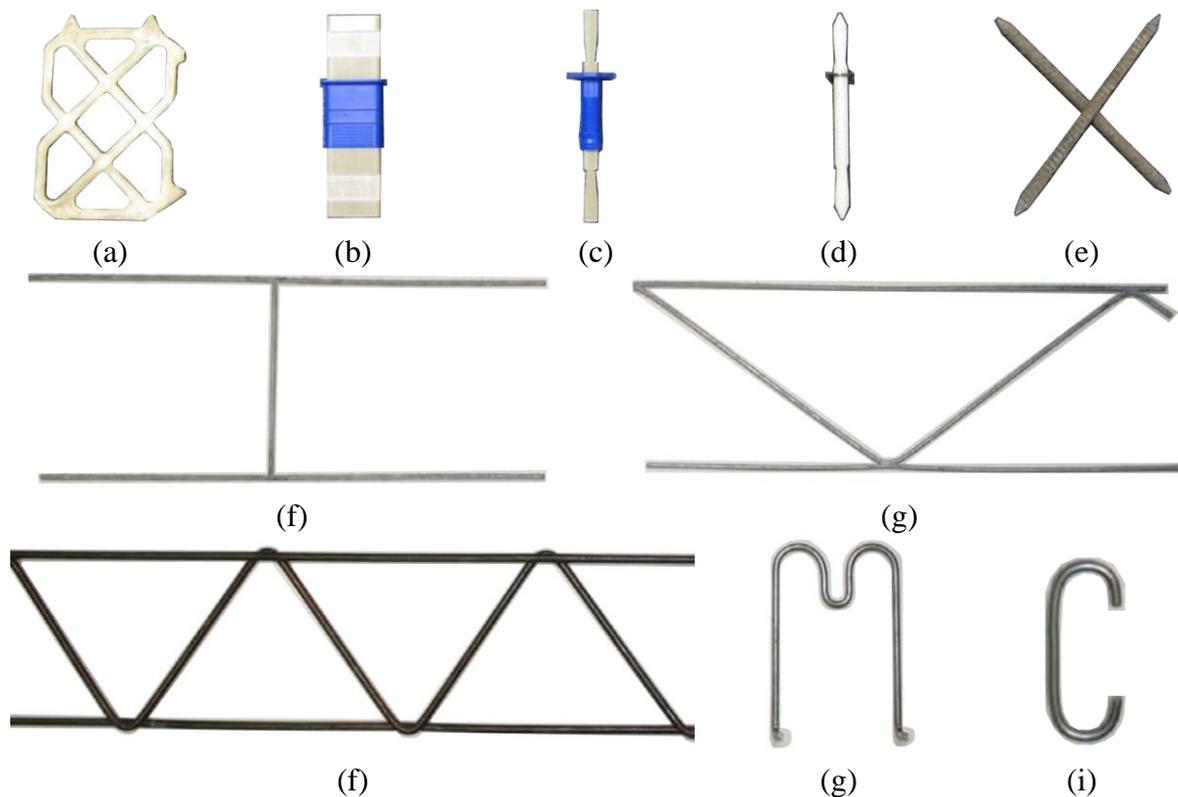


Figura 2.5: Conectores de cisalhamento: (a) grade de polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV); (b) pino compósito de PRFV; (c) pino não compósito de PRFV; (d) barra de PRFV; (e) barra de polímero reforçado com fibra de basalto (PRFB); (f) treliça de aço galvanizado em formato retangular; (g) treliça de aço galvanizado em formato triangular; (h) treliça de aço em formato triangular; (i) clipe de aço em formato de “M”; (j) clipe de aço em formato de “C”. Adaptado de Naito *et al.* (2012).

2.3.1 Conectores de aço

Os conectores de cisalhamento foram desenvolvidos, inicialmente, com configurações constituídas por blocos sólidos de concreto e por treliças de aço. Bush e Stine (1994) desenvolveram uma pesquisa sobre conectores metálicos em formato de treliça para painéis sanduíche, conseguindo atingir um elevado nível de comportamento compósito atuando no sistema, em virtude da elevada resistência e rigidez que esses materiais apresentam. Bush e Zhiqi (1998) e Benayoune *et al.* (2008), por sua vez, realizaram ensaios de flexão em painéis sanduíche com o intuito de analisar o desempenho mecânico de conectores constituídos por barras treliçadas de aço. Pessik e Mlynarczyk (2003) realizaram ensaios de flexão, para testarem conectores metálicos com várias configurações.

Goudarzi *et al.* (2016), mais recentemente, conduziram ensaios no qual avaliaram a resistência ao cisalhamento de quatro tipos conectores metálicos constituídos por chapas em formato de “Z”, conforme pode ser observado por meio da Figura 2.6. De posse dos resultados experimentais, os autores concluíram que o incremento da largura dos conectores proporciona

maior resistência ao cisalhamento e maior rigidez de maneira mais eficiente que o aumento na espessura das conexões. Goudarzi *et al.* (2016) observaram, também, que o comportamento ao cisalhamento dos conectores é significativamente afetado pelo descolamento e pelo fissuramento do concreto ao redor da ligação entre o conector e o concreto. De acordo com os pesquisadores, esses efeitos tendem a aumentar com a diminuição da relação entre a espessura e a largura do conector.

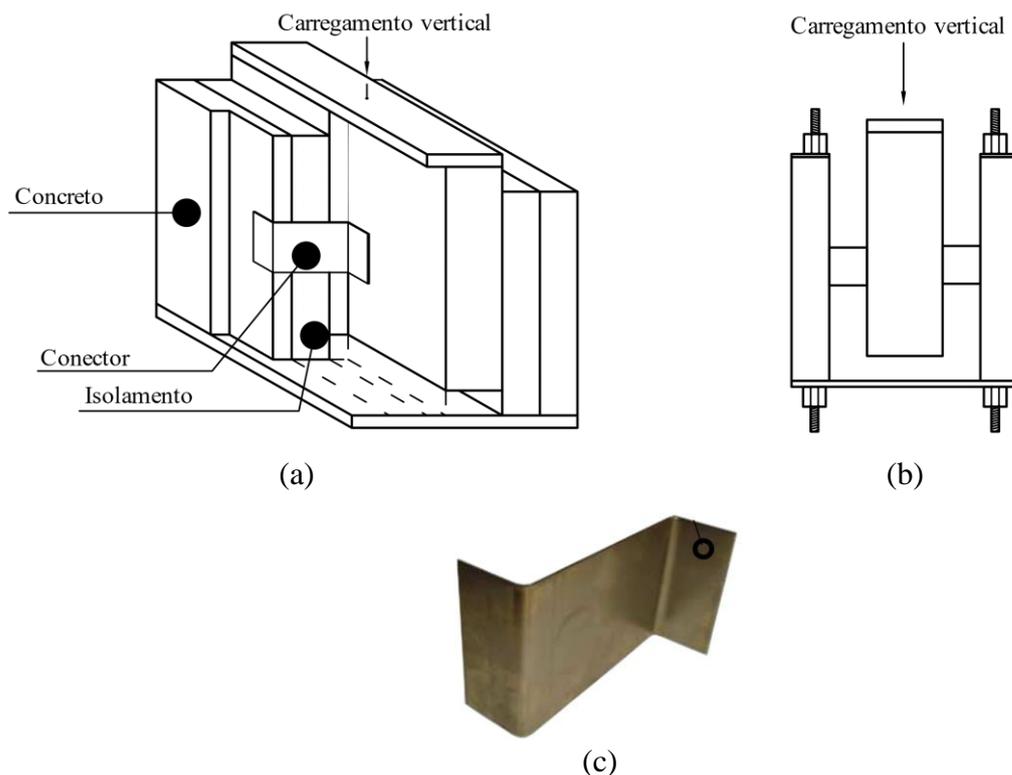


Figura 2.6: Ensaio *push-out*: (a) representação isométrica; (b) vista frontal; (c) conector metálico. Adaptado de Goudarzi *et al.* (2016).

2.3.2 Conectores de PRFV

Para resolver o problema referente à criação de pontes térmicas nos painéis sanduíche, e buscando trabalhar com materiais cuja degradação devido à ação do tempo e do clima seja mais lenta, conectores confeccionados com polímeros reforçados com fibras de vidro (PRFV) começaram a ser propostos. Algumas configurações, propostas por alguns autores podem ser observadas na Figura 2.7. Esse tipo de conexão tem como principais características uma boa resistência mecânica e baixa condutividade térmica.

No trabalho desenvolvido por Salmon, Einea e Tadros (1997), que trata-se de um dos pioneiros sobre o tema, foram conduzidos ensaios de flexão em painéis sanduíche

confeccionados com barras treliçadas de polímero reforçado com fibras de vidro (PRFV), cujos resultados apontaram, para um comportamento parcialmente compósito das camadas externas de concreto.

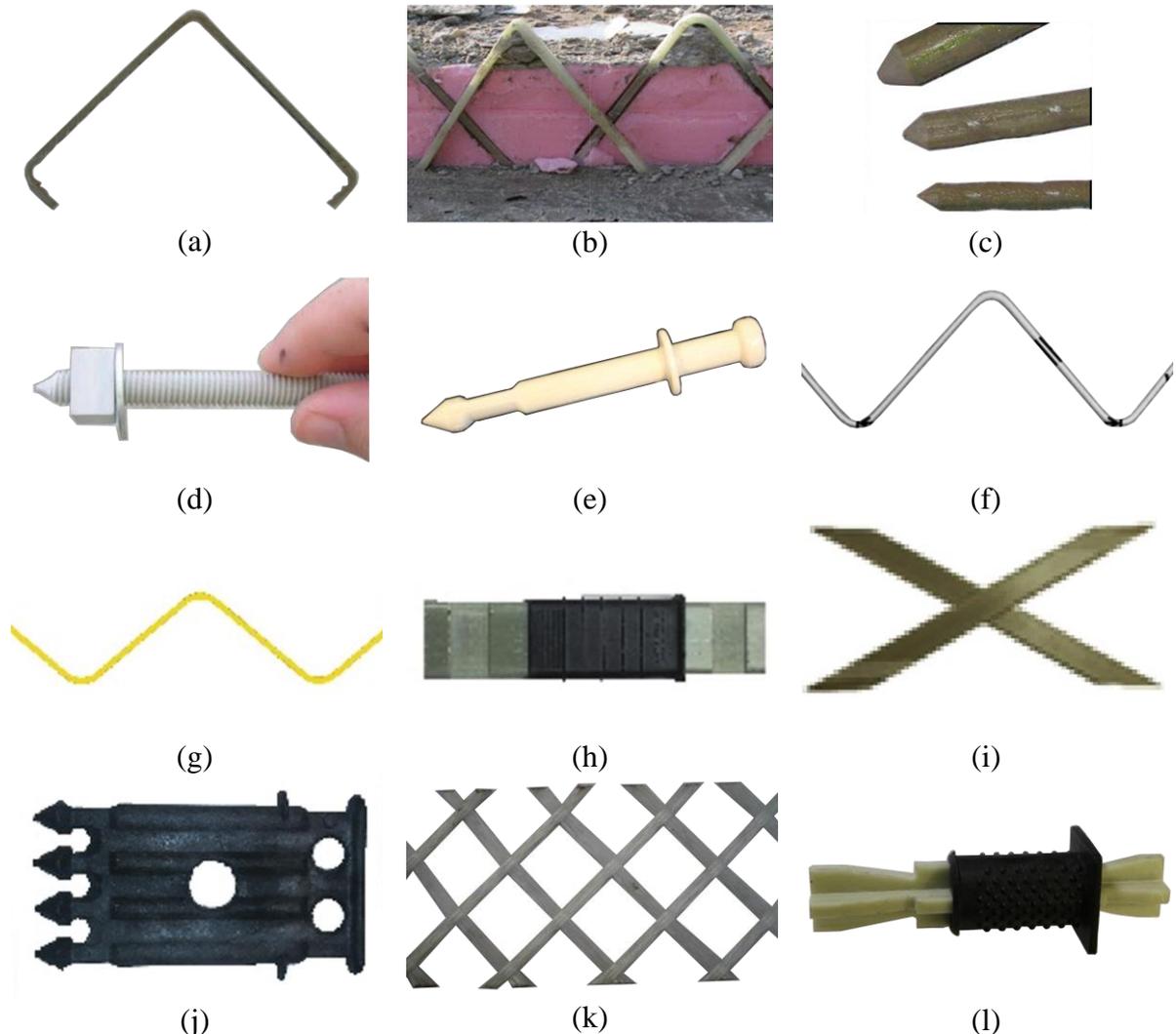


Figura 2.7: Conectores constituídos por PRFV: (a) em formato de “C” (MAXIMOS *et al.*, 2007); (b) em formato de barras treliçadas (OH; JANG; YUN, 2013); (c) em formatos de barras nervuradas (WOLTMAN; TOMLINSON; FAM, 2013); (d) em formato de barras roscadas (WOLTMAN; TOMLINSON; FAM, 2013); (e) em formato de pinos (WOLTMAN; TOMLINSON; FAM, 2013); (f) em formato de barras treliçadas (CHOI *et al.*, 2015); (g) em formato de barras treliçadas (AL-RUBAYE *et al.*, 2018); (h) em formato de pino compósito (AL-RUBAYE *et al.*, 2018); (i) em formato de cruz (AL-RUBAYE *et al.*, 2018); (j) em formato de chapa corrugada (AL-RUBAYE *et al.*, 2018); (k) em formato de grade (CHOI; JANG; YUN, 2019); (l) em formato de pino em cruz (HUANG *et al.*, 2020).

Maximos *et al.* (2007) testaram conectores constituídos por barras dobradas em formato de “C” e treliças discretas ambas fabricadas com PRFV, empregando-se ensaios de cisalhamento duplo (Figura 2.7a). Os resultados obtidos pelos autores foram comparados com os observados para treliças metálicas, cujo desempenho mecânico apresentou-se superior. Os

pesquisadores relataram que um acréscimo na espessura do isolamento, ocasionou um decréscimo na resistência ao cisalhamento para os painéis sanduíche. Os autores observaram, também, que o tipo de soldagem das barras longitudinais das treliças metálicas apresenta pouca influência na resistência ao cisalhamento.

Oh, Jang e Yun (2013) realizaram uma pesquisa na qual conduziram uma série de ensaios *push-out* em painéis sanduíche em conectores de PRFV em formato de grade, empregando-se isolamentos térmicos fabricados com *expanded polystyrene* (EPS) e *extruded polystyrene with surface treatment* (XPSS) (Figura 2.7b). Os autores empregaram dois tipos de conectores, cada qual fabricado com determinada área de seção transversal, para as barras que compõem as grades. Os pesquisadores observaram que o emprego de conectores de PRFV e a utilização de diferentes tipos de isolamento exerceram significativa influência no desempenho ao cisalhamento da interface entre as camadas de concreto e os isolantes. No caso dos painéis sanduíche que empregaram EPS como isolante térmico, os pesquisadores verificaram que a máxima força de cisalhamento decresceu entre 20% e 30%, quando comparadas com os que utilizaram XPSS.

Woltman, Tomlinsom e Fam (2013) compararam a performance de vários conectores de cisalhamento fabricados com PRFV, quando submetidos ao ensaio de cisalhamento duplo em painéis sanduíche (Figura 2.7c, Figura 2.7d e Figura 2.7e). Os conectores foram produzidos com revestimento de areia e com hastes roscadas, os quais foram comparados com conectores convencionais de aço, além de conectores poliméricos. O diâmetro dos conectores de PRFV variou entre 6 mm e 13 mm, ao passo que o espaçamento entre os conectores variou entre 80 mm e 300 mm. Foram testadas seções circulares e retangulares, além de várias configurações de ancoragem, com o objetivo de fazer uma comparação com o embebedimento simples. Com base nos resultados, os autores observaram que as barras de PRFV apresentaram resistência ao cisalhamento entre 60 MPa e 120 MPa, dependendo do tipo de PRFV. Essa resistência apresentou-se significativamente maior que a resistência de conectores fabricados com materiais poliméricos (entre 22 MPa e 39 MPa), mas bem menor que a resistência encontrada para os convencionais conectores de aço (entre 297 MPa e 365 MPa). Observaram, também, que a aderência entre o concreto e o isolamento contribui cerca de 28 % para a resistência total, sendo, no entanto, bastante variável. Os pesquisadores verificaram que conectores de PRFV falharam por delaminação em diferentes planos horizontais paralelos às fibras, rompendo por corte da seção transversal, na direção do carregamento. Relatou-se,

também, uma redução significativa na resistência dos conectores, quando a espessura das camadas de isolamento aumentou.

Choi *et al.* (2015) testaram o efeito do tipo de isolamento (XPS e EPS), da área de seção transversal, do comprimento de treliça e do comprimento de embebedimento na performance de conectores de PRFV em formatos de treliça (ondulados) (Figura 2.7f). Os modos de ruptura observados pelos autores foram arrancamento das conexões na parte superior dos corpos de prova, e arrancamentos seguidos por rompimentos bruscos. Ambos os modos de ruptura relatados ocorreram, no entanto, após o máximo carregamento e para deslocamentos superiores a 30 mm, não prejudicando, assim, a resistência ao cisalhamento da conexão. Foram observados incrementos na resistência ao cisalhamento, resultantes da redução da espessura do isolamento. Relatou-se, também, que o aumento da largura e do comprimento das treliças dos conectores tendeu a aumentar a rigidez e a resistência das conexões. Os autores afirmaram que diferentes conectores, com diversos comprimentos de treliça, mas com áreas de seção transversal iguais, apresentaram resistências ao cisalhamento semelhantes. Além disso, os pesquisadores observaram que a inserção de materiais (tanto rígidos quanto dúcteis) nos furos dos conectores de PRFV pode ocasionar uma melhoria em sua performance mecânica.

Jang e Yun (2015) realizaram uma pesquisa na qual foram ensaiados conectores de PRFV em formato barras treliçadas (ou de ziguezague), dispostos de maneira contínua ao longo do eixo longitudinal da seção transversal dos painéis sanduíche. Foram testados dois formatos de conectores e três tipos de isolamento, que foram o EPS, o XPS e o XPSS. Os autores observaram que XPSS ocasionou uma aderência mais elevada entre o concreto e o isolamento, quando comparado ao EPS e o XPS. Os pesquisadores relataram, também, que os conectores com comprimento de onda de 200 mm e largura de 12 mm apresentaram resistência ao cisalhamento superior aos conectores com comprimento de onda de 300 mm e largura de 18 mm. O aumento do embebedimento, e a consequente redução da espessura do isolamento, proporcionou um aumento na resistência ao cisalhamento das conexões, sendo que, com determinado comprimento de embebedimento, foi possível restringir o arrancamento. Além disso, os pesquisadores relataram que a remoção da aderência entre o isolamento e o concreto tendeu a ocasionar uma diminuição na resistência ao cisalhamento.

Al-Rubaye *et al.* (2018) conduziram uma pesquisa na qual estudaram a resistência ao cisalhamento de conectores de PRFV com formatos de ziguezague, pino, cruzeta, chapa perfurada com ranhuras, empregando isolamentos de EPS, XPS e *polyisocyanurate* (ISO) (Figura 2.7g, Figura 2.7h, Figura 2.7i e Figura 2.7j). Os autores observaram que para os

conectores em formato de pino e de chapas, cujos rompimentos ocorreram principalmente por deformação e ruptura dos próprios conectores (*dowel action*), o papel atribuído à contribuição do tipo de isolamento e à aderência entre o concreto e isolamento apresentou menor importância, quando comparado com os rompimentos ocorridos nos conectores em formato de ziguezaque e em formato de cruzeta. Além disso, relataram que a rigidez, a resistência e a ductilidade da conexão variaram bastante conforme o tipo de conector; e verificaram que a aderência entre o concreto e o isolamento melhorou a resistência de todos os conectores que foram testados. Os autores observaram que, conforme a espessura do isolamento cresceu, a resistência e a rigidez das conexões decresceram, verificando, também, uma correlação entre a ductilidade da conexão e a combinação entre o material constituinte e a geometria do conector.

Choi, Jang e Yun (2019) conduziram, recentemente, uma pesquisa na qual realizaram ensaios em conectores compostos por grades de PRFV com isolamentos de EPS (Figura 2.7k). Os autores observaram que a capacidade resistente tende a diminuir com o incremento da espessura do isolamento, que passa a trabalhar predominantemente em flexão, quando espessuras maiores são empregadas. Foi verificado, também, que a resistência ao cisalhamento é altamente influenciada pelo material isolante e pelo espaçamento entre as grades do conector, e que a espessura da camada de isolamento tende a decrescer o módulo de cisalhamento dos painéis sanduíche.

Huang *et al.* (2020) conduziram uma pesquisa na qual estudaram conectores em formato de pino de PRFV, com seção transversal em formato de cruz, empregando XPS como isolamento (Figura 2.7l). Os autores observaram que o conector proposto apresentou potencial para prover considerável capacidade resistente ao arrancamento e ao cisalhamento e verificaram, também, que o aumento área da seção transversal tem limitada influência na capacidade de cisalhamento da conexão.

2.3.3 Conectores de PRFB

Tomlinson, Teixeira e Fam (2016) utilizaram barras inclinadas de polímero reforçado com fibra de basalto (PRFB) para realizar a conexão entre as camadas de concreto de painéis sanduíche, com o objetivo de avaliar o efeito do diâmetro das barras, da inclinação, da direção da força de cisalhamento e da aderência entre o isolamento e o concreto na performance desse tipo de conexão (Figura 2.8). Os autores observaram que a flambagem e o arrancamento das barras foram os modos de falha observados mais comuns para os espécimes com diâmetros

de 4 mm e de 6 mm, respectivamente. Observaram, também, que o incremento do diâmetro dos conectores tende a aumentar a capacidade última e a rigidez para todas as configurações de ângulo testadas, quando submetidos à compressão ou à tração. Além disso, para os conectores com diâmetros de 6 mm e 8 mm, submetidos à compressão ou à tração diagonal, o incremento no ângulo de inclinação da conexão tendeu a aumentar a capacidade última e a rigidez da conexão. Para barras com 4 mm de diâmetro, o incremento no ângulo da conexão, reduziu a capacidade última.

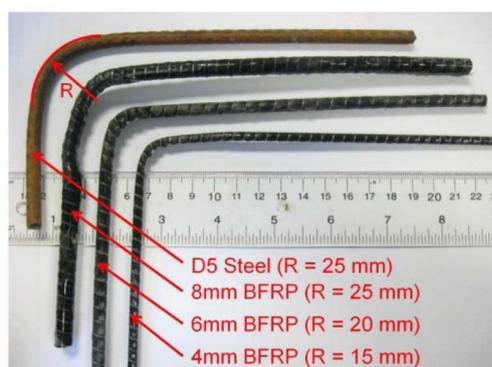


Figura 2.8: Conectores constituídos por barras dobradas de polímero reforçado com fibra de basalto (PRFB), conforme Tomlinson, Teixeira e Fam (2016).

Os pesquisadores relataram que, se submetidos à compressão, os conectores de PRFB apresentaram-se mais fracos que quando submetidos à tração. A diferença na resistência, no entanto, tendeu a desaparecer com o incremento no diâmetro das barras devido à mudança no modo de ruptura observado, de flambagem elástica de barras de pequeno diâmetro, para esmagamento de conectores com diâmetros maiores. Quando submetidos à tração, todos os conectores de PRFB experimentaram ruptura por arrancamento da conexão, exceto no caso das barras com pequeno diâmetro (4 mm) com elevado ângulo de inclinação (60°), cuja ruptura não ocorreu de tal modo, devido ao incremento no comprimento de embebedimento adotado para este diâmetro e ângulo.

2.3.4 Conectores do tipo *Perfobond*

Os conectores do tipo *Perfobond* não são empregados em paredes pré-moldadas de concreto com isolamento incorporado, mas em estruturas compósitas constituídas por aço e concreto. Os conectores do tipo *Perfofrp* foram inspirados, no entanto, nos conectores *Perfobond*, justificando sua menção neste trabalho. A análise das principais características dos

conectores *Perfobond* induz a uma melhor compreensão do comportamento mecânico dos conectores *Perfofr*.

Leonhardt *et al.* (1987), conforme apresentado por Veríssimo (2007), desenvolveram os conectores *Perfobond* com o objetivo de aplicá-los em estruturas mistas para pontes. Esse conector de cisalhamento é rígido e sofre pequenas deformações elásticas quando submetido a cargas de serviço. O *Perfobond* constitui-se por uma chapa de aço plana com furos circulares, soldada ao perfil metálico.

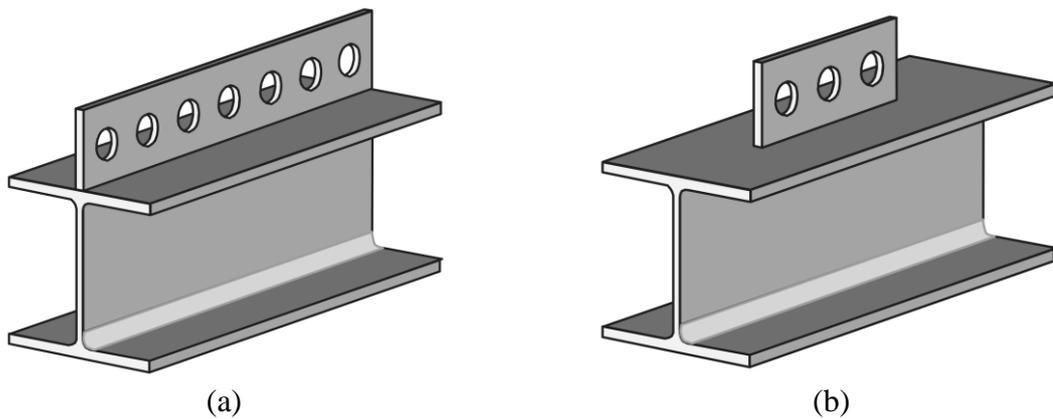


Figura 2.9: Conector do tipo *Perfobond* para estruturas compósitas de aço e concreto, apresentado em sua forma: (a) contínua; (b) discreta (VERÍSSIMO, 2007).

Para os conectores *Perfobond* a capacidade última resulta dos seguintes mecanismos: (a) efeito da frente de concreto; (b) efeito da armadura transversal presente nos furos (quando ela é existente); (c) ação dos pinos de concreto; (d) resistência do concreto em contato com o conector. Os últimos três efeitos são presentes quando o conector é carregado em ambas as direções longitudinal e transversal, enquanto que o efeito da frente de concreto é desenvolvido apenas quando o conector está trabalhando na direção longitudinal, e quando a frente de concreto está presente (LAMEIRAS, 2015).

Existem algumas equações na literatura para prever a capacidade última dos conectores *Perfobond*, quando submetidos ao carregamento longitudinal, conforme apresentado por Lameiras (2015). Oguejiofor e Hosain (1997), propuseram a Equação 2.6, que estima a capacidade resistente do conector, o qual foi deduzida através de um estudo de análise de regressão, com dados obtidos a partir de estudos experimentais e numéricos.

$$Q_{lo} = \beta_1 \cdot h \cdot t \cdot f_{ck} + \beta_2 \cdot A_{tr} \cdot f_y + \beta_3 \cdot n_h \cdot D_h^2 \cdot \sqrt{f_{ck}} + \beta_4 \cdot A_{cc} \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad 2.6$$

As parcelas dessa equação simulam a contribuição dos quatro mecanismos mencionados, onde: h [mm] e t [mm] são a altura e a espessura do conector, respectivamente, f_{ck} [MPa] é a resistência à compressão do concreto, A_{tr} [mm²] é a área de aço, f_y [MPa] é limite de escoamento do aço, n_h [adimensional] é o número de furos no conector, D_h [mm] é o diâmetro dos furos; A_{cc} [mm²] é a área de concreto submetida ao cisalhamento por conector e β_i são coeficientes obtidos por análise de regressão, que melhor adequaram-se aos resultados experimentais e numéricos. Os coeficientes obtidos foram $\beta_1 = 4.470$, $\beta_2 = 0.900$, $\beta_3 = 3.300$ e $\beta_4 = 0.010$. Ahn *et al.* (2010) adaptou a formulação citada, obtendo novos valores de β_i , considerando os resultados experimentais de ensaios conduzidos por esses autores. Os coeficientes encontrados foram $\beta_1 = 3.140$, $\beta_2 = 1.210$, $\beta_3 = 2.977$ e $\beta_4 = 0.000$.

A Equação 2.6 não considera a resistência decorrente da fricção entre o concreto e aço, para considerar essa resistência Sara e Bahram (2002) propuseram a Equação 2.7.

$$Q_{lo} = \alpha_1 \cdot b \cdot h_{ecs} \cdot \sqrt{f_{ck}} + \alpha_2 \cdot A_{tr} \cdot f_y + \alpha_3 \cdot n_h \cdot D_h^2 \cdot \sqrt{f_{ck}} + \alpha_4 \cdot b_f \cdot L_c \quad 2.7$$

Onde b_f [mm] é comprimento de embebimento do chapa de aço dentro do concreto; e L_c [mm] é o comprimento longitudinal da chapa de aço. Os mesmos autores propuseram também uma pequena modificação do efeito da frente de concreto, pois o primeiro termo da Equação 2.7 foi computado com uma função da raiz quadrada da resistência do concreto. Este, por sua vez, depende de b [mm] e de h_{ecs} [mm], os quais são a espessura da camada de concreto e a distância entre a borda do conector *Perfobond* e a borda da camada de concreto, respectivamente. Os parâmetros α_i incluídos na Equação 2.7 foram obtidos de análise de regressão com os valores que melhor se adaptaram aos dados experimentais obtidos pelos autores. Os valores encontrados foram $\alpha_1 = 0.747$, $\alpha_2 = 0.900$, $\alpha_3 = 1.304$ e $\alpha_4 = 0.413$.

2.3.5 Conectores do tipo *Perfofrp*

Lameiras (2015), em sua tese doutorado, intitulada “*Sandwich structural panels comprising thin-walled SFRCC and GFRP connectors: from material features to structural behaviour*”, no Capítulo 7, denominado “*Push-Out Tests*”, realizou uma série de ensaios em conectores de cisalhamento de cisalhamento confeccionados com PRFV. Foram conduzidos ensaios de cisalhamento duplo, inspirados na metodologia descrita pela EN 1994-1-1 (2004), conforme Figura 2.10a.

Foram empregados conectores perfurados de PRFV em formato de chapas, os quais foram denominados por *Perfofrps* (Figura 2.10b). Com relação ao material utilizado, foram empregadas chapas confeccionadas com *Chopped Strand Mat (CSM)* e com *Stitched Roving Fabric (SRF)*. Os conectores fabricados com CSM foram identificados como CSM1, sendo confeccionados com cinco camadas CSM de 450 g/m². Os conectores produzidos com SRF foram identificados como MU4, sendo confeccionados com 12 camadas de SRF, com orientação de $\pm 45^\circ$ e densidade superficial de 400 g/m², e uma camada de SRF com dupla orientação de 0°/90°, com densidade superficial de 600 g/m² para cada direção.

Foram ensaiadas oito configurações de conexões, considerando: o tipo de material empregado (CSM ou SRF), a confecção de furos para ancoragem do concreto e a presença de frentes de concreto. Os conectores foram confeccionados com 12.5 cm de largura por 35 cm de altura, sendo posicionados de modo a proporcionarem nas regiões de concreto: frente de 100 mm, embebedimento de 60 mm e um erguimento de 50 mm.

A concretagem dos corpos de prova foi realizada horizontalmente, com cada parte concretada de maneira isolada, empregando-se concreto auto-adensável reforçado com fibras de aço (CAARFA), com resistência à compressão de 70.87 MPa e espalhamento de 720 mm. Empregaram-se fibras de aço com 0.5 mm de diâmetro, 35 mm de comprimento e resistência à tração de 1300 MPa. Devido ao modo de ensaio empregado, não foram utilizados isolantes térmicos. Assim, a contribuição referente à aderência entre o isolante e o concreto não foi contabilizada.

Adotaram-se corpos de prova constituídos por duas camadas externas de concreto, com dimensões de 400 mm (largura) \times 400 mm (altura) \times 60 mm (espessura), unidas aos perfis metálicos através dos conectores, que foram perfurados e parafusados junto ao aço. Foram empregados dois perfis metálicos em formato de “U”, de padrão *European Standard Channels (UPN)*, denominados UPN 140, com altura de 140 mm de altura, comprimento de 350 mm, e massa linear de 16 kg/m. Esses perfis foram opostamente unidos para formarem um perfil em formato de “I”. Na região da união entre os perfis U, os conectores *Perfofrp* foram inseridos e firmemente aparafusados.

Foram conduzidos ensaios de cisalhamento duplo (*push-out tests*), baseados na metodologia de ensaio descrita na EN 1994-1-1 (2004), com o uso de uma máquina universal para rompimento de corpos de prova com controle de deslocamento de 0.10 mm/min. Seis LVDTs foram, também, estrategicamente posicionados para realizar a leitura do escorregamento relativo entre os conectores e as camadas de concreto. Foram testados dois

espécimes para cada configuração de conexão, totalizando-se, assim, a realização de 16 rompimentos.

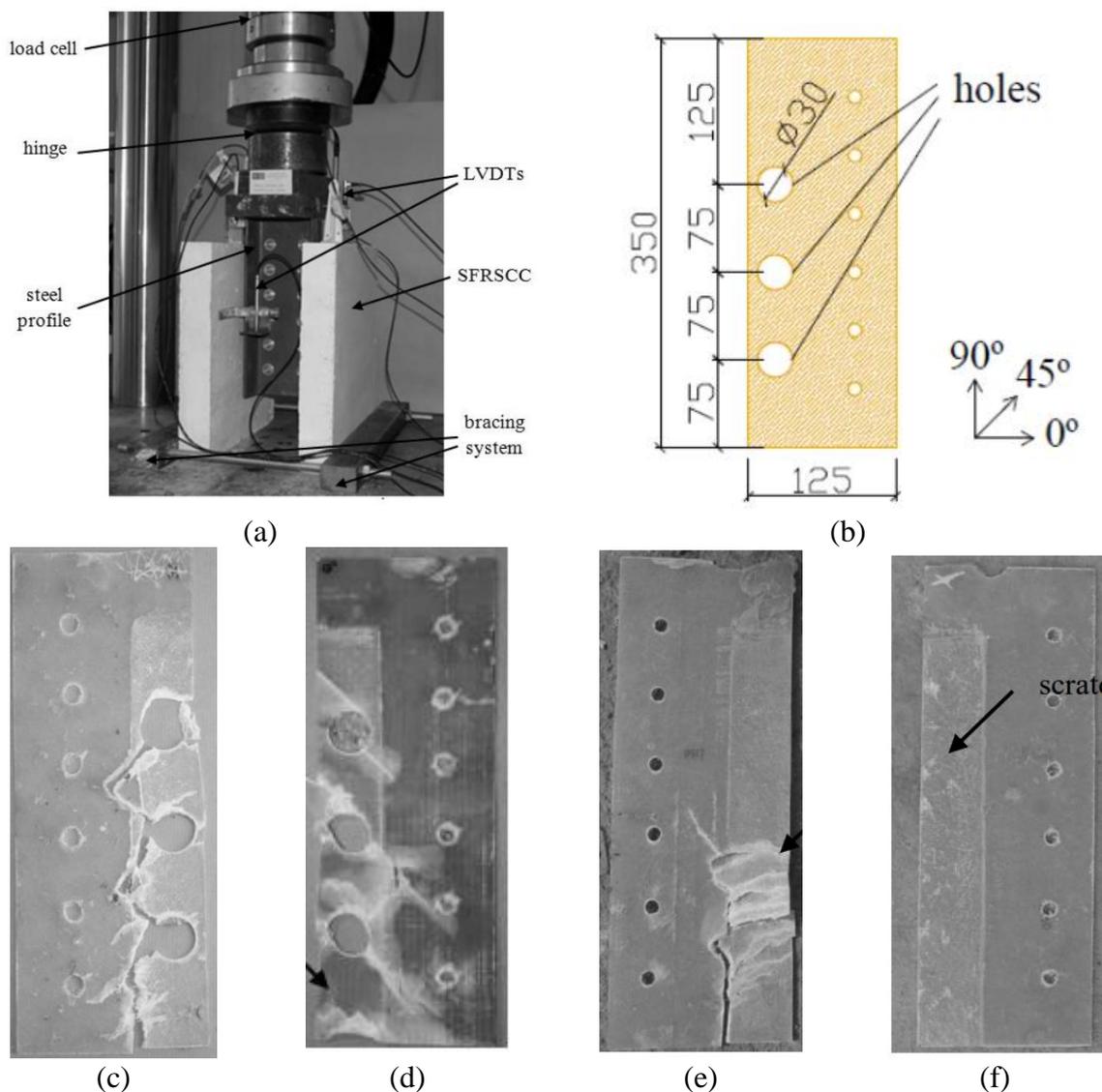


Figura 2.10: Ensaio *push-out*: (a) sistema de ensaio; (b) conector PerfoFRP, com as medidas apresentadas em milímetros [mm]; (c) conector PerfoFRP CSM com ruptura na região dos furos; (d) conector PerfoFRP SRF com ruptura na região dos furos e na região inferior; (e) conector PerfoFRP com ruptura por esmagamento na região inferior; (f) conector PerfoFRP com ranhuras na região de contato com o concreto. Adaptado de Lameiras (2015).

Analisando os resultados obtidos para os ensaios (Tabela 2.1), verificou-se, conforme o autor, que os conectores *Perfofrp*, após a realização dos rompimentos (Figura 2.10c, Figura 2.10d, Figura 2.10e e Figura 2.10f) apresentaram elevada aderência ao concreto, sendo responsável por 38 % da resistência ao cisalhamento da conexão, considerando-se os espécimes com frente e pinos de concreto. A presença dos pinos de concreto, que foram gerados em virtude dos furos confeccionados nas chapas, ocasionou um aumento de 29 %, em média, na resistência

dos conectores ao cisalhamento. Este efeito, no entanto, apresentou-se mais significativo para os espécimes confeccionados com MU4, devido à ruptura prematura dos conectores de CSM. A resistência ao cisalhamento para os conectores MU4 foi, em média, 55 % mais elevada que a dos conectores de CSM. Dentre as diversas variáveis estudadas, o efeito da frente de concreto apresentou o maior ganho de resistência para as conexões que, em média, apresentaram-se 97 % mais resistentes que os espécimes sem esse efeito. Em média, o deslocamento plástico (correspondente a 90 % da carga última) apresentou-se igual a 0.86 mm, com um desvio padrão de 0.47 mm.

Tabela 2.1: Resultados experimentais dos ensaios *push-out* conduzidos por Lameiras (2015), incluindo a capacidade última $Q_{lo,u}$ [kN] e o deslocamento relativo $S_{lo,u}$ [mm].

ID	$Q_{lo,u}$ [kN]	CV [%]	$S_{lo,u}$ [mm]	CV [%]
0H-CSM-WO	29.4	8	0.75	9
0H-CSM-EB	66.6	9	2.30	19
0H-MU4-WO	46.8	14	0.30	5
0H-MU4-EB	94.6	22	0.92	52
3H-CSM-WO	40.1	17	1.17	29
3H-CSM-EB	76.9	13	1.56	20
3H-MU4-WO	66.5	22	0.92	6
3H-MU4-EB	122.2	3	3.22	66

Lameiras (2015) propôs uma equação para prever a capacidade última das conexões *Perbobond*, que considera as contribuições referentes aos mecanismos associados à fricção ($Q_{lo,fr}^{pr}$) e ao efeito dos pinos de concreto ($Q_{lo,do}^{pr}$), conforme 2.8.

$$Q_{lo,u}^{pr} = \tau_{fr} \cdot \left[b_{emb} \cdot L_{con} - \left(n_h \cdot \frac{\pi \cdot D_h^2}{4} \right) \right] + \left(n_h \cdot \frac{\pi \cdot D_h^2}{4} \right) \cdot \nu_c \quad 2.8$$

Onde τ_{fr} [MPa] é a aderência entre o conector e concreto, obtido experimentalmente; b_{emb} [mm] é a o comprimento de embebedimento do conector no concreto; L_{con} [mm] é o comprimento do conector; n_h [adimensional] é a quantidade de perfurações, e D_h [mm] é o diâmetro dos furos; ν_c [MPa] é a tensão última do concreto, quando submetido ao cisalhamento, sendo o valor de 1.05 MPa e de 1.71 MPa obtidos para o CSM e para o MU4, respectivamente.

Huang e Dai (2019) conduziram ensaios de cisalhamento duplo (Figura 2.11a) em painéis sanduíches constituídos por chapas planas (semelhantes às conexões tipo *Perfofrp*), chapas corrugadas e tubos hexagonais, ambos fabricados em PRFV (Figura 2.11b e Figura

2.11c), com isolamento em XPS. Os autores empregaram-se blocos de concreto constituídos por três camadas de concreto com espessura de 75 mm (com armaduras de 12.5 mm para o aço longitudinal, e 10.0 mm para o aço transversal), entre as quais foram colocadas duas camadas de XPS, com espessura de 50 mm. Para realizar a fabricação dos conectores, os autores utilizaram um compósito com fibras orientadas e empregaram um processo de laminação à vácuo.

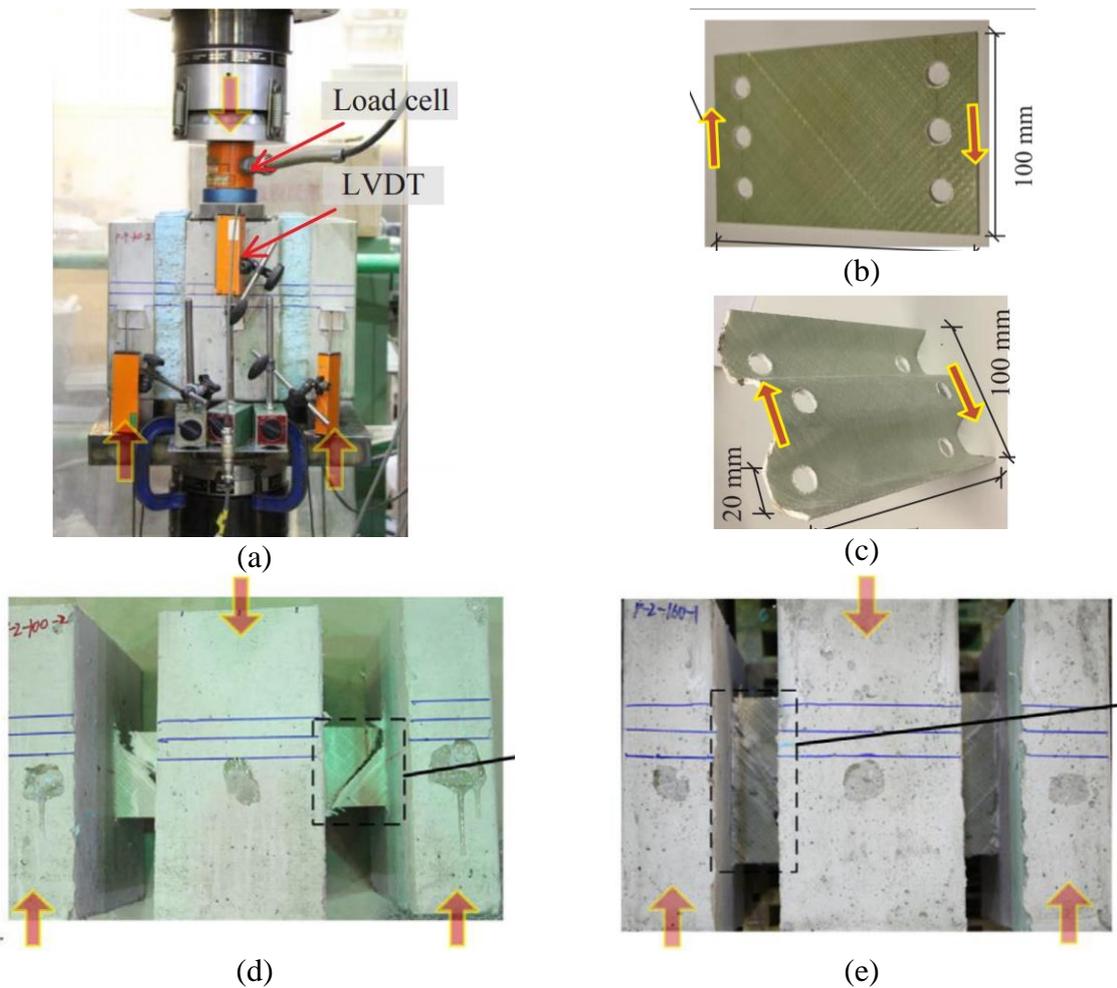


Figura 2.11: Ensaio *push-out*: (a) sistema de ensaio; (b) conector em formato de placa plana; (c) conector em formato de placa ondulada; (d) conector *Perfofrp* 100 mm com rupturas inclinadas na região de contato com isolamento; (e) conector *Perfofrp* 160 mm com rupturas inclinadas na região de contato com o isolamento. Adaptado de Huang e Dai (2019).

Após a ruptura das conexões e obtenção dos resultados (Tabela 2.2), os autores observaram que o modo de falha apresentado por todos os conectores foi cisalhamento longitudinal, com ruptura nas fibras tracionadas (Figura 2.11d e Figura 2.11e). A chapa plana e a chapa corrugada apresentaram, no início do carregamento, similar resistência ao cisalhamento e, também, similar rigidez. Os autores verificaram, também, que mesmo com a

pequena espessura obtida para os laminados (1.30 mm a 1.50 mm), a chapa plana apresentou menos deformabilidade que a corrugada devido ao efeito de flambagem apresentado observado para este último. Além disso, o incremento da espessura do laminado demonstrou-se adequado para prevenir tal flambagem, assim como para melhorar a deformabilidade.

Tabela 2.2: Resultados experimentais dos ensaios *push-out* conduzidos por Huang e Dai (2019), incluindo a capacidade última $Q_{lo,u}$ [kN] e o deslocamento relativo $S_{lo,u}$ [mm].

ID	$Q_{lo,u}$ [kN]	CV [%]	$S_{lo,u}$ [mm]	CV [%]
F-100-2	15.8	1.6	1.05	7.2
F-100-4	35.9	3.1	1.89	2.5
F-160-2	30.4	4.1	1.08	2.7
F-160-4	66.4	1.4	1.64	9.1

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental da pesquisa 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), localizada no Distrito Federal (DF). O programa experimental foi dividido em duas etapas principais, que foram: (a) produção e análise da qualidade dos compósitos e; (b) fabricação e rompimento de conectores de cisalhamento, a partir dos compósitos produzidos, em modelos representativos da conexão em paredes pré-moldadas de concreto com isolamento incorporado (painéis sanduíche).

3.1 Compósitos de PRFV

Ao longo de todo o programa experimental foram fabricadas 27 chapas com dimensões de 25 cm por 70 cm, e espessura de aproximadamente 2.3 mm. A fabricação das chapas foi dividida em três lotes principais, denominados Grupos 01, 02 e 03, e constituídos por 6, 10 e 11 chapas, respectivamente. Todos os compósitos foram constituídos por 5 camadas de fibras de vidro com gramatura de 450 g/m², cada; e embebidas em resina poliéster. O processo empregado para a fabricação dos compósitos foi o de infusão por resina à vácuo, que foi realizado no LabEst.

Uma das contribuições deste trabalho diz respeito ao processo de infusão empregado, que utilizou materiais de baixo custo e de fácil acesso, que podem ser adquiridos e utilizados praticamente em qualquer lugar e ambiente. O tamanho das chapas fabricadas (25 cm × 70 cm) foi definido em função do nível de vácuo disponível para aplicação no sistema (-0.80 atm); e da viscosidade e do tempo de trabalho da resina (cerca de 15 min).

As chapas foram confeccionadas com o intuito de realizar a fabricação de conectores de cisalhamento para paredes pré-moldadas de concreto com isolamento incorporado, conforme conexões já previamente estudadas por Lameiras *et al.* (2013a, 2013b, 2018a, 2018b) e Huang e Dai (2019). Almejando-se avaliar a qualidade dos compósitos produzidos, foram extraídas, no mínimo, duas amostras de cada chapa fabricada, com intuito de realizar ensaios para determinação da tensão última à tração e da fração volumétrica de fibras; cujos ensaios foram realizados em conformidade com normas técnicas vigentes, conforme será mencionado.

3.1.1 Partes constituintes do sistema de infusão por resina à vácuo

O sistema para realização da infusão por resina à vácuo constitui-se por quatro partes principais, cada qual com uma função bastante específica (Figura 3.1), que são as mencionadas a seguir.

(1) Reservatório de resina: consiste em um reservatório fabricado em policloreto de vinila (PVC) no qual a resina catalisada fica depositada durante o processo de infusão, aguardando para ser succionada.

(2) Bolsa de infusão: é a parte do sistema que recebe a resina, sendo composta pelas seguintes camadas, dispostas na seguinte ordem: 1 chapa de vidro de 6 mm de espessura, 1 *peel ply*, 5 mantas de fibra de vidro tipo CSM de 450 g/m², 1 *peel ply*, 1 *air flow*, 1 filme de vácuo. O filme de vácuo, que consiste na última camada do sistema (camada superior), é selado em seu perímetro externo por um cordão de silicone, que realiza a aderência entre o filme de vácuo e a chapa de vidro. Dentro da bolsa de infusão existem duas linhas constituídas por tubulações em espiral (espiradutos), dispostas de maneira oposta, com cada uma colocada em uma das bordas longitudinais da bolsa de infusão (70 cm), sendo denominadas por linha de vácuo e por linha de infusão. A primeira é empregada para realizar aplicação de vácuo ao sistema, sendo colocada com afastamento de 5 cm em relação às mantas de fibra de vidro; ao passo que a segunda é utilizada com o propósito de possibilitar a injeção de resina no sistema, sendo colocada junto às mantas de fibra de vidro. Em ambas as linhas, em suas regiões centrais, é fixada uma conexão em formato de “T”, que possibilita o acesso à bolsa de infusão por outras partes do sistema.

(3) Câmara de vácuo (reservatório de vácuo): consiste em um conjunto interligado de componentes hidrossanitários com diâmetro de 100 mm, formado por tubulações, tampões e conexões em formato de “T” e de “L”. A câmara de vácuo trabalha com pressão interna isolada da atmosfera, sendo responsável por fazer a estabilização e a reserva de vácuo do sistema. Possui quatro extremidades constituídas por tampões, de onde derivam três registros de gaveta de 0.5 polegadas (denominados de vácuo, de infusão e de escape) e um vacuômetro analógico, que é responsável por fazer a aferição da pressão negativa no sistema de infusão. O vacuômetro analógico deve possuir capacidade para medir pressões pelo menos no intervalo de 0.0 atm até -1.0 atm, considerando a escala relativa. Além disso, a câmara de vácuo possui a função adicional de garantir segurança ao funcionamento da bomba de vácuo, atuando como

dreno e, conseqüentemente, impedindo que eventuais excessos de resina cheguem à referida bomba.

(4) Bomba de vácuo: constitui dispositivo responsável por realizar a aplicação de vácuo ao sistema. No caso do presente trabalho foi utilizado um compressor de ar, trabalhando de maneira inversa. Ou seja, o ponto de sucção de ar, utilizado para abastecimento do vaso de pressão do compressor, foi empregado como ponto de sucção para aplicação de vácuo ao sistema de infusão.

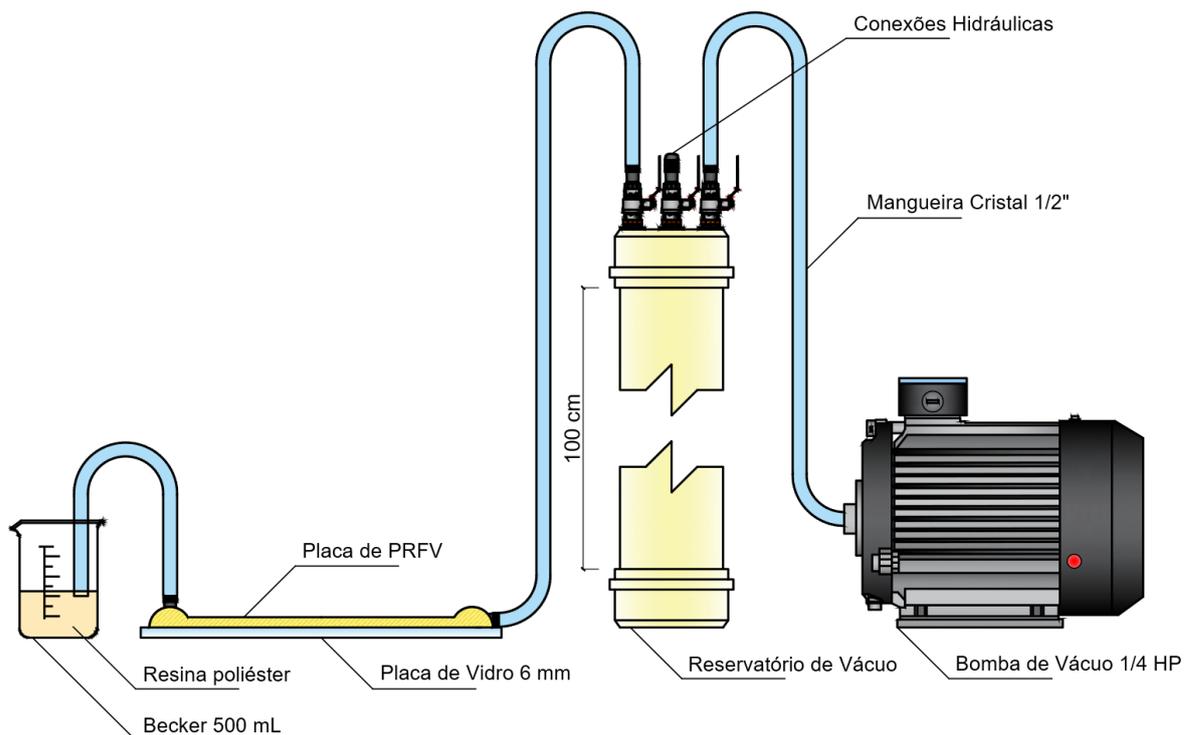


Figura 3.1: Partes constituintes do sistema de infusão por resina à vácuo, empregado para a fabricação das chapas de PRFV.

Todas as quatro partes principais do sistema foram interligadas por mangueiras transparentes reforçadas, com diâmetro de 0.50 polegadas, na seguinte ordem: reservatório de resina, bolsa de infusão, câmara de vácuo e bomba de vácuo. Na mangueira que interliga o reservatório de resina à bolsa de infusão foi colocado um registro para abertura e fechamento do sistema, denominado por registro de resina, que não está representado na Figura 3.1.

Além disso, diferentemente do que está representado de maneira simplificada no esquema apresentado pela Figura 3.1, cada um dos registros pertencentes ao reservatório de vácuo foi colocado, para garantir segurança à funcionalidade do sistema, em um tampão específico. O mesmo procedimento foi realizado para o vacuômetro. Foram empregados,

portanto, cinco tampões, pois em um deles não foi fixado nenhum tipo de conexão para servir com depósito de resina, caso ocorresse sucção em excesso de material a partir da bolsa de infusão.

3.1.2 Montagem do sistema de infusão por resina à vácuo

A fabricação dos compósitos (Figura 3.2), empregando-se a técnica de infusão por resina à vácuo, foi basicamente composta por duas etapas principais, que foram a montagem e a execução do processo infusão, que serão detalhadas a seguir. Os procedimentos aqui descritos inspiraram-se nos apresentados pela *Advanced Vacuum* (2015), com algumas adaptações de modo a possibilitar a fabricação da compósito almejado, e de modo a empregar os materiais, componentes e equipamentos disponíveis para a realização da pesquisa.

O processo de montagem iniciou-se com o corte da manta de fibra de vidro, do *peel ply* e do *air flow* nas dimensões de 25 cm por 70 cm (Figura 3.2a), além do corte do filme de vácuo nas dimensões de 90 cm por 120 cm. Para isto, objetivando-se garantir homogeneidade dimensional, empregou-se um molde de papel; e almejando-se proporcionar precisão ao corte, utilizou-se um estilete profissional. Em seguida, realizou-se a limpeza da placa de vidro, com o intuito de eliminar qualquer possibilidade de contaminação dos compósitos (Figura 3.2b), empregando-se, para este propósito, removeres de impurezas orgânicas. Efetuou-se, em sequência, o processo de montagem da bolsa de vácuo, delimitando-se a área de infusão através da fixação de faixas de fita branca sobre a placa de vidro, e aplicando-se três demãos de cera de carnaúba com agente desmoldante, intercaladas em intervalos de 30 min sobre a superfície delimitada (Figura 3.2c).

Após a secagem da última demão de cera, iniciou-se a deposição sobre a placa de vidro dos materiais constituintes da bolsa de infusão, que foram colocados na ordem descrita em 3.1.1, sobre a área já previamente delimitada e encerada (Figura 3.2d e Figura 3.2e). O *peel ply* não apresenta aderência, após a infusão, à placa de vidro e ao compósito de PRFV, podendo ser facilmente removido após a cura parcial do compósito (12 h). O *air flow*, por sua vez, possui a função de garantir certo espaço livre entre o *peel ply* e o filme de vácuo para permitir a passagem de resina e a garantir a saída de ar. Com a bolsa de infusão montada, conectaram-se as mangueiras que derivam do reservatório de resina e da bomba de vácuo às conexões em formato de “T” pertencentes à bolsa de resina, concluindo-se, assim, o processo de montagem do sistema de infusão (Figura 3.2f).



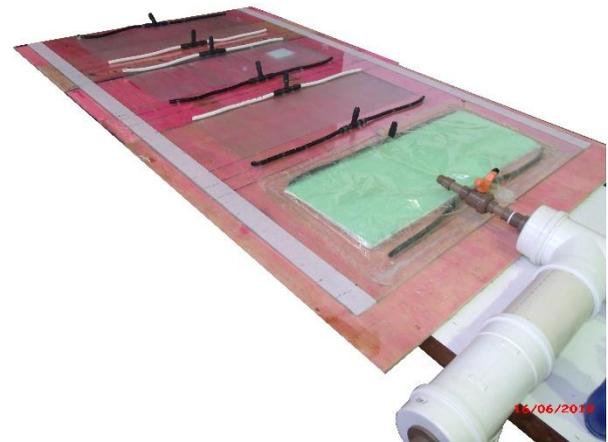
(a)



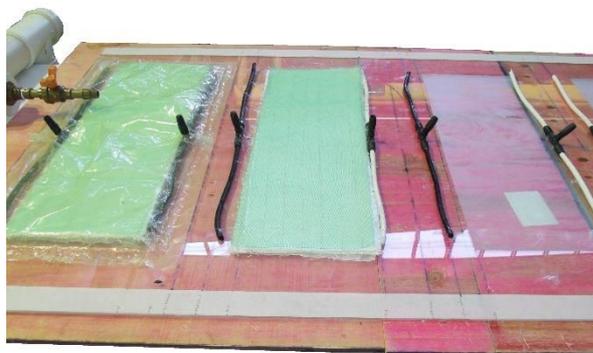
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.2: Processo de fabricação dos compósitos de PRFV: (a) preparação e corte dos materiais; (b) preparação e limpeza da placa de vidro; (c) demarcação da área de aplicação de cera e de infusão; (d) fixação das tubulações e dos materiais sobre a placa de vidro; (e) fixação das tubulações e dos materiais sobre a placa de vidro, vista lateral; (f) sistema de infusão por resina parcialmente pronto para uso, aguardando apenas fixação das últimas mangueiras.

As placas brancas que se encontram simplesmente apoiadas sobre duas das quatro bolsas de infusão, que são mostradas na Figura 3.2f, consistem em placas informativas de

identificação do experimento; e foram removidas durante o processo de fabricação dos compósitos.

3.1.3 Fabricação dos compósitos de PRFV

Com o término da montagem do sistema, iniciou-se a preparação dos materiais para a realização do processo de infusão. Empregaram-se, para cada chapa produzida, cerca de 550 g de resina poliéster insaturada, obtida a partir da condensação de diácidos carboxílicos e glicóis, em solução de monômero de estireno (C_8H_8), catalisada com 1.0 % em massa de peróxido de metiletil cetona ($C_4H_{10}O_4$), conforme recomendações fornecidas pela empresa responsável pela comercialização dos reagentes químicos empregados na pesquisa (ADVANCED VACUUM, 2015).

Anteriormente à aplicação da resina, a bolsa de infusão e o reservatório de vácuo foram testados para verificação de possíveis vazamentos. Estando aprovados, a pressão negativa dentro do sistema foi ajustada a 0.80 atm, ponto no qual houve a sua estabilização. A infusão iniciou-se com a adição de catalisador à resina nas quantidades e proporções já anteriormente mencionadas e, logo após, por meio do manuseio dos registros, a resina foi succionada do reservatório de resina para a bolsa de infusão e, aos poucos, impregnou-se nas camadas cinco camadas constituintes do PRFV. Esta etapa foi realizada em aproximadamente 10 min, a depender da temperatura e da viscosidade da resina no momento da infusão de cada chapa de PRFV.

Terminada a etapa de sucção, o registro de resina foi fechado e, completando-se 15 min após o início da operação, a resina passou a apresentar-se com aspecto gelatinoso, altamente viscoso, cuja trabalhabilidade para fins de sucção tornou-se impraticável. Após esse período, a bomba de vácuo foi mantida acionada por mais 30 min, com o intuito de retirar todo o excesso de ar impregnado no compósito. Decorrido esse tempo, passou a apresentar-se em estado enrijecido, momento no qual, estando evidente a impossibilidade de entrada de ar dentro do compósito, a bomba de vácuo foi desligada.

Decorridas 12 h após o contato entre o catalisador e a resina, estando os compósitos em estado de cura parcial (Figura 3.3a), as chapas de PRFV foram removidas da chapa de vidro, para dar lugar a próxima série de produção. Transcorridas 24 h após o início do processo de catálise, tendo os compósitos atingido a cura total com o completo enrijecimento da resina, as chapas tiveram as bordas aparadas, com o uso de uma serra de mesa; e as camadas de *peel ply*

e *air flow* foram facilmente removidas, estando as chapas, portanto, prontas para o uso (Figura 3.3b).

Neste ponto, o compósito já se encontra com cura total, podendo, inclusive, ser mecanicamente acionado. Todas as chapas fabricadas seguiram os mesmos procedimentos citados, com pequenos e pontuais ajustes na disposição e geometria das tubulações, e de alguns outros componentes do sistema de infusão.

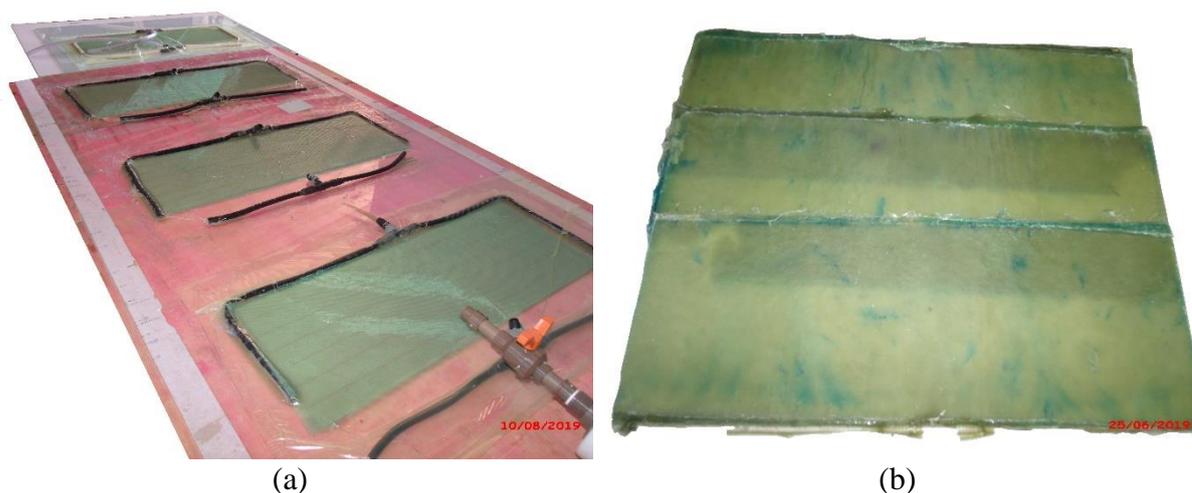


Figura 3.3: Processo de fabricação dos compósitos: (a) aspecto dos laminados imediatamente após a cura parcial; (b) aspecto dos compósitos após a apara de algumas bordas, e após a remoção do *air flow* e do *peel ply*.

3.1.4 Caracterização dos compósitos de PRFV

Após a fabricação dos compósitos, realizou-se a caracterização mecânica de cada uma das chapas, extraíndo-se pelo menos dois espécimes de 25 cm *versus* 2.5 cm, em pontos aleatórios, para realização do ensaio para determinação da tensão última à tração. Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM), empregando-se uma prensa universal para rompimento de corpos de prova, do tipo EMIC DL, com capacidade para 300 kN, e com controle de deslocamento.

O ensaio foi conduzido conforme orientações apresentadas pela ASTM D3039/3039M (2017), conforme Figura 3.4. Os corpos de prova foram fixados em suas extremidades inferior e superior, por um sistema de pressão à ar-comprimado, e tracionados em sua parte inferior com velocidade de 2.0 mm/min. Na extremidade de cada um dos espécimes, foram fixadas (empregando-se cola adesivo instantânea) duas chapas de PRFV de 25 mm *versus* 25 mm, com cada uma sendo fixada de maneira oposta em cada uma das faces do corpo de

prova. Esse procedimento foi realizado com o intuito de melhor distribuir a pressão aplicada pelas garras da prensa às extremidades dos compósitos.

Foram rompidos 59 espécimes, cujas leituras de carga foram aferidas pelo software Tesc 304, com sistema de aquisição de dados de carregamento da própria prensa. As deformações foram aferidas em 14 espécimes (12 para deformações longitudinais, e 2 para deformações transversais), com o emprego de extensômetros fabricados pela *Kyowa*, modelo KFG-5-120-C1-11, fixados em sua região central. As leituras de deformação foram realizadas pelo software *Catman 4.5* com um sistema de aquisição de dados da HBM Teste e Medição, em um computador independente daquele utilizado para aferição das cargas aplicadas. Após a finalização dos ensaios, as duas planilhas que se originaram a partir dos dois sistemas de aquisição de dados foram compatibilizadas por meio do parâmetro tempo, empregando-se a frequência de 1.0 Hz.

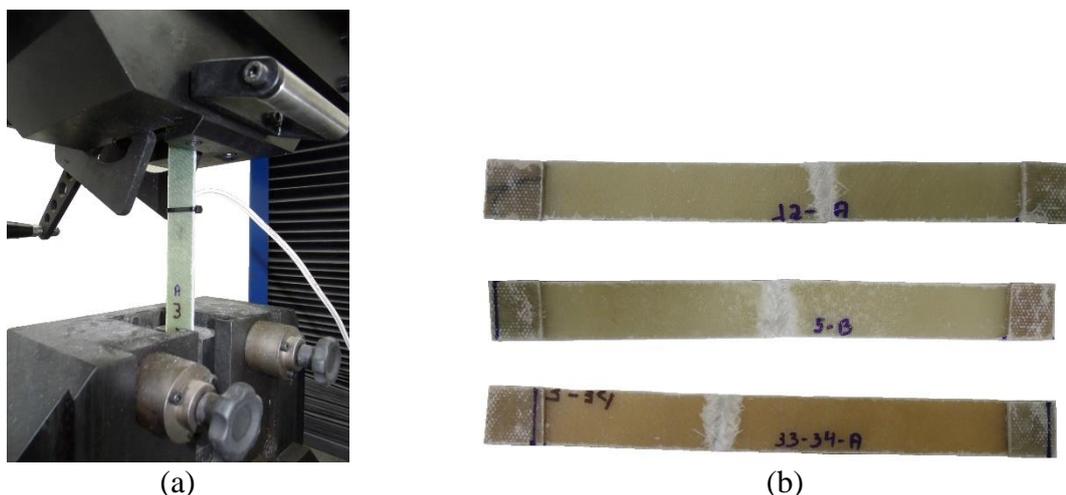
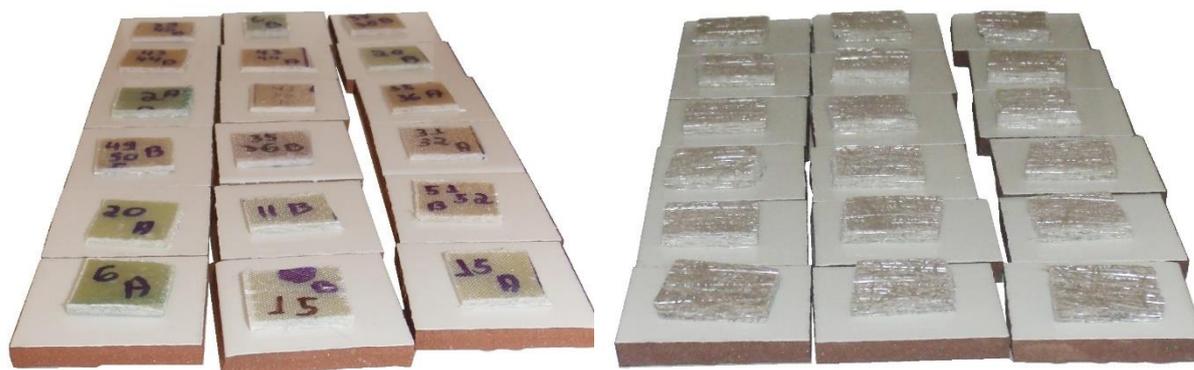


Figura 3.4: Ensaio para determinação da tensão última à tração: (a) execução do ensaio; (b) espécimes após o rompimento.

De cada chapa de PRFV foram extraídas, também, amostras de 25 mm por 25 mm, que foram submetidas ao ensaio para determinação do teor volumétrico de fibras (Figura 3.5). Ao todo, 53 amostras foram ensaiadas, cujos procedimentos foram conduzidos no Laboratório de Degradação, Estabilização e Compostos do Instituto de Química (IQ) da Universidade de Brasília (UnB). O procedimento consistiu em submeter tais amostras à temperatura de 565 °C, durante 6.0 h, conforme recomendações da ASTM D2584 (2018). A massa das amostras foi aferida antes e após a submissão ao calor. A perda de massa, oriunda da volatilização da resina, possibilitou o cálculo da fração volumétrica de fibras.



(a)

(b)

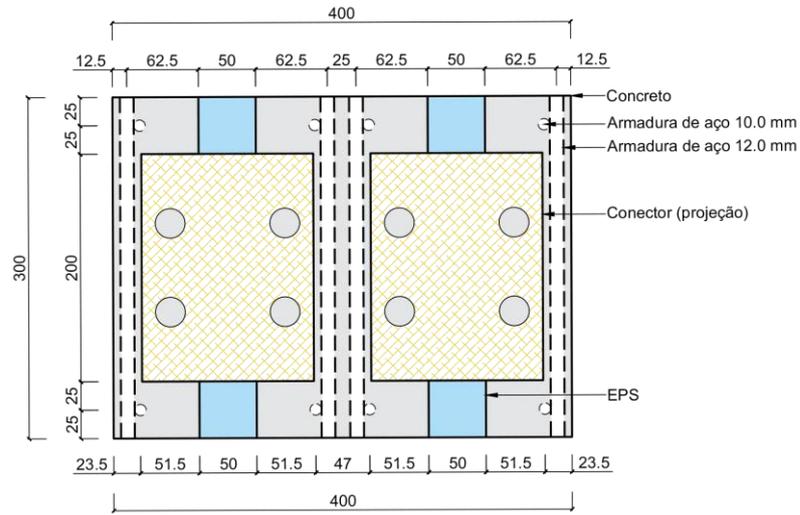
Figura 3.5: Ensaio para determinação do teor volumétrico de fibras: (a) amostras anteriormente à execução do ensaio; (b) amostras após a execução do ensaio.

3.2 Conexões *Perfofrp*

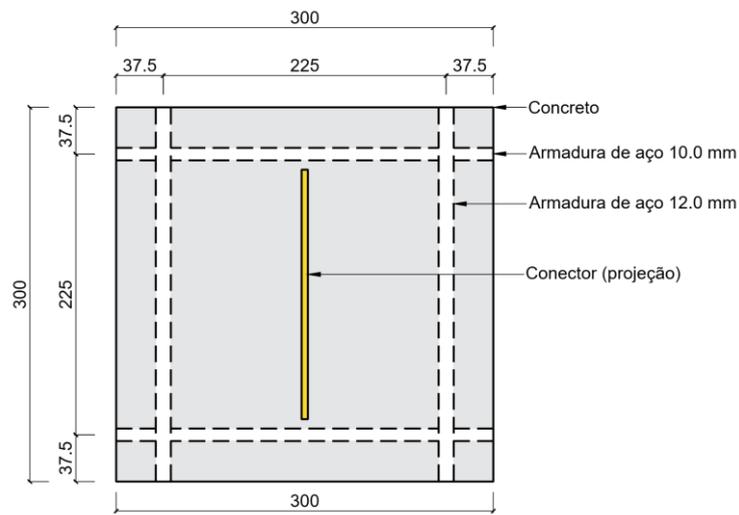
3.2.1 Confeção dos modelos representativos da conexão

Logo após a confecção e caracterização dos compósitos, iniciou-se a fabricação dos espécimes para execução dos ensaios de cisalhamento duplo (*push-out tests*). Os corpos de prova foram fabricados conforme geometria proposta por Huang e Dai (2019), mas com as propriedades dos materiais mais próximas às apresentados pelos compósitos fabricados por Lameiras *et al.* (2013a, 2013b, 2018a, 2018b), conforme Figura 3.6.

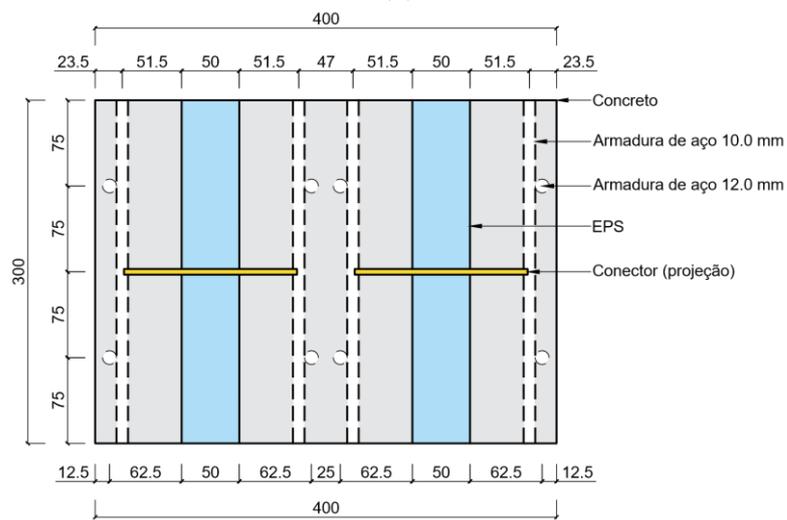
O processo de fabricação iniciou-se com o corte de cada uma das chapas originais de PRFV (25 cm × 70 cm) em quatro chapas retangulares menores com dimensões de 15 cm × 20 cm, que constituíram o formato adotado para o conector. O corte foi efetuado de maneira adaptada com a utilização de uma serra circular de mesa, própria para a execução de cortes em madeira. Para realizar a execução dos cortes, tomou-se o cuidado de manter a parte superior do disco de serra apenas um pouco acima (uns 5.0 mm) da espessura dos PRFV (cerca de 2.3 mm). Esse procedimento foi realizado com o intuito de garantir que, durante a realização dos cortes, o golpe aplicado pelo disco de serra sobre os PRFVs fosse realizado com menor intensidade, fazendo com que o dado do golpe sobre o compósito fosse minimizado. Os PRFV foram passados através do disco com velocidade baixa e uniforme, almejando-se alcançar os mesmos objetivos de minimização dos danos ocasionados pelos golpes, já anteriormente mencionados. Em seguida, estando todas as placas sido cortadas, realizou-se a perfuração dos conectores, fazendo-se uso de um conjunto serra copos e de uma furadeira de bancada.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.6: Configuração dos blocos, com medidas apresentadas em milímetros [mm]: (a) vista frontal; (b) vista lateral; (c) vista superior.

Adotaram-se furos com diâmetros de 6.35 mm, 12.70 mm, 19.05 mm, 25.40 mm e 31.75 mm; distanciados entre si 1.75, 2.00, 2.50 e 3.00 vezes o diâmetro do respectivo furo, com a distância entre os furos adotando como referência o centro da perfuração. Um gabarito de perfuração foi empregado com o objetivo de garantir precisão dimensional, durante a execução das perfurações.

A Figura 3.7 apresenta o posicionamento adotado para os conectores *Perfofrps*, que foram empregados neste trabalho, considerando uma das configurações de diâmetro e espaçamento escolhidas. Os conectores foram divididos, considerando sua direção transversal, em três regiões, cada uma com 50 mm de largura. Sendo que, em ambas as extremidades, essas regiões constituíram a área de embebedimento do conector no concreto (ou de ancoragem); ao passo que em sua região central, consistiu na área em contato com o isolamento térmico. Os furos foram centralizados nas áreas de embebedimento do conector no concreto, considerando a direção transversal do conector; ou seja, as seguintes distâncias: (a) entre a borda do furo e a borda do conector, (b) e entre a borda do furo e a interface entre o concreto e o isolamento térmico foram mantidas constantes. Em sua direção longitudinal, os furos foram distribuídos a partir do centro da conexão em direção à borda, com o centro geométrico das perfurações no seu sentido longitudinal coincidindo com o centro geométrico da chapa retangular de PRFV.

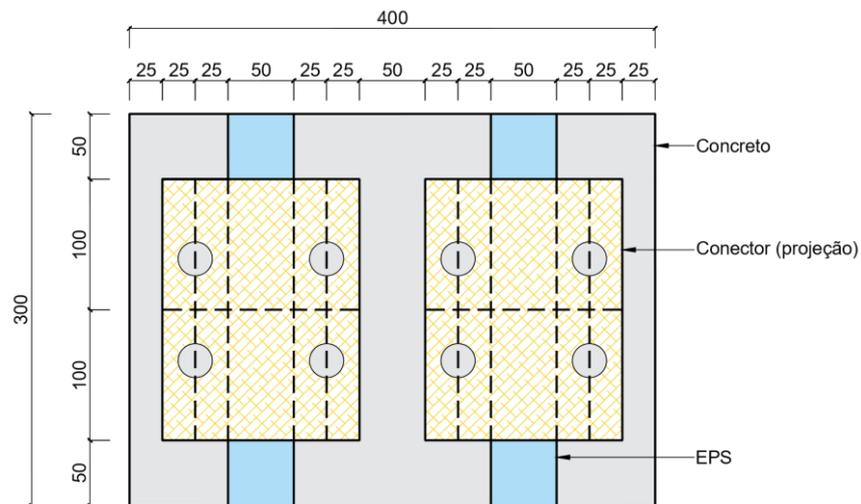


Figura 3.7: Posicionamento do conector *Perfofrp* no bloco de concreto e posicionamento dos furos no conector *Perfofrp*, com omissão da armadura, e com as medidas apresentadas em milímetros [mm].

Para realizar a identificação dos espécimes (Tabela 3.1), utilizou-se a seguinte nomenclatura: SP-X-Y-r, onde SP significa espécime, X representa o diâmetro em milímetros [mm] adotado para o furo (6.35 mm, 12.70 mm, 19.05 mm, 25.40 mm, 31.75 mm), Y representa o espaçamento empregado (1.75, 2.00, 2.50, 3.00), e r representa a réplica (A, B, C). Para o

espécime controle (sem furos), adotou-se a nomenclatura CTL. Todos os espécimes foram confeccionados com concreto C40 (40 MPa de resistência à compressão) e com aço CA50 (500 MPa de limite de escoamento do aço).

Tabela 3.1: Identificação dos espécimes do grupo principal

Espécime	QTD	Diâmetro	Espaçamento
		[mm]	[adimensional]
SP-6.35-3.00	3	6.35	3.00
SP-12.70-1.75	2	12.70	1.75
SP-12.70-2.00	3	12.70	2.00
SP-12.70-2.50	2	12.70	2.50
SP-12.70-3.00	3	19.05	3.00
SP-19.05-2.00	2	19.05	2.00
SP-19.05-3.00	3	25.40	3.00
SP-25.40-1.75	3	25.40	1.75
SP-25.40-2.00	3	25.40	2.00
SP-25.40-3.00	3	25.40	3.00
SP-31.75-2.00	3	31.75	2.00
SP-31.75-3.00	3	31.75	3.00
SP-CTL	3	-	-

Alguns espécimes foram confeccionados com algumas características especiais, que foram: (a) classes de resistência diferentes da usualmente empregada (30 0 MPa ou 50 MPa); (b) uso de fibras de aço em substituição à armadura convencional (tipo FS-7, com 1.0 % em relação ao volume de concreto); (c) duplicação da fileira de furos para os conectores com furos de 6.35 mm de diâmetro; (d) sem o uso dos conectores, empregando-se apenas o isopor para resistir ao cisalhamento. Para identificar esses espécimes especiais, foram utilizados identificadores dentro de parênteses, conforme Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Identificação dos espécimes do grupo secundário

Espécime	QTD	Diâmetro	Espaçamento	Característica especial
		[mm]	[adimensional]	
SP-6.35(2F)-3.00	3	6.35	3.00	Duplicação da fileira de furos
SP(C30)-19.05-2.00	2	12.70	1.75	Concreto de 30.0 MPa
SP(C50)-19.05-2.00	2	12.70	2.00	Concreto de 50.0 MPa
SP(CFA)-19.05-2.00	2	12.70	2.50	Concreto com fibras de aço
SP-EPS	1	-	-	Espécime sem conector

A Figura 3.8 (grupo principal) e a Figura 3.9 (grupo secundário, ou especial) apresentam a configuração geométrica adotada para os conectores.

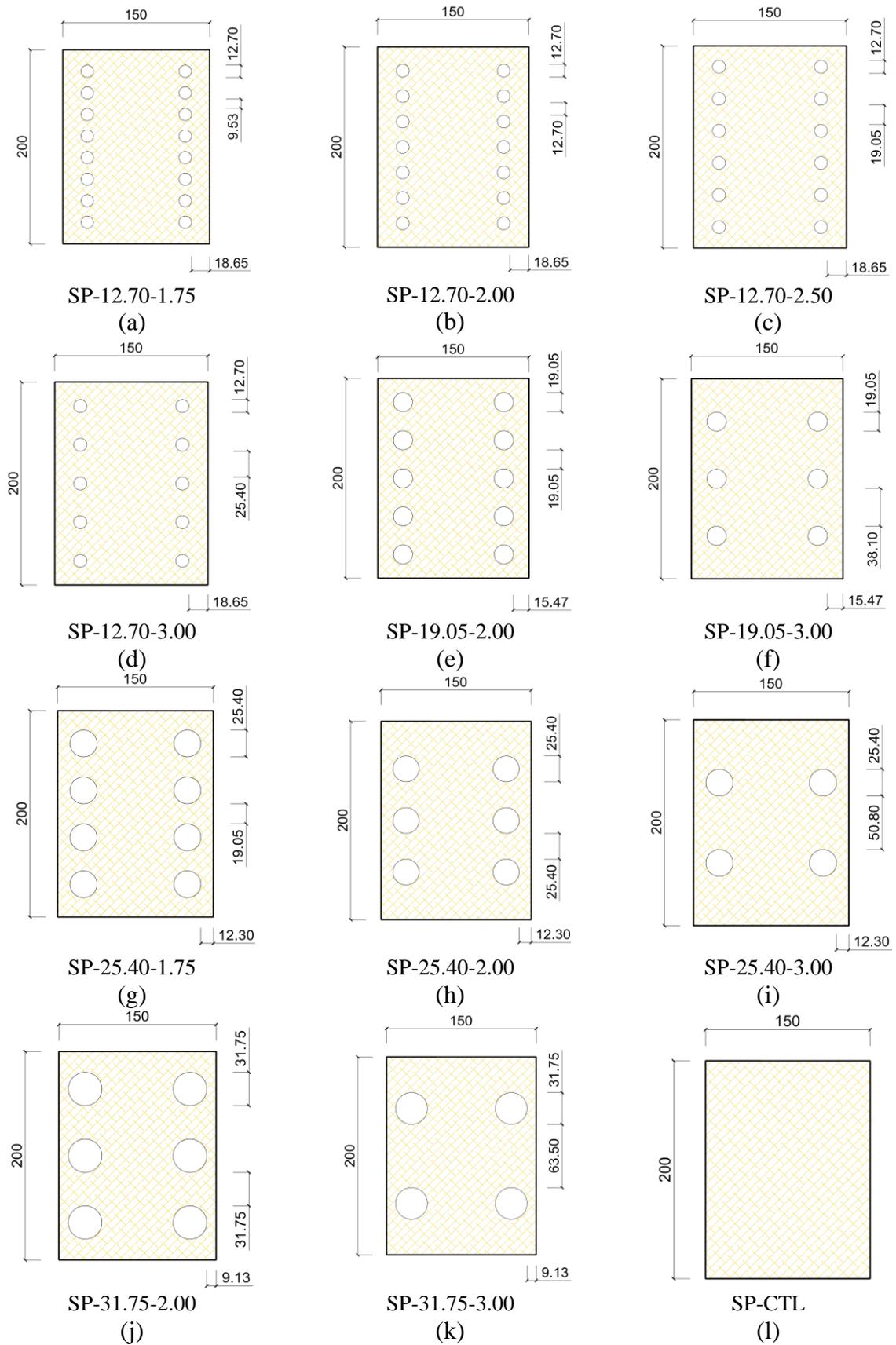


Figura 3.8: Configuração de furos e espaçamentos, com medidas em milímetros [mm]: (a) SP-12.70-1.75; (b) SP-12.70-2.00; (c) SP-12.70-2.50; (d) SP-12.70-3.00; (e) SP-19.05-2.00; (f) SP-19.05-3.00; (g) SP-25.40-1.75; (h) SP-25.40-2.00; (i) SP-25.40-3.00; (j) SP-31.75-2.00; (k) SP-31.75-3.00; (l) SP-CTL.

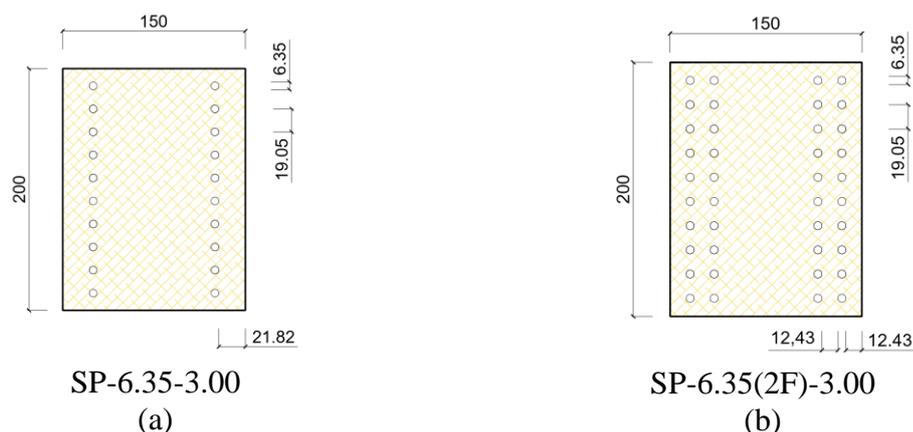


Figura 3.9: Configuração de furos e espaçamentos, com as medidas apresentadas em milímetros [mm]:
 (a) SP-6.35-3.00; (b) SP-6.35(2F)-3.00.

Logo após a confecção dos conectores, iniciou-se o processo de confecção dos blocos para execução do ensaio *push-out*, que consistiu nas seguintes etapas: fabricação das fôrmas de madeira (com uso de madeirite de 13 mm de espessura); montagem das armaduras (com o uso de barras de 12.5 mm para o aço longitudinal, e barras de 10.0 mm para o aço transversal); corte das chapas de EPS; fixação dos conectores no EPS; e montagem final dos blocos, conforme Figura 3.10.

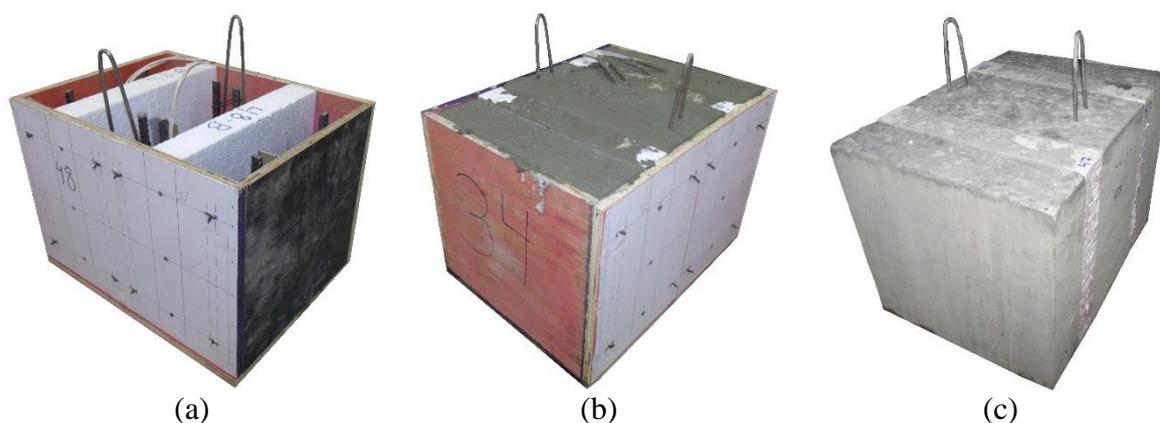


Figura 3.10: Montagem dos espécimes: (a) posicionamento dos elementos constitutivos; (b) concretagem; (c) bloco após a concretagem.

Os cortes nos madeirites para fabricação das fôrmas foram realizados com uma serra circular de mesa, e as chapas foram unidas empregando-se parafusos, que foram fixados utilizando-se uma furadeira eletromecânica, que possuía controle de velocidade. As armaduras foram fixadas junto às fôrmas com o uso de fios de aço, próprios para a fabricação de armações. Empregaram-se, também, ganchos constituídos por barras dobradas com 5.00 mm de diâmetro, fixados em cada uma das extremidades da região central de concreto, com o intuito de

proporcionar um ponto de ancoragem para o erguimento dos blocos empregando-se a ponte rolante do Laboratório de Estruturas (LabEst).

O corte do EPS foi realizado de maneira adaptada com o uso de uma serra circular de mesa, própria para cortes em madeira, que proporcionou um acabamento superficial bastante satisfatório para o material. As placas de EPS de dimensões 1.00 mm × 0.50 mm foram cortadas em placas menores de 30 cm × 30 cm, que em seguida foram encaixadas nas fôrmas de madeira.

A concretagem dos blocos com conectores com diâmetros de 12.70 mm, 25.40 mm e 31.75 mm foi realizada com material proveniente de usina, com a concretagem feita em etapa única no LabEst. A concretagem dos modelos com diâmetros de 6.35 mm, 19.05 mm e do grupo controle foi realizada manualmente com material amassado em betoneira mecânica no LEM, sendo realizada em várias etapas, conforme traços desenvolvidos por Cardoso (2020).

A concretagem dos blocos com material proveniente de usina foi executada com abatimento definido em 10 ± 2 cm. Os parâmetros mecânicos apresentados pelo concreto, foram: resistência à compressão de 37.5 MPa (Classe C40), resistência à tração de 4.5 MPa e módulo de elasticidade de 31.0 GPa. As características mecânicas do concreto foram aferidas no LEM, em idades próximas à execução dos ensaios *push-out* (28 dias), em corpos de prova cilíndricos de concreto de 10 cm *versus* 20 cm, que foram curados juntos aos blocos.

Os blocos concretados com material amassado em betoneira mecânica apresentaram resistência à compressão de 40.11 MPa (Classe C40), com erro médio entre as oito etapas de concretagem de 5.86 %. Para os blocos constituídos por concreto de Classe C30, obteve-se resistência à compressão de 28.93 MPa, com erro médio entre as duas etapas de concretagem de 2.58 %. Para os blocos confeccionados por concreto de Classe C50, obteve-se resistência à compressão de 48.28 MPa, que foi realizado em etapa única.

3.2.2 Sistema de ensaio

Os ensaios *push-out* foram conduzidos no LabEst, conforme configuração de ensaio na Figura 3.11, que consiste em inserir dentro do pórtico de reação (Figura B.1 no Apêndice B), na seguinte ordem: os apoios, o bloco, a rótula, a célula de carga (com capacidade de carga de 500 kN, fabricado pela HBM Teste e Medição), e o atuador hidráulico (com capacidade de carga, também, de 500 kN, fabricado pela Enerpac). A realização do ensaio *push-out* consiste, basicamente, em apoiar as camadas externas de concreto, e submeter ao carregamento a camada interna. Isso faz com que os conectores de PRFV sejam submetidos ao cisalhamento.

Para realizar a aferição dos deslocamentos foi colocado um defletômetro do tipo *Linear Variable Differential Transducer* (LVDT) em cada camada externa de concreto (denominados C e D), e dois LVTs na camada interna de concreto (denominados A e B). O deslocamento relativo foi calculado realizando-se a diferença entre a média das leituras realizadas pelos LVDTs A e B (deslocamento total dos conectores) e a média das leituras aferidas pelos LVDTs C e D (acomodação dos apoios). Esse procedimento foi realizado com o intuito de subtrair do deslocamento total a acomodação dos apoios, obtendo-se, assim, o deslocamento relativo dos conectores. Os LVDTs empregados possuem curso máximo de 50 mm e, também, foram fabricados pela HBM Teste e Medição. Chapas de borracha foram colocadas nas áreas de contato entre os apoios e as camadas externas de concreto, e entre a rótula e a camada interna de concreto, com o intuito de acomodar possíveis imperfeições superficiais. A aquisição de dados foi realizada na frequência de 1.0 Hz, empregando-se um módulo de aquisição *Spider 8*, conectado ao software *Catman 4.5*.

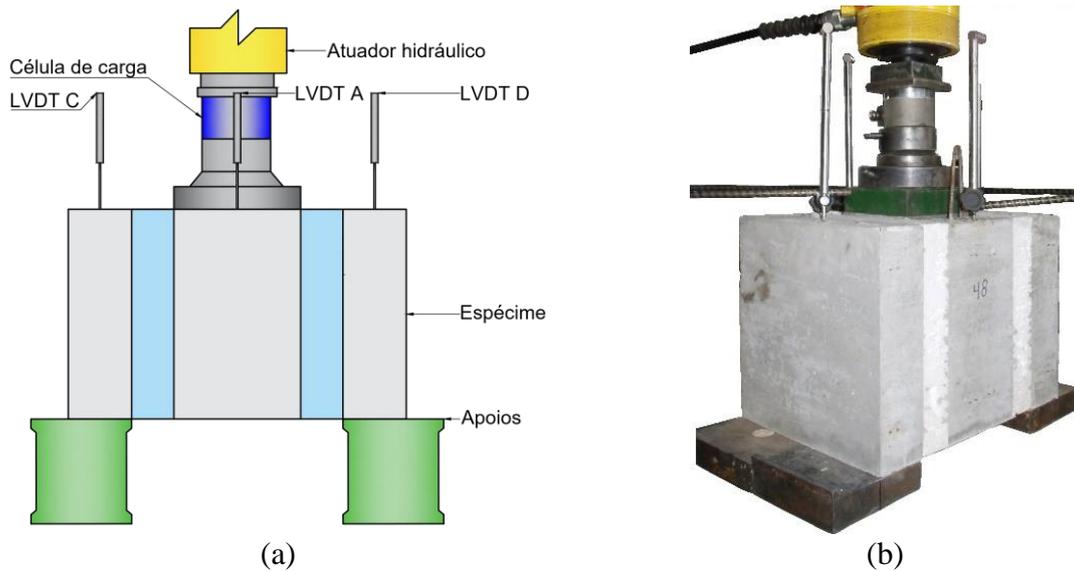


Figura 3.11: Ensaio *push-out*: (a) esquema de ensaio; execução do ensaio.

O procedimento experimental consistiu em acionar-se manualmente uma bomba hidráulica (também de fabricação da Enerpac) que, por sua vez, transmitiu uma pressão ao atuador hidráulico, fazendo com que o deslocamento do pistão fosse executado empregando-se um controle de carga aproximado de 8.0 kN/min. O carregamento foi aplicado até a detecção da ruptura da conexão, que foi verificada pela queda na leitura da carga. A partir desse ponto, o carregamento foi mantido até cerca de 50 % do carregamento máximo. Logo após a ruptura, os conectores foram extraídos dos blocos, para análise das fissuras desenvolvidas.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Apresentam-se, nesta seção, os resultados obtidos com o desenvolvimento do programa experimental, que dividem-se, basicamente, em duas partes: (a) a avaliação da qualidade dos compósitos produzidos; (b) e o comportamento mecânico dos blocos constituídos por conexões representativas da conexão entre camadas externas de paredes pré-moldadas de concreto com isolamento incorporado (painéis sanduíche), sendo que, tais conexões foram confeccionadas com uso dos compósitos de polímero reforçado com fibras de vidro (PRFV) produzidos na primeira etapa da pesquisa.

Ao longo de todo o programa experimental foram confeccionadas 27 chapas de PRFV, divididas em 3 grupos de confecção (ou 3 lotes de produção). Esses grupos, denominados Grupos 01, 02 e 03, foram constituídos, respectivamente, por 6, 10 e 11 chapas. Cada grupo foi confeccionado com resina poliéster, catalisador e fibras de vidro provenientes de uma mesma origem, ou mesmo lote. Ao longo do processo de produção, alguns pequenos ajustes foram sendo realizados na disposição e geometria dos materiais constituintes do processo de infusão, objetivando-se proporcionar uma melhoria contínua da qualidade dos compósitos de PRFV.

4.1 Caracterização dos compósitos

Na Tabela 4.1 observam-se os resultados obtidos para a espessura (ϵ), para a tensão última à tração ($\sigma_{pt.u}$), e para a fração volumétrica de fibras (V_f), acompanhados por seus respectivos coeficientes de variação (CV). São apresentados, também, as quantidades de amostras extraídas para a realização de cada um dos ensaios, que foram executados. Todas as chapas produzidas foram submetidas ao ensaio para determinação da resistência última à tração, e ao ensaio para obtenção do teor volumétrico de fibras. O compósito obtido ao longo do programa experimental apresentou, em média, as seguintes características: espessura de 2.32 mm, tensão última à tração de 164.24 MPa, e fração volumétrica de fibras de 39.04 %. As Chapas 01 a 06, 11 a 20, e 31 a 41 correspondem, respectivamente, aos Grupos 01, 02 e 03.

As Figura 4.1a, Figura 4.1b e Figura 4.1c apresentam os resultados dos ensaios de tração, que foram executados para realizar a determinação do módulo de elasticidade longitudinal dos compósitos ($E_{pt.l}$); cujas curvas tensão *versus* deformação acompanharam aproximadamente metade do ensaio, ponto no qual a capacidade máxima de deformação dos

extensômetros utilizados foi esgotada. A Figura 4.1d apresenta os resultados dos ensaios de tração, que foram executados para realizar a determinação do módulo de elasticidade transversal ($E_{pt.t}$) dos compósitos; cuja curva tensão *versus* deformação conseguiu acompanhar todo o ensaio realizado, devido às menores deformações apresentadas pelo compósito nessa direção. As amostras para execução desses ensaios foram aleatoriamente extraídas de cada um dos grupos de compósitos produzidos. Para ambos os ensaios executados foram observadas correlações lineares bastante significativas, sendo que o R^2 médio para os módulos longitudinal e transversal encontrados foram 0.997 e 0.992, respectivamente.

Tabela 4.1: Espessura, tensão última à tração e fração volumétrica de fibras das chapas de PRFV.

Chapa PRFV	Espessura			Tensão última à tração			Fração volumétrica de fibras		
	Tamanho amostral	Média [mm]	CV [%]	Tamanho amostral	Média [MPa]	CV [%]	Tamanho amostral	Média [%]	CV [%]
01	2	2.20	3.33	2	180.77	9.10	2	45.92	1.05
02	2	2.29	1.68	2	196.14	4.85	2	38.45	0.60
03	2	2.30	1.81	2	212.56	2.17	2	43.24	1.88
04	2	2.53	0.40	2	181.17	17.47	2	37.21	1.51
05	2	2.25	0.81	2	154.33	6.69	2	38.06	3.67
06	2	2.60	1.93	2	126.66	9.81	1	37.80	-
11	2	2.54	12.60	2	161.41	2.69	2	35.79	3.38
12	2	2.53	4.42	2	178.50	1.66	2	33.81	2.29
13	2	2.27	0.22	2	162.93	2.80	2	38.59	1.48
14	2	2.41	11.14	2	155.24	12.35	1	36.15	-
15	2	2.55	1.24	2	168.98	0.46	2	36.86	0.02
16	3	2.11	7.01	3	172.79	15.13	3	44.06	2.49
17	3	2.58	5.60	3	139.66	10.61	3	39.19	1.97
18	2	2.11	8.00	2	165.05	7.32	2	41.16	3.04
19	3	2.25	1.98	3	165.15	10.64	2	35.86	0.05
20	2	1.97	2.03	2	184.62	5.31	2	40.84	1.20
31	2	2.27	4.77	2	162.25	1.27	1	36.48	-
32	2	2.42	1.52	2	134.50	5.15	1	37.03	-
33	3	2.39	4.04	3	156.46	17.45	3	39.34	0.10
34	2	2.36	0.28	2	160.96	10.49	2	39.13	2.08
35	2	2.27	1.10	2	124.76	19.82	2	39.38	0.09
36	2	2.19	1.82	2	172.55	7.30	2	40.38	2.95
37	2	2.32	0.36	2	147.54	11.26	2	37.65	1.85
38	3	2.28	0.66	3	175.26	1.09	2	40.26	0.00
39	2	2.24	9.29	2	170.09	8.59	2	38.38	3.54
40	2	2.16	0.54	2	160.31	9.52	2	41.74	1.02
41	2	2.20	5.84	2	163.82	1.81	2	41.24	2.49
Lote A		2.36	1.66		175.27	8.35		40.11	1.74
Lote B		2.33	5.42		165.43	6.90		38.23	1.77
Lote C		2.28	2.75		157.14	8.52		39.18	1.57
Geral		2.32	3.50		164.24	7.88		39.04	1.69

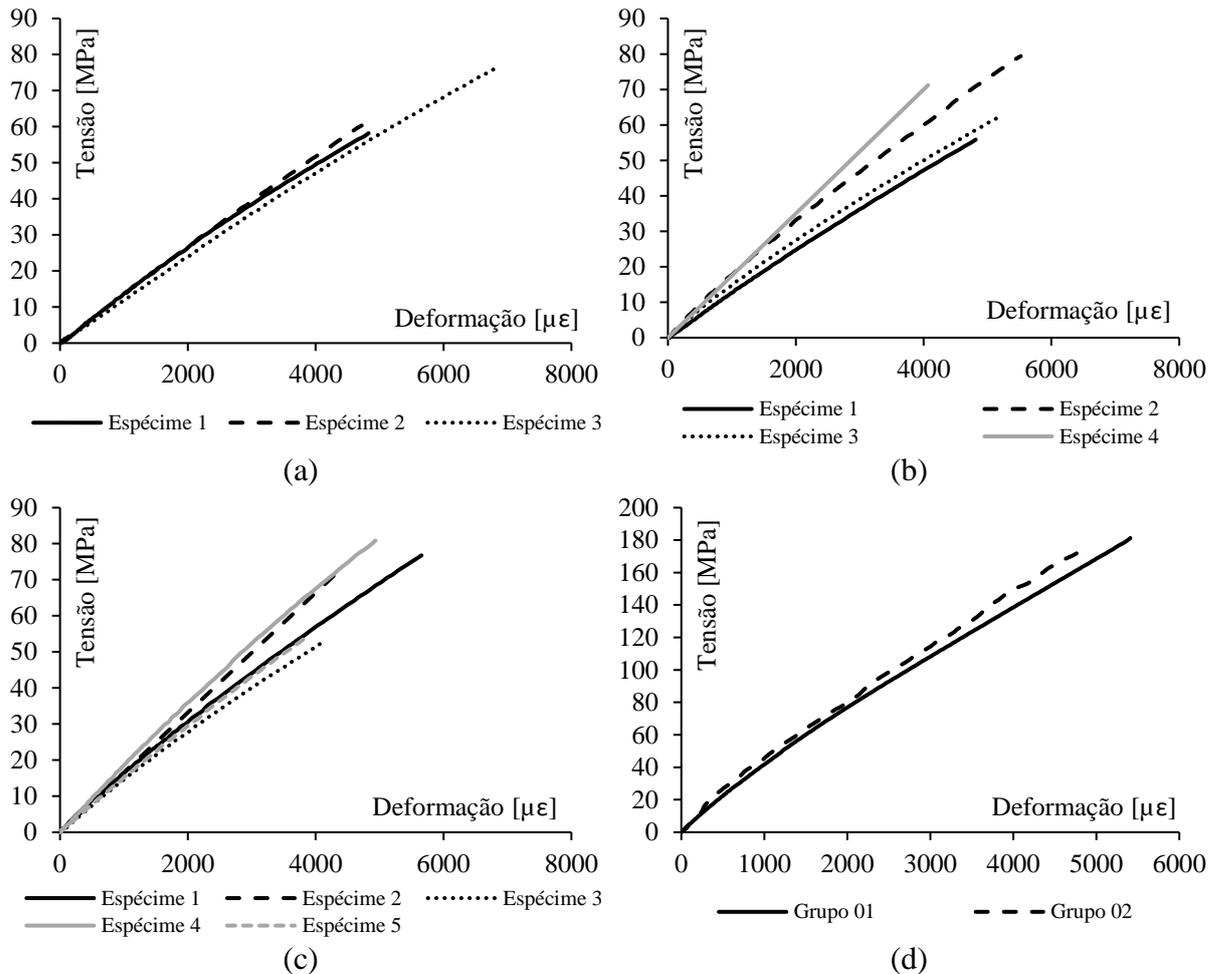


Figura 4.1: Curvas tensão *versus* deformação: (a) módulo de elasticidade longitudinal do Grupo 01; (b) módulo de elasticidade longitudinal do Grupo 02; (c) módulo de elasticidade transversal dos Grupos 01 e 02.

A partir dos dados apresentados na Figura 4.1a, Figura 4.1b e Figura 4.1c, empregando-se correlação linear, obtiveram-se os módulos de elasticidade longitudinal ($E_{pt,l}$) para o compósito. O valor médio obtido foi de 13.35 GPa, conforme pode ser observado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Módulo de elasticidade longitudinal compósito de PRFV.

Grupo	Módulo de elasticidade longitudinal ($E_{pt,l}$)		
	Tamanho amostral	Média [GPa]	CoV. [%]
01	3	12.46	4.39
02	4	13.28	8.82
03	5	14.30	11.31
Média		13.35	8.17

Dispondo dos dados apresentados na Figura 4.1e utilizando-se, também, de correlação linear, o módulo de elasticidade transversal ($E_{pt.t}$) para os Grupos 01 e 02 foi determinado e; logo em seguida, pelo quociente entre as deformações longitudinais e transversais, o coeficiente de Poisson (ν) para ambos os grupos foi obtido, conforme pode ser observado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Módulo de elasticidade transversal e coeficiente de Poisson para os compósitos de PRFV.

Grupo	Módulo de elasticidade transversal			Coeficiente de Poisson		
	Valor [GPa]	Média [GPa]	CoV. [%]	Valor	Média	CoV. [%]
01	4.591	4.753	3.41	0.357	0.35	0.76
02	4.915			0.351		

Os resultados experimentais obtidos, que foram $\varepsilon = 2.32$ mm, $\sigma_{pt.u} = 164.2$ MPa, $V_f = 39.0$ %, $E_{pt.l} = 13.35$ GPa, e $E_{pt.t} = 4.75$ GPa, apresentaram-se próximos aos encontrados por Lameiras (2015), que foram $\varepsilon = 2.00$ mm, $\sigma_{pt.u} = 199.5$ MPa, $V_f = 40.8$ %, $E_{pt.l} = 12.65$ GPa, e $E_{pt.t} = 5.41$ GPa; com erros médios de 7.4 %, 9.7 %, 2.2 %, 2.7 % e 6.5 %, respectivamente.

4.2 Avaliação da qualidade dos compósitos

O processo de avaliação da qualidade de produção dos compósitos foi realizado (Figura 4.2) empregando-se três parâmetros básicos, que foram: tensão última à tração ($\sigma_{pt.u}$), fração volumétrica de fibras (V_f) e módulo de elasticidade longitudinal ($E_{pt.l}$). Esses três parâmetros foram avaliados em três níveis diferentes, que foram:

- ao longo da extensão de cada uma das chapas, com o intuito de verificar as variações que se originaram durante o processo de infusão em si;
- entre diferentes chapas constituídas por um mesmo grupo, com o objetivo de avaliar as variações que ocorreram entre diferentes processos de infusão;
- entre diferentes grupos de produção, cada qual confeccionado com materiais provenientes de uma origem, almejando-se verificar a reprodutibilidade das características dos compósitos, quando confeccionados com materiais de diferentes ancestralidades.

Utilizaram-se até três tipos de tratamentos básicos para realizar análise dos dados, que foram: análise da magnitude do coeficiente de variação, análise de variância (ANOVA), e análise de aderência à curva de distribuição normal. A quantidade de tratamentos conferido a cada conjunto de dados dependeu da quantidade de dados disponíveis para a análise. Quanto maior a quantidade de dados disponíveis, mais tratamentos puderam ser aplicados.

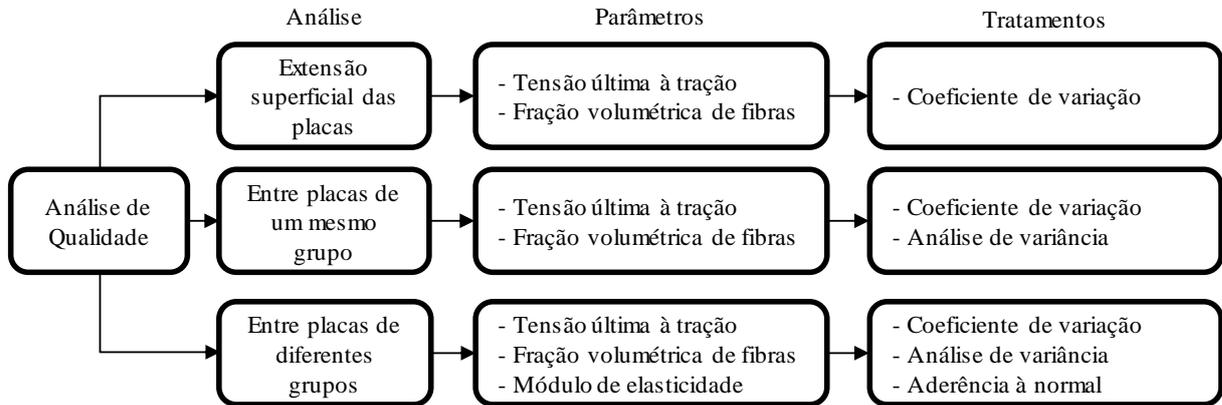


Figura 4.2: Avaliação da qualidade dos compósitos de PRFV produzidos.

4.2.1 Ao longo da extensão superficial das chapas

Para cada uma das chapas de PRFV foram extraídas, no mínimo, duas amostras em pontos aleatórios para avaliação da homogeneidade de suas características. Esse procedimento foi executado com o objetivo de verificar se o processo de infusão conseguiu garantir, com um nível de variação satisfatório, que cada chapa apresentasse as mesmas características ao longo de toda a sua extensão. Empregou-se, para realizar essa avaliação, um estudo dos coeficientes de variação obtidos. Neste trabalho, conforme recomendação realizada por Pimentel-Gomes (2009) foram adotadas as seguintes classificações para os coeficientes de variação: baixos, quando inferiores a 10 %, médios, quando de 10 % a 20 %, altos, quando de 20 % a 30 %, muito altos, quando superiores a 30 %; com os as classificações baixo e médio enquadradas como satisfatórias.

Por análise da Tabela 4.1 e considerando a classificação adotada para os coeficientes de variação, obtiveram-se, considerando a tensão última à tração, 18 classificados como baixos, e 9 classificados como médios. Para a fração volumétrica de fibras, todos os coeficientes de variação foram classificados como baixos. Diante disso, considerando os parâmetros em estudo, as chapas apresentaram características homogêneas ao longo de suas extensões; ou seja, o processo de infusão empregado não gerou variações que pudessem

comprometer a homogeneidade das características dos compósitos. Essa homogeneidade apresentou-se de maneira mais forte para a fração volumétrica de fibras, quando comparada à tensão última à tração.

4.2.2 Entre chapas constituídas por um mesmo grupo

Na Figura 4.3 e na Figura 4.4 são apresentados os valores médios (com suas respectivas dispersões) dos resultados obtidos por meio dos ensaios realizados para determinação da tensão última à tração e a para obtenção do teor volumétrica de fibras. No caso do primeiro ensaio citado (Figura 4.3), observou-se uma maior dispersão para os resultados do Grupo 01 (Figura 4.3b), se comparado aos resultados apresentados pelos demais grupos (Figura 4.3c e Figura 4.3d). No caso do segundo ensaio mencionado (Figura 4.4), observou-se uma maior dispersão para os Grupos 01 e 02 (Figura 4.4b e Figura 4.4c), em comparação aos resultados logrados para o Grupo 03 (Figura 4.4d).

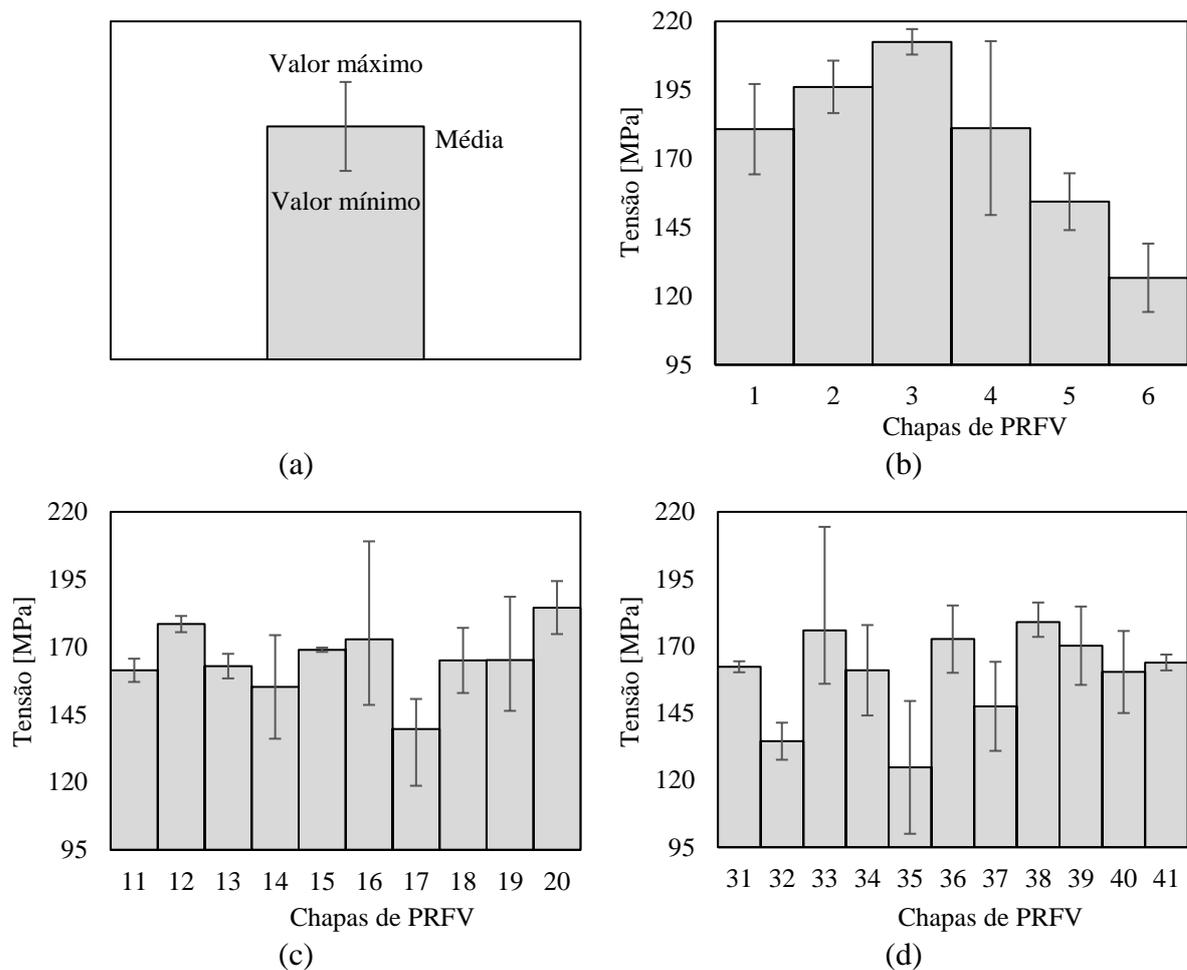


Figura 4.3: Tensão última à tração: (a) legenda; (b) Grupo 01; (c) Grupo 02; (d) Grupo 03.

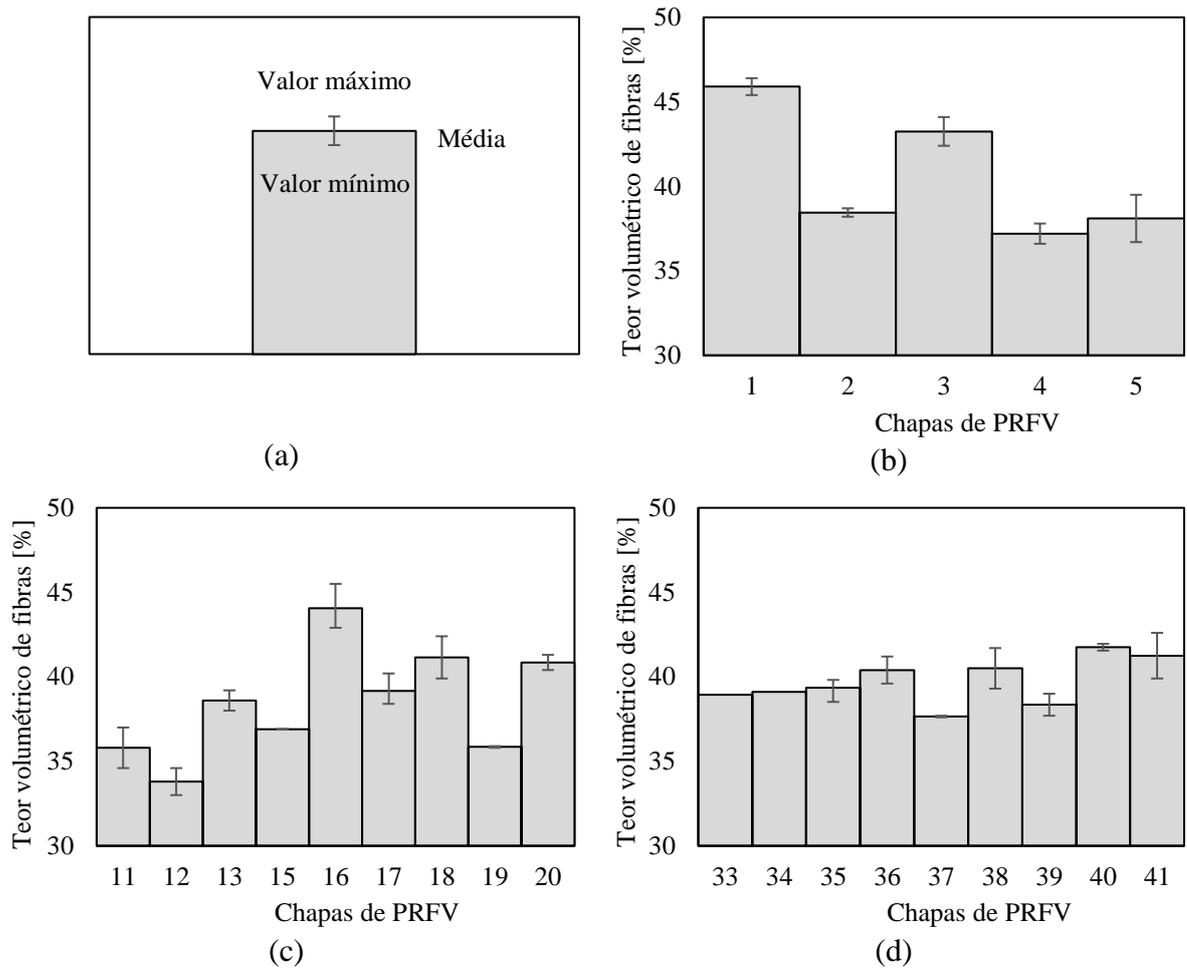


Figura 4.4: Teor volumétrico de fibras: (a) legenda; (b) Grupo 01; (c) Grupo 02; (d) Grupo 03.

A Tabela 4.4 apresenta os coeficientes de variação, por grupos, que foram calculados a partir dos resultados médios obtidos para cada uma das chapas de polímero reforçado com fibras de vidro (PRFV); considerando os resultados dos ensaios realizados para aferição dos parâmetros estudados, que foram: a tensão última à tração ($\sigma_{pt.u}$) e o teor volumétrico de fibras (V_f).

Observou-se que todos os resultados disponíveis na Tabela 4.4 apresentaram coeficientes de variação classificados como baixos, conforme definição apresentada por Pimentel-Gomes (2009); com exceção da tensão última à tração obtida para o Grupo 01, que apresentou coeficiente de variação classificado como médio. Os valores confirmam as tendências visuais, que foram anteriormente observadas por meio da Figura 4.3 e da Figura 4.4, que consiste em uma maior dispersão para o resultado de tensão última à tração ($\sigma_{pt.u}$) para o Grupo 01, e de menor dispersão para o resultado de fração volumétrica de fibras (V_f) para o Grupo 03.

Tabela 4.4: Coeficiente de variação obtidos para os Grupos 01, 02 e 03 para os ensaios de tensão última à tração ($\sigma_{pt.u}$) e fração volumétrica de fibras (V_f).

Grupo	Tensão última à tração ($\sigma_{pt.u}$)	Fração volumétrica de fibras (V_f)
	CV [%]	CV [%]
01	15.96	8.16
02	7.14	7.75
03	9.56	4.10

Almejando-se validar as tendências de variação observadas, realizou-se uma *Analysis of Variance* (ANOVA) entre os dados de cada um dos três grupos, cujos resultados encontram-se disponíveis na Tabela 4.5. Tomou-se o valor de p -normal igual ou inferior a 0.05 como critério para enquadrar as diferenças como estatisticamente significativas, o que reflete em um intervalo de confiança de 95 %, que foi considerado para os propósitos deste trabalho como satisfatório.

Com relação aos resultados da tensão última à tração, que constitui a característica mais importante para os compósitos, não se observaram diferenças estatisticamente significativas em nenhum dos três grupos. Para o Grupo 01, no entanto, o valor de p -normal encontrado (0.08), apresentou-se próximo ao valor limite de 0.05, o que reflete a maior dispersão observada na Figura 4.3. Para a fração volumétrica de fibras observaram-se, no entanto, diferenças estatisticamente significativas entre as chapas que compõe Grupos 01 e 02, confirmando as tendências já anteriormente observadas na Figura 4.4.

Tabela 4.5: ANOVA realizada para os Grupos 01, 02 e 03

Grupo	Análise	Tensão última à tração ($\sigma_{pt.u}$)	Diferença significativa	Fração volumétrica de fibras (V_f)	Diferença significativa
		Valor		Valor	
01	DF	5	não	4	sim
	MS	1876.77		28.9043	
	F ratio	3.418		22.40	
	p normal	0.0833		0.002163	
02	DF	9	não	8	sim
	MS	388.21		24.4804	
	F ratio	1.020		19.53	
	p normal	0.4724		0.000018	
03	DF	10	não	8	não
	MS	646.72		3.73156	
	F ratio	1.401		3.012	
	p normal	0.2797		0.052920	

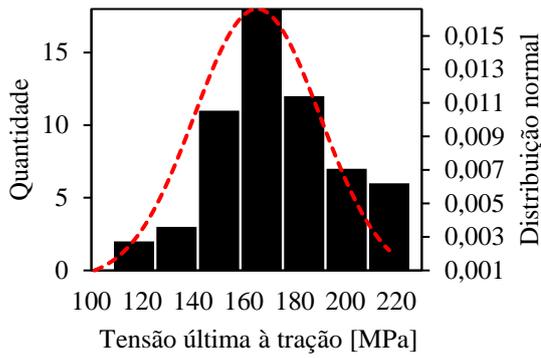
As análises realizadas sugerem uma homogeneidade satisfatória para os resultados obtidos com o ensaio realizado para determinação da tensão última à tração, tanto para os coeficientes de variação, quanto para a ANOVA. Com esse resultado, infere-se que diferentes processos de infusão, não ocasionaram variações significativas que pudessem comprometer a homogeneidade dos compósitos produzidos, considerando o parâmetro mencionado.

Para o teor volumétrico de fibras, no entanto, os resultados apontaram para uma diferença estatisticamente significativa entre as chapas que compõe os Grupos 01 e 02, sugerindo que as variações obtidas entre diferentes processos de infusão resultaram em diferentes teores de fibras para esses grupos. Para o Grupo 03, no entanto, essa diferença estatisticamente significativa não foi observada. Esse resultado sugere que houve uma melhora no processo de fabricação dos compósitos ao longo da produção, pois os Grupos 01 e 02 foram fabricados anteriormente ao Grupo 03.

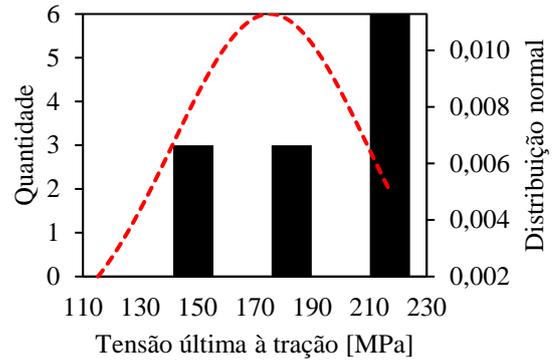
Embora as diferenças observadas para os Grupos 01 e 02 sejam um indicativo de falha na qualidade dos compósitos, como ela não se refletiu na tensão última à tração, a homogeneidade dos compósitos foi considerada, em vias gerais, como satisfatória. Além disso, todos os coeficientes de variação obtidos para os resultados do ensaio realizado para determinação do teor volumétrico de fibras apresentaram-se satisfatórios, com valores inferiores a 10,0 %.

4.2.3 Entre diferentes grupos de produção

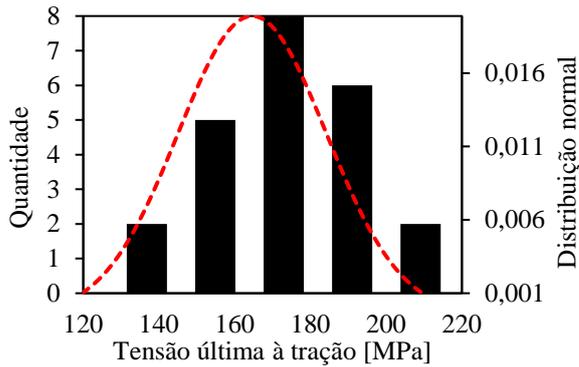
Analisou-se, também, a variabilidade dos resultados entre diferentes grupos de produção, almejando-se verificar, com isto, a reprodutibilidade das características dos compósitos, quando confeccionados com materiais de diferentes ancestralidades. A Figura 4.5 e a Figura 4.6 apresentam, respectivamente, os histogramas de distribuição de frequência gerados a partir dos resultados obtidos com a realização dos ensaios para obtenção da tensão última à tração e para determinação da fração volumétrica de fibras. Aos histogramas citados, foram alocadas as correspondentes curvas de distribuição normal. Embora as Figura 4.5b e Figura 4.6b, que correspondem ambas ao Grupo 01, e Figura 4.6d, que corresponde ao Grupo 03, não aparentem visualmente uma boa aderência às curvas de distribuição normal; tal aderência foi constada para todos os histogramas com índices de confiança de 95%, com valores de p -normal superiores a 0.05, empregando-se, para isto, o teste de Shapiro-Wilk.



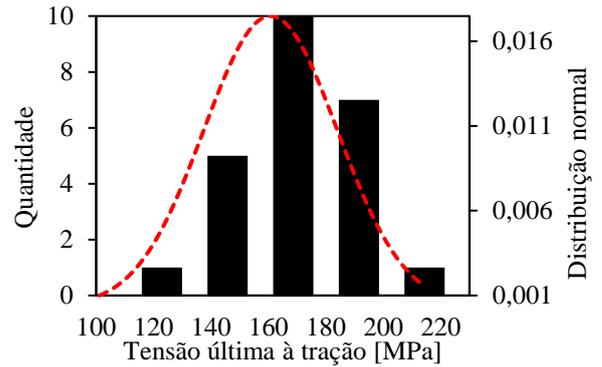
(a)



(b)

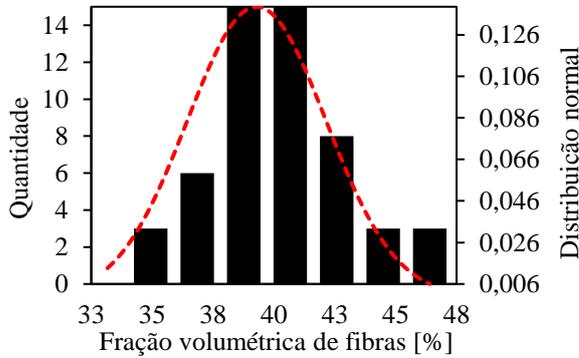


(c)

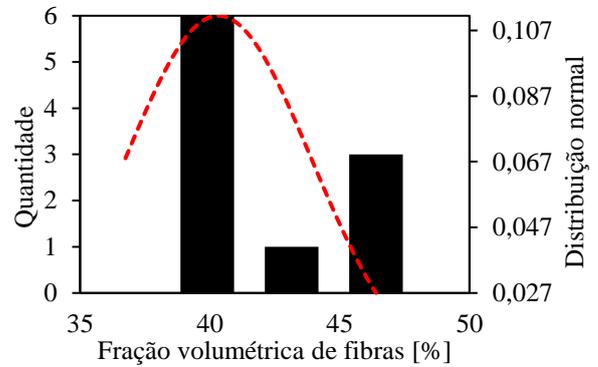


(d)

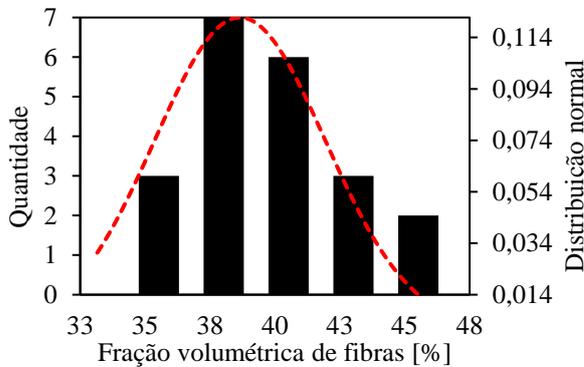
Figura 4.5: Distribuição normal da tensão última à tração: (a) todos os espécimes; (b) Grupo 01; (c) Grupo 02; (d) Grupo 03.



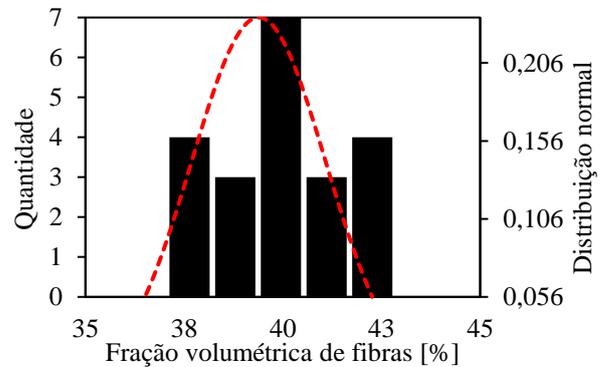
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.6: Distribuição normal da fração volumétrica de fibras: (a) todos os espécimes; (b) Grupo 01; (c) Grupo 02; (d) Grupo 03.

A Figura 5.7 apresenta os diagramas de caixa gerados a partir dos resultados obtidos com a execução dos ensaios para determinação da tensão última à tração (Figura 4.5), fração volumétrica de fibras (Figura 4.6) e módulo de elasticidade longitudinal, para os Grupos 01, 02 e 03.

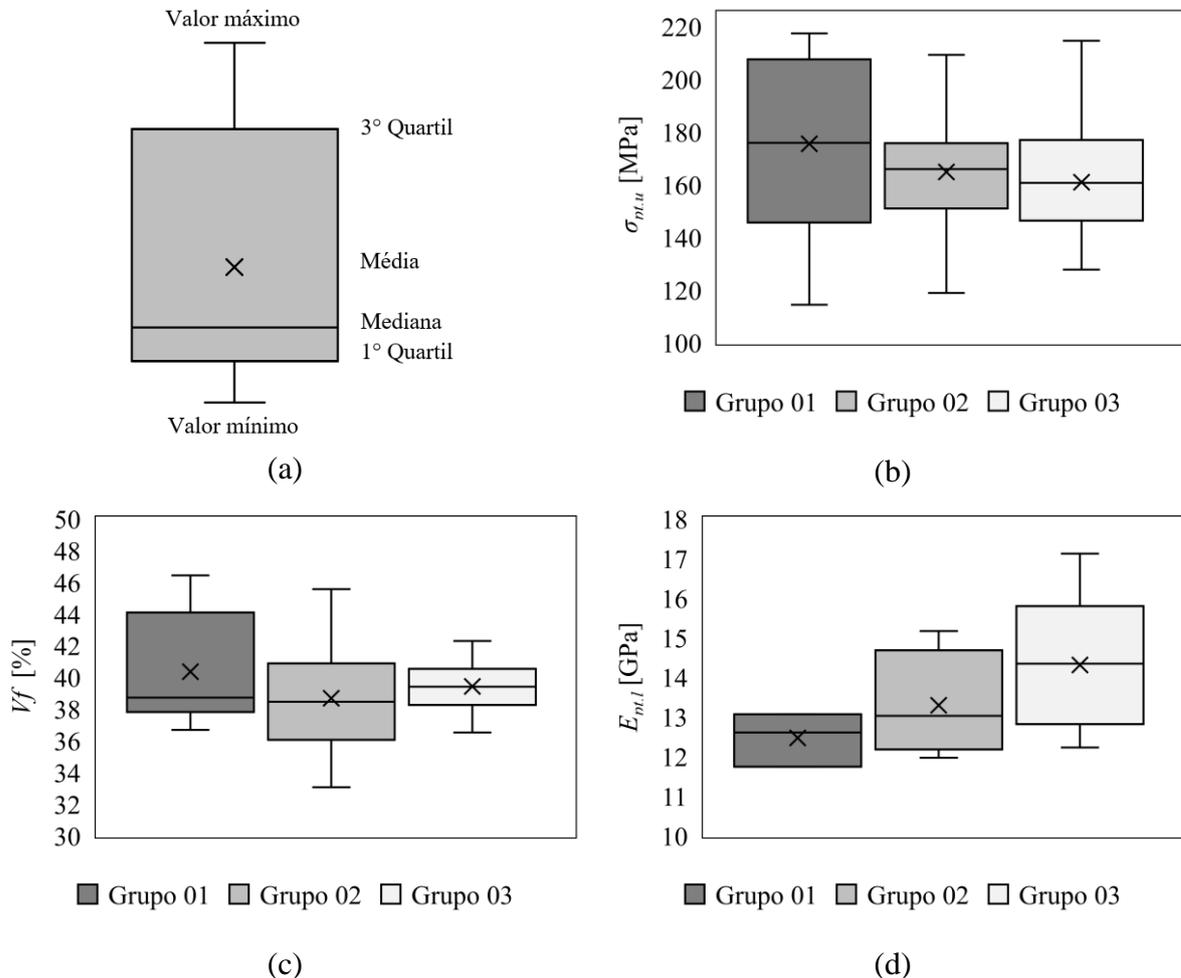


Figura 4.7: Diagrama de caixa: (a) legenda dos gráficos; (b) tensão última à tração; (c) fração volumétrica de fibras; (d) módulo de elasticidade longitudinal.

Com o intuito de avaliar dispersão dos resultados que foram apresentados nos diagramas de caixa (Figura 5.7), conduziu-se uma ANOVA, conforme resultados apresentados na Tabela 4.6. Os parâmetros estatísticos empregados foram os mesmos adotados em 4.2.2. Ao analisar-se os valores encontrados para o p -normal, observou-se que os dados não apresentaram diferenças estatisticamente significativas. Isso sugere que a variação na origem dos materiais empregados para realização das infusões não ocasionou diferenças estatisticamente significativas nas características dos compósitos produzidos.

Tabela 4.6: ANOVA realizada para a avaliação da diferença nas características dos compósitos entre diferentes grupos de produção

Grupo	Análise	Tensão última à tração		Teor volum. de fibras		Módulo de elasticidade	
		Valor	Diferença significativa	Valor	Diferença significativa	Valor	Diferença significativa
Todos	DF	2		2		2	
	MS	851.285	não	10.234	não	3.325	não
	F ratio	1.419		1.270		1.537	
	p normal	0.25004		0.28998		0.26650	

4.3 Ensaios push-out

Esta seção do trabalho apresenta os resultados obtidos com a execução dos ensaios (*push-out tests*) realizados para determinação da capacidade última ($Q_{lo,u}$), do deslocamento relativo ($S_{lo,u}$) e da rigidez (K_f) dos conectores de cisalhamento do tipo *Perfofrp*. Realiza-se, também, uma discussão que leva em consideração os principais fatores que influenciaram no comportamento mecânico dos conectores.

4.3.1 Padrões de fissuração

A Figura 4.8 apresenta o aspecto final dos conectores, que foram extraídos dos corpos de prova após a execução dos ensaios de cisalhamento duplo (*push-out tests*). São apresentados os modos de ruptura observados para os conectores com diâmetros de 12.70 mm, 25.40 mm e 31.75 mm. Os conectores com diâmetros de 6.35 mm e 19.05 mm não foram extraídos para análise dos modos de ruptura, devido ao cronograma de execução da pesquisa, que se encontrava em fase de encerramento, logo após a ruptura dos últimos espécimes.

Não foram observadas fissuras visíveis nas regiões de concreto próximas aos conectores, durante ou após a execução dos rompimentos, o que indica que a capacidade última das conexões foi limitada pela ruptura dos compósitos de polímero reforça com fibras de vidro (PRFV). Os mesmo resultados foram observados nos ensaios *push-out* executados por Lameiras (2015), que empregaram compósitos semelhantes aos utilizados nesta pesquisa (tipo CSM com 5 camadas de fibras manta de vidro de 450 g/m², embebidas em resina poliéster). Algumas fissuras no concreto foram observadas apenas em regiões distantes dos conectores, e próximas aos apoios; ou seja, nas regiões que se encontravam em contato com os perfis metálicos, que serviram de suporte para os corpos de prova.

O lado esquerdo de cada um dos conectores, que são mostrados por meio da Figura 4.8, consiste no lado que estava embebido na camada externa de concreto; ou seja, que estava ancorado na camada de concreto que se encontrava sobre o apoio metálico. O lado direito, conseqüentemente, diz respeito à região que se encontrava ancorada (ou embebida) na camada interior de concreto, sobre a qual foi aplicado o carregamento.

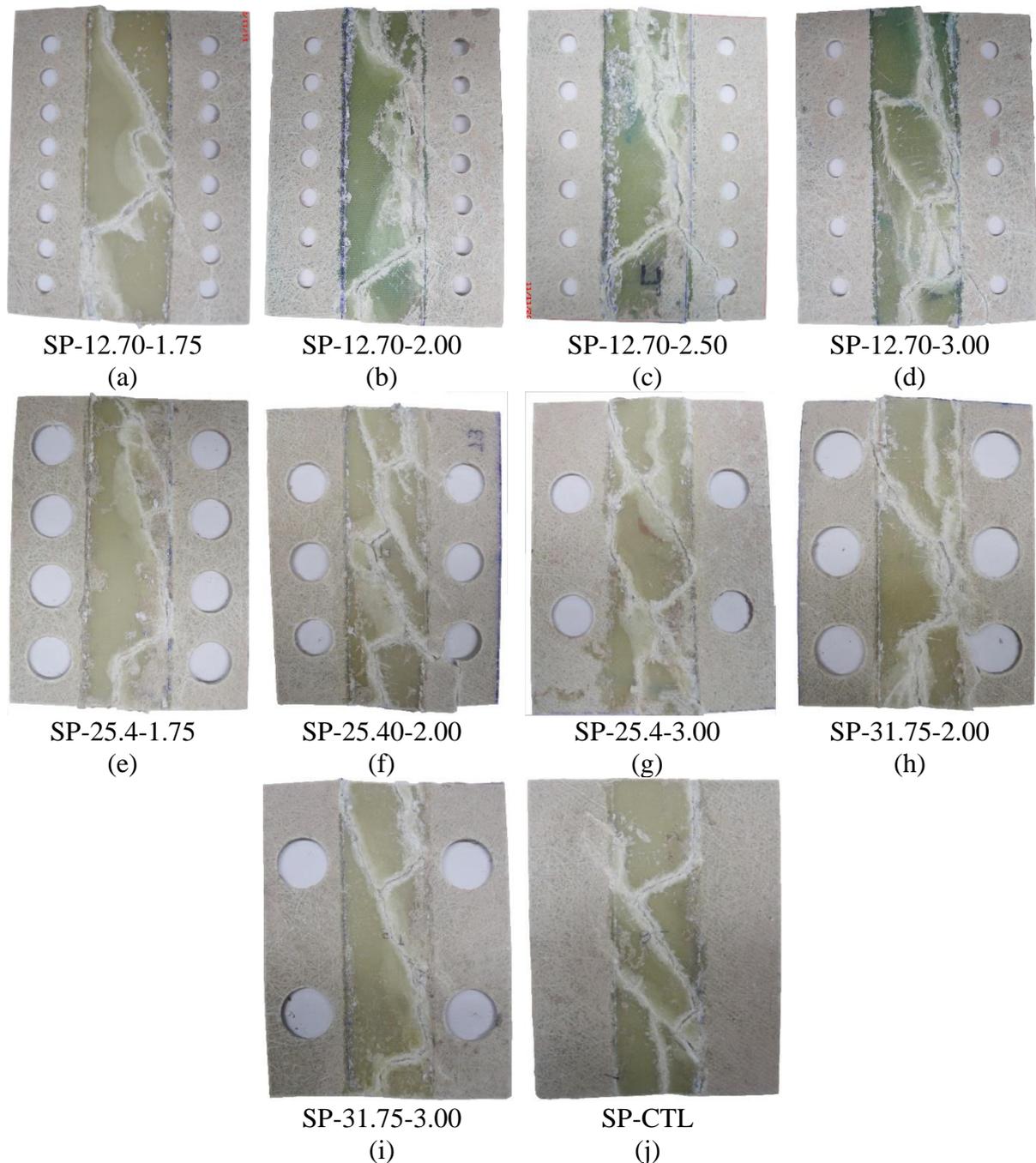


Figura 4.8: Padrões de fissuração ao final do ensaio, que foram apresentados pelos conectores: (a) SP-12.70-1.75; (b) SP-12.70-2.00; (c) SP-12.70-2.50; (d) SP-12.70-3.00; (e) SP-25.4-1.75; (f) SP-25.40-2.00; (g) SP-25.4-3.00; (h) SP-31.75-2.00; (i) SP-31.75-3.00; (j) SP-CTL.

Os conectores apresentaram, de modo geral, padrões de fissuração bastante semelhantes. As rupturas ocorreram com fissuras apresentando tendência de inclinação em uma determinada direção, partindo da parte superior em contato com o apoio (lado esquerdo superior), em direção à parte inferior em contato com a camada submetida ao carregamento (lado inferior direito). Observaram-se, também, que a quantidade de fissuras apresentada por cada conector variou bastante, com alguns apresentando diversas fissuras (Figura 4.8g) e com outros apresentando poucas fissuras (Figura 4.8a). Isso se dá pelas características das fibras utilizadas, que possuem distribuições aleatórias. O mesmo comportamento não ocorreu durante os ensaios executados por Huang e Dai (2019), que utilizaram fibras com mantas orientadas, e cujos rompimentos ocorreram ao longo do alinhamento dos referidos alinhamentos. Em alguns casos foram observadas, também, rupturas verticais próximas a região de contato entre o isolamento e o concreto (Figura 4.8b e Figura 4.8d), comportamento que também foi observado por Lameiras (2015), mas na interface entre o perfil metálico (utilizado pelo autor, mas não utilizado neste trabalho) e o concreto.

Foi observada, também, uma diferença no aspecto superficial entre as regiões que estiveram em contato com o concreto e as que não estiveram em contato com o concreto. As que estiveram em contato apresentaram algum desgaste superficial, o que demonstra certa afinidade entre as superfícies dos materiais (que pode ter sido química, ou devido a rugosidade superficial do PRFV), gerando alguma aderência entre o concreto e o compósito. Esse desgaste consiste na remoção da camada de resina superficial, que se encontra imediatamente acima da camada de fibra de vidro mais externa. As regiões que não estiveram em contato direto com o concreto, não apresentaram alterações em suas características superficiais. Essa característica foi observada em todos os conectores extraídos. Nos ensaios *push-out* executados por Lameiras (2015) foram observadas, também, algumas ranhuras superficiais nos compósito após execução dos rompimentos. No trabalho de Huang e Dai (2019) esse comportamento não pôde ser avaliado, pois os autores não realizaram a extração dos conectores, logo após o rompimento dos corpos de prova.

Além das inclinações características, que foram observadas para as fissuras, outro aspecto apresentou-se, também, com características marcantes. Trata-se da localização apresentada pelas referidas fissuras, as quais predominaram na região de contato entre o PRFV e a camada de isolamento; ou seja, no local onde o PRFV não estava embebido em concreto. Assim, foram observadas poucas fissuras próximas aos furos, sendo que, nos conectores com furos de 12.70 mm tais fissuras foram inexistentes; e nos conectores com furos de 25.40 mm e

31.75 mm algumas poucas fissuras próximas aos furos foram observadas, como ocorreu no caso dos espécimes: SP-25.40-2.00 e SP-31.75-2.00. Isso demonstra que o concreto se apresentou eficiente para prover certo confinamento ao PRFV, impossibilitando a propagação de fissuras nessa região.

Tratando-se da rugosidade superficial apresentada pelos conectores, que certamente contribuiu para o mecanismo responsável por garantir a ancoragem do conector no concreto, observou-se certa diferença, em todas as placas produzidas, entre a superfície de uma de suas faces e a outra imediatamente oposta. Por meio de análise tátil-visual, observou-se que uma das faces se apresentou com rugosidade superior à outra face. Isso se deu em virtude do processo de fabricação que foi empregado, em ambas as faces se utilizou uma camada de *peel ply*, para garantir que o PRFV não apresentasse aderência aos demais componentes de fabricação. O referido *peel ply*, que consiste um tecido fabricado em formato de malha regular, inevitavelmente gera certa rugosidade no PRFV produzido, com geometria semelhante à malha empregada em seu processo de fabricação. A face de PRFV, no entanto, que se encontra voltada para o vidro é pressionada de tal forma, devido ao efeito do vácuo gerado no sistema, que ao final do processo apresenta acabamento superficial mais menos rugoso. Por sua vez, a face que se encontra voltada para cima, por não estar comprimida contra a placa de vidro, mas apenas em contato com o *peel ply*, ao final do processo, apresenta uma rugosidade superficial mais elevada. Essa rugosidade é responsável, portanto, por melhorar a aderência entre o concreto e o PRFV, ocasionando as ranhuras superficiais, que foram observadas na Figura 4.8. As variações na espessura dos compósitos originam-se, provavelmente, das variações no aspecto superficial dessa referida face.

4.3.2 Comportamento carregamento *versus* deslocamento relativo

As curvas carregamento *versus* deslocamento relativo foram computadas subtraindo-se a média dos LVDTs A e B (posicionados sobre a camada interna de concreto) pela média dos LVDTs C e D (colocados sobre as camadas externas de concreto). O deslocamento relativo refere-se ao deslocamento entre as camadas externas e a interna de concreto, ocasionado devido à deformação dos conectores.

A Figura 4.9, a Figura 4.10 e a Figura 4.11 apresentam as curvas carregamento *versus* deslocamento relativo para cada uma das configurações de conexão ensaiadas. Em cada gráfico foram plotadas as curvas (em alguns casos duas, em outros casos três) correspondentes

às réplicas para uma mesma conexão. A carga apresentada refere-se ao resultado do ensaio dividido por dois, pois foram utilizados dois conectores em cada ensaio, presumindo-se, assim, que cada conector absorveu cerca de metade da carga aplicada em cada ensaio. Alguns ensaios tiveram de ser descartados, devido às falhas que ocorreram nos LVDTs.

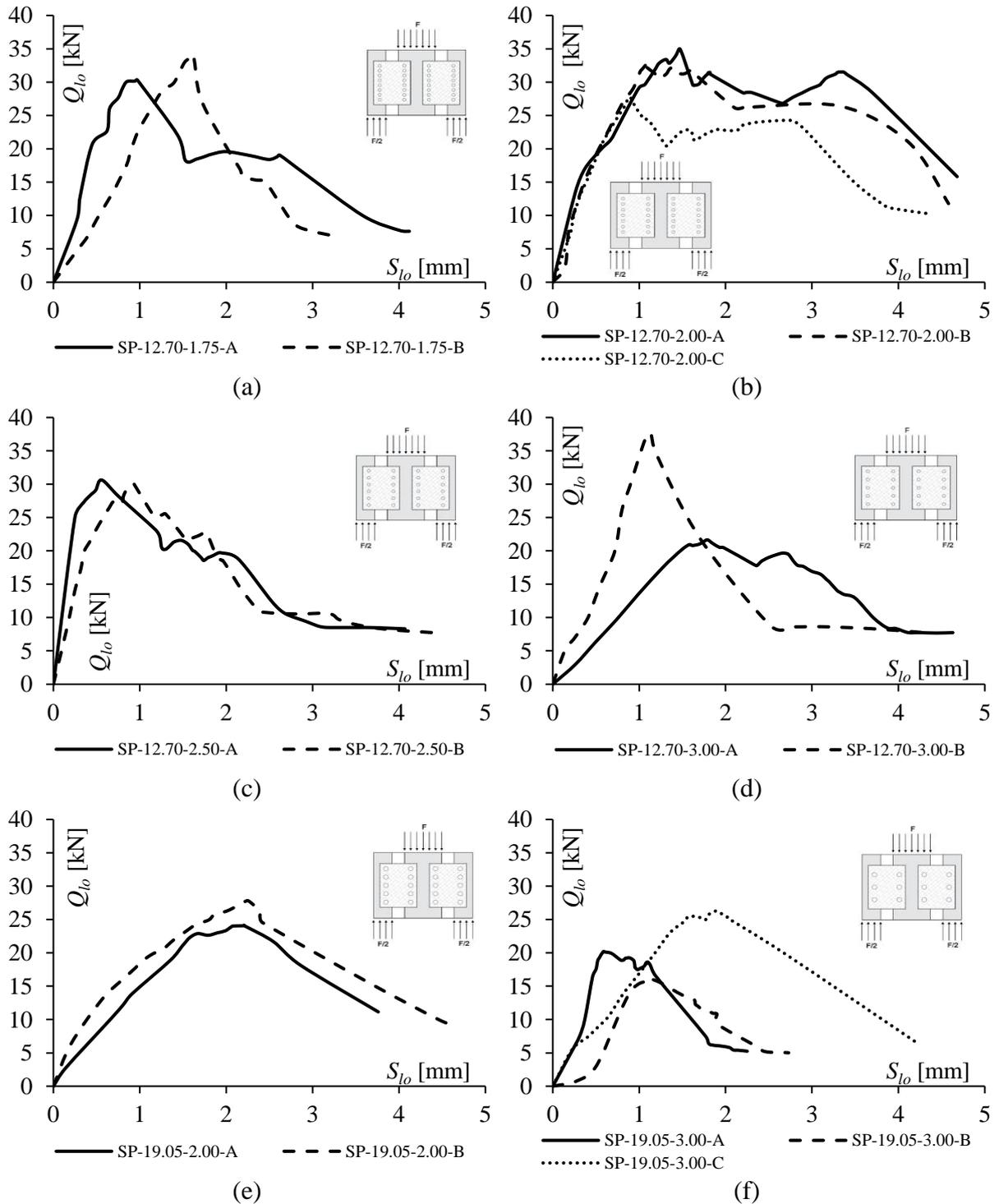


Figura 4.9: Curvas carregamento *versus* deslocamento: (a) SP-12.70-1.75; (b) SP-12.70-2.00; (c) SP-12.70-2.50; (d) SP-12.70-3.00; (e) SP-19.05-2.00; (f) SP-19.05-3.00.

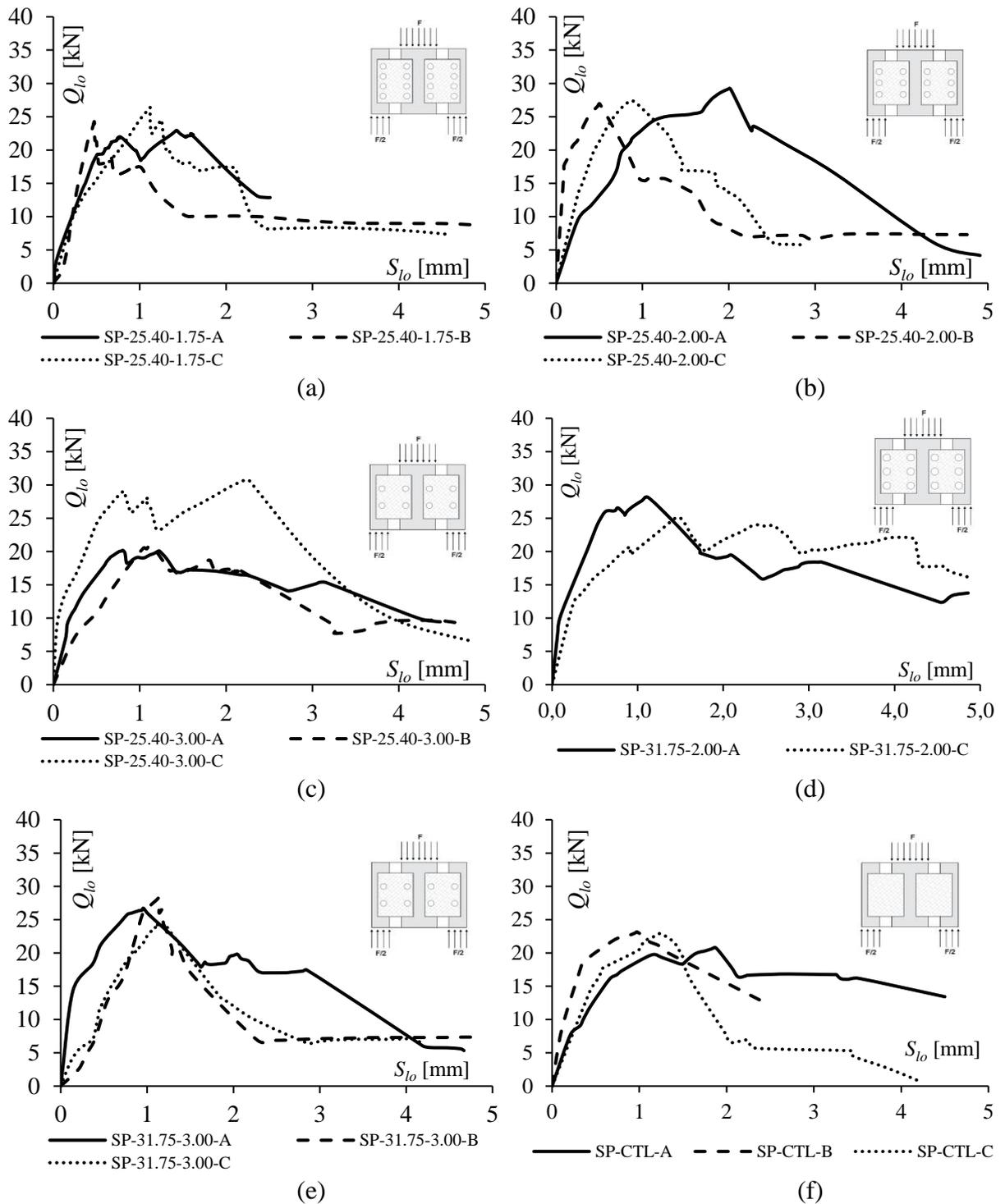


Figura 4.10: Curvas carregamento *versus* deslocamento: (a) SP-25.40-1.75; (b) SP-25.40-2.00; (c) SP-25.40-3.00; (d) SP-25.40-3.00 C; (e) SP-31.75-3.00; (f) SP-25.40-2.00.

As curvas apresentadas na Figura 4.9 e Figura 4.10, correspondem ao grupo principal, ao passo que as curvas mostradas na Figura 4.11 dizem respeito ao grupo secundário (com exceção da curva que encontra-se na Figura 4.11a, que também pertence ao grupo principal).

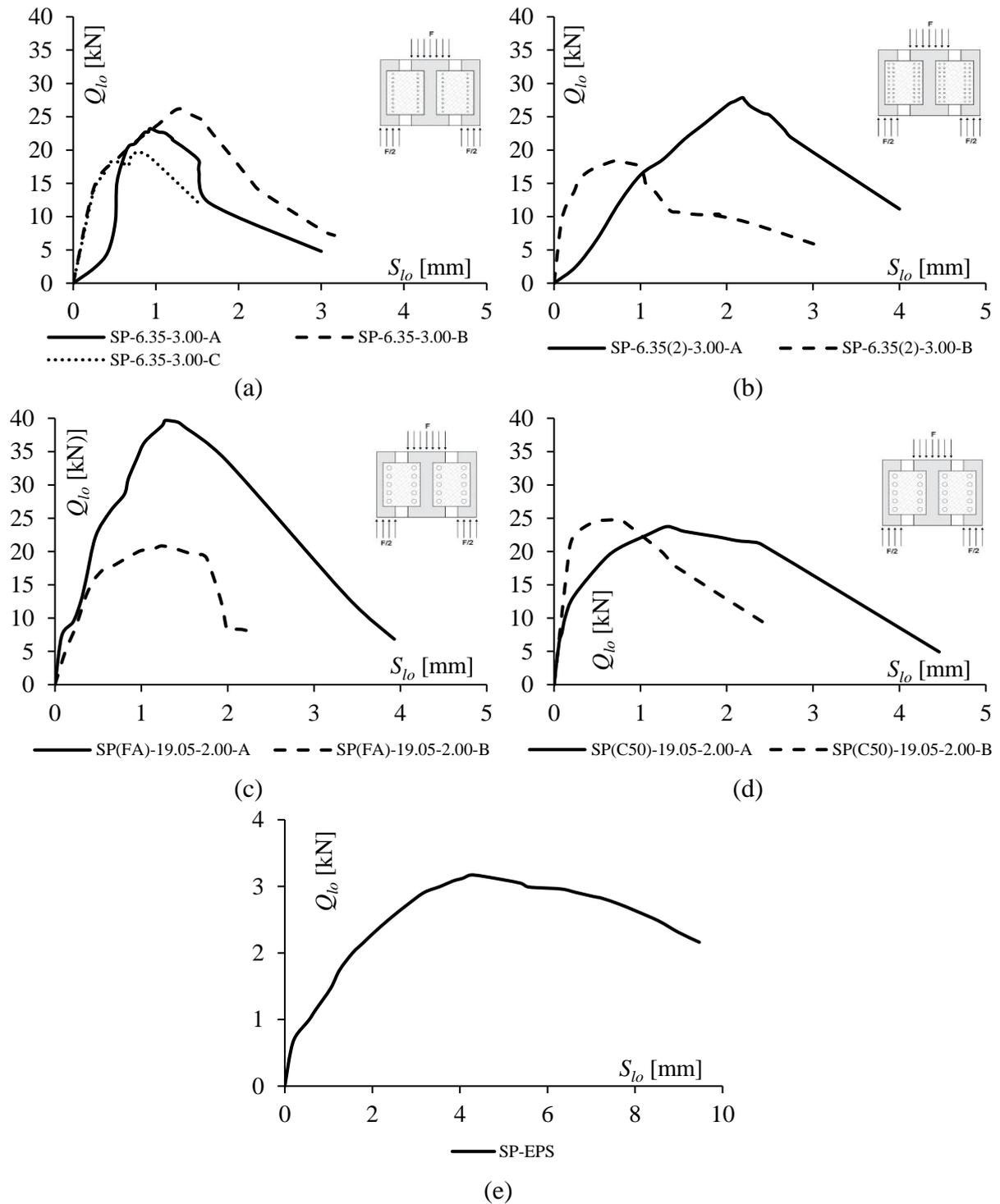


Figura 4.11: Curvas carregamento *versus* deslocamento: (a) SP-6.35-3.00; (b) SP-6.35(2)-3.00; (c) SP(FA)-19.05-2.00; (d) SP(C50)-19.05-2.00; (e) SP-EPS.

Obtiveram-se os valores médios de 1.22 mm e 25.13 kN/mm para o deslocamento ($S_{lo,u}$) correspondente ao máximo carregamento ($Q_{lo,u}$) e para a rigidez inicial da conexão (K_f), respectivamente. Observaram-se, também, os valores de 41.07 % e 45.47 % para os coeficientes de variação média para $S_{lo,u}$ e para K_f , respectivamente.

A resposta das conexões, de modo geral, apresentou-se rígida até a ruptura da conexão, comportamento que também foi observado por Lameiras (2015). Após esse ponto, o comportamento apresentou-se bastante aleatório, com algumas conexões apresentando um patamar de escoamento aproximadamente definido (SP-12.70-2.00 e SP-31.75-2.00, por exemplo), e outras apresentando um decaimento de carga um pouco mais brando (SP-12.70-1.75, SP-12.70-2.50, por exemplo). Não foi possível estabelecer algum tipo de padrão com relação aos comportamentos mencionados, principalmente em relação aos deslocamentos máximos e à rigidez das conexões (tanto para níveis elevados de carregamento, assim como para níveis iniciais de carregamento). Com relação à variabilidade dos resultados, algumas réplicas apresentaram comportamentos bem próximos (SP-12.70-2.00 e 12.70-2.50, por exemplo). Outras, no entanto, apresentaram comportamento bastante divergente (SP-12.70-3.00 e SP 19.05-3.00, por exemplo).

Os comportamentos aleatórios observados para os deslocamentos podem estar relacionados ao modo como o ensaio foi realizado e à maneira como os deslocamentos foram aferidos. Os deslocamentos foram medidos com LVDTs com curso máximo de 50 mm, ao passo que, os deslocamentos correspondentes ao carregamento máximo ocorreram por volta de 1.2 mm, podendo ter ocorrido, portanto, um problema de escala. Ou seja, a precisão dos LVDTs pode não ter sido satisfatória para aferir os deslocamentos observados.

Além disso, foi empregado para execução do ensaio controle aproximado de carga (cerca de 8.0 kN/min), em detrimento ao controle de deslocamento, o que pode ter acentuado os comportamentos aleatórios observados. Devido à metodologia de ensaio empregada, com aplicação manual de cargas pelo próprio operador do ensaio, variações no controle inevitavelmente podem ocorrer. Todos os ensaios, no entanto, foram realizados pelo mesmo operador, com o intuito de tentar amenizar a dificuldade mencionada.

Outro aspecto, que pode ter acentuado as variações observadas, diz respeito ao modo como o deslocamento relativo foi computado, que foi realizado de maneira indireta, conforme foi anteriormente descrito. Sugere-se que ensaios futuros utilizem a aferição direta, procedendo da seguinte maneira: os LVDTs poderão ser fixados nas camadas internas de concreto, e cantoneiras metálicas poderão ser fixadas nas camadas externas de concreto. O ensaio inicia-se com o êmbolo do LVDT aberto sobre a cantoneira metálica, que irá ser pressionado ao longo do ensaio, conforme a camada interna de concreto se deslocar.

4.3.3 Capacidade última

A Tabela 4.7 e a Tabela 4.8 apresentam para cada configuração de conexão ensaiada: a carga por conector correspondente ao carregamento máximo ($Q_{lo.u}$), o correspondente deslocamento relativo ($S_{lo.u}$), e a rigidez inicial da conexão (K_f). Os resultados apresentaram os seguintes valores para as médias dos coeficientes de variação: 10.94 %, 27.84 % e 28.10 %, respectivamente. Resultados de coeficientes de variação similares foram encontrados por Lameiras (2015) e por Naito *et al.* (2012) para ensaios *push-out* conduzidos em conectores fabricados com polímero reforçado com fibras de vidro (PRFV).

Os resultados aqui obtidos serão discutidos nas próximas seções, com objetivo primordial de analisar a influência exercida pela geometria da conexão (diâmetro e espaçamento entre furos) no comportamento mecânico dos conectores, de modo a determinar a configuração que apresenta o melhor comportamento mecânico. Outros aspectos que também foram analisados são: (a) a influência exercida pela duplicação das fileiras de furos; (b) a influência ocasionada pela variação na resistência do concreto; (c) a influência da substituição da armadura por fibras de aço; (e) a aderência entre o concreto e o isolamento térmico.

Tabela 4.7: Resultados experimentais correspondentes aos ensaios *push-out* para análise da variação do diâmetro e do espaçamento entre furos, com dados obtidos a partir do grupo principal.

Espécime	$Q_{lo.u}$			$S_{lo.u}$			K_f		
	QTD	Média [kN]	CoV [%]	QTD	Média [mm]	CoV [%]	QTD	Média. [kN/mm]	CoV [%]
SP-6.35-3.00	3	23.02	11.4	3	0.99	20.4	3	23.64	8.9
SP-12.70-1.75	2	32.23	5.7	2	1.28	24.5	2	26.38	19.0
SP-12.70-2.00	3	31.91	9.6	3	1.15	20.7	3	28.37	11.4
SP-12.70-2.50	2	30.35	0.9	2	1.17	52.6	2	35.93	53.2
SP-12.70-3.00	3	28.84	22.8	2	1.04	10.1	2	28.07	17.2
SP-19.05-2.00	2	25.99	7.1	2	2.23	0.9	2	11.67	6.2
SP-19.05-3.00	3	20.93	19.6	3	1.19	45.1	3	21.09	45.4
SP-25.40-1.75	3	24.50	5.8	3	1.01	39.4	3	30.15	49.8
SP-25.40-2.00	3	27.85	3.6	3	1.13	56.8	3	33.02	47.9
SP-25.40-3.00	3	23.94	20.1	3	1.39	44.2	3	19.09	23.9
SP-31.75-2.00	3	25.89	6.2	2	1.29	13.4	2	21.20	18.9
SP-31.75-3.00	3	26.51	5.5	3	0.94	32.2	3	32.71	42.4
SP-CTL	3	22.21	4.8	3	1.37	27.4	3	17.57	29.7

Tabela 4.8: Resultados experimentais correspondentes aos ensaios *push-out* para análise da: variação da resistência do concreto, duplicação da fileira de furos, substituição da armadura por fibras de aço e presença de EPS, com dados obtidos a partir do grupo secundário.

Espécime	$Q_{lo.u}$			$S_{lo.u}$			K_f		
	QTD	Média [kN]	CV [%]	QTD	Média [mm]	CV [%]	QTD	Média. [kN/mm]	CV [%]
SP-6.35(2)-3.00	3	24.09	17.0	2	1.44	51.18	2	19.47	34.31
SP(C30)-19.05-2.00	2	22.76	12.9	-	-	-	-	-	-
SP(C50)-19.05-2.00	2	24.23	2.1	2	0.98	31.92	2	27.80	33.86
SP(FA)-19.05-2.00	2	30.25	31.1	2	1.28	2.78	2	23.51	28.59
SP-EPS	1	3.17	-	1	4.36	-	1	0.73	-

Prezando pela concisão do texto, na Tabela 4.7 e na Tabela 4.8 foram apresentados os valores médios obtidos para cada configuração de furo e espaçamento, juntamente com o respectivo coeficiente de variação (ou erro médio). A Tabela A.1, que se encontra no Apêndice A, apresenta, por sua vez, todos os resultados individuais dos ensaios *push-out* executados, para cada uma das réplicas ensaiadas.

4.3.4 Efeito da variação do diâmetro dos furos

Gráficos de barra (com o valor médio) e barras de erro (com os valores mínimo e máximo) foram plotados na Figura 4.12, com objetivo de avaliar o efeito da variação do diâmetro no comportamento mecânico dos conectores do tipo *Perfofrp*. O carregamento e a área de furos (no eixo y) em função do diâmetro (no eixo x) foi plotado para cada um dos seguintes espaçamentos: 1.75, 2.00, e 3.00. Para efeito de comparação, consideram-se neste tópico apenas as configurações de espaçamentos que apresentaram duas ou mais variações de valores para o diâmetro das perfurações.

Observou-se que para ambos os espaçamentos adotados, os conectores com furos de 12.70 mm de diâmetro apresentaram os melhores desempenhos mecânicos, considerando a capacidade última da conexão (32.23 kN, 31.91 kN e 28.84 kN, com os espaçamentos apresentando os valores de 1.75, 2.00 e 3.00, respectivamente). Em segundo lugar, os furos com diâmetro de 25.40 mm demonstraram os melhores comportamentos mecânicos, apresentando os seguintes valores relativos à capacidade última da conexão: 24.50 kN, 27.85 kN, 23.94 kN, para os espaçamentos de 1.75, 2.00 e 3.00, respectivamente.

Analisando-se cada gráfico de maneira individual, torna-se bastante evidente que o aumento do diâmetro dos furos, desde que o valor apresentado pelo espaçamento entre furos seja mantido constante, induz ao aumento da área total de furos, em cada um dos gráficos

analisados (Figura 4.12a, Figura 4.12b, e Figura 4.12c). O fato anteriormente mencionado implica em duas consequências, que são: (Consequência A) o aumento da área total de furos, que é ocasionada pelo aumento do diâmetro das perfurações, necessariamente induz ao aumento da área total de pinos de concreto, que podem garantir maior ancoragem aos conectores, criando potencial para o aumento do seu desempenho mecânico; (Consequência B) o aumento do diâmetro das perfurações, que leva ao incremento da área total de furos, induz à aproximação entre a borda do furo e a borda longitudinal dos conectores; e induz, também, à aproximação entre a borda do furo e a interface entre o concreto e o isolamento térmico. Isso ocasiona, conseqüentemente, a aproximação entre a borda da perfuração e a área de fragilidade mencionada em 4.3.1, que consiste na região de contato entre o PRFV e o EPS, local onde as fissuras predominaram.

Caso somente a “Consequência A” apresentasse efeito, o incremento da área total de furos levaria, seguindo alguma lei matemática conhecida, ao incremento contínuo da capacidade última da conexão. Isto, entretanto, não foi verificado neste trabalho, pois não foram observados incrementos de carga correspondentes ao aumento da área total de furos, seguindo alguma tendência matemática conhecida, considerando valores mínimos de confiabilidade. A ausência da predominância da “Consequência A” demonstra que a “Consequência B”, por sua vez, apresentou efeito sobre os conectores, que consiste basicamente na fragilização das regiões anteriormente mencionadas, ocasionando um decréscimo na capacidade resistente da conexão.

Não se observaram (Figura 4.12a, Figura 4.12b, e Figura 4.12c) tendências muito nítidas de otimização para o diâmetro dos furos, por meio de curvas características, quando os espaçamentos foram fixados, e o diâmetro das perfurações apresentou variação. Apenas alguns comportamentos gerais puderam ser observados. Observou-se, por exemplo, em linhas gerais, certa tendência de otimização do diâmetro dos furos para configurações com diâmetros próximos a 12.70 mm.

Ao analisar-se, por exemplo, a Figura 4.12a, que consiste na configuração com espaçamento de 1.75, verifica-se que, mesmo com a duplicação da área total de furos (de 1013 mm² para 2027 mm²), quando o diâmetro foi alterado de 12.70 mm para 25.40 mm, houve decréscimo na capacidade resistente da conexão de 32.23 kN, para 24.50 kN, correspondente a uma perda de 31.5 %. Analisando-se, por sua vez, a Figura 4.12b, que corresponde aos espaçamentos entre furos de 2.00, mesmo com incrementos de área de 40.7 %, 50.0 %, e 134.5 %, ocorreram decréscimos nas capacidade resistente das conexões com valores de

22.8 %, 14.6 %, e 23,3 %, quando os diâmetros foram modificados de 12.70 mm para 19.05 mm, 25.40 mm, e 31.75 mm, respectivamente.

Analisando-se, por sua vez, o espaçamento de 3.00 (Figura 4.12c), observa-se um ganho de resistência de 25.3 % com o incremento de 99.7 % da área, considerando a modificação do diâmetro de 6.35 mm para 12.70 mm. Considerando-se, no entanto, a alteração do diâmetro de 12.70 mm para 19,05 mm, 25.40 mm, e 31.75 mm, que ocasionaram os respectivos incrementos de área de 35.1 %, 60.0 % e 150 %, ocorreram os correspondentes decréscimos na capacidade última com valores de 37.8 %, 20.5 %, 8.8 %.

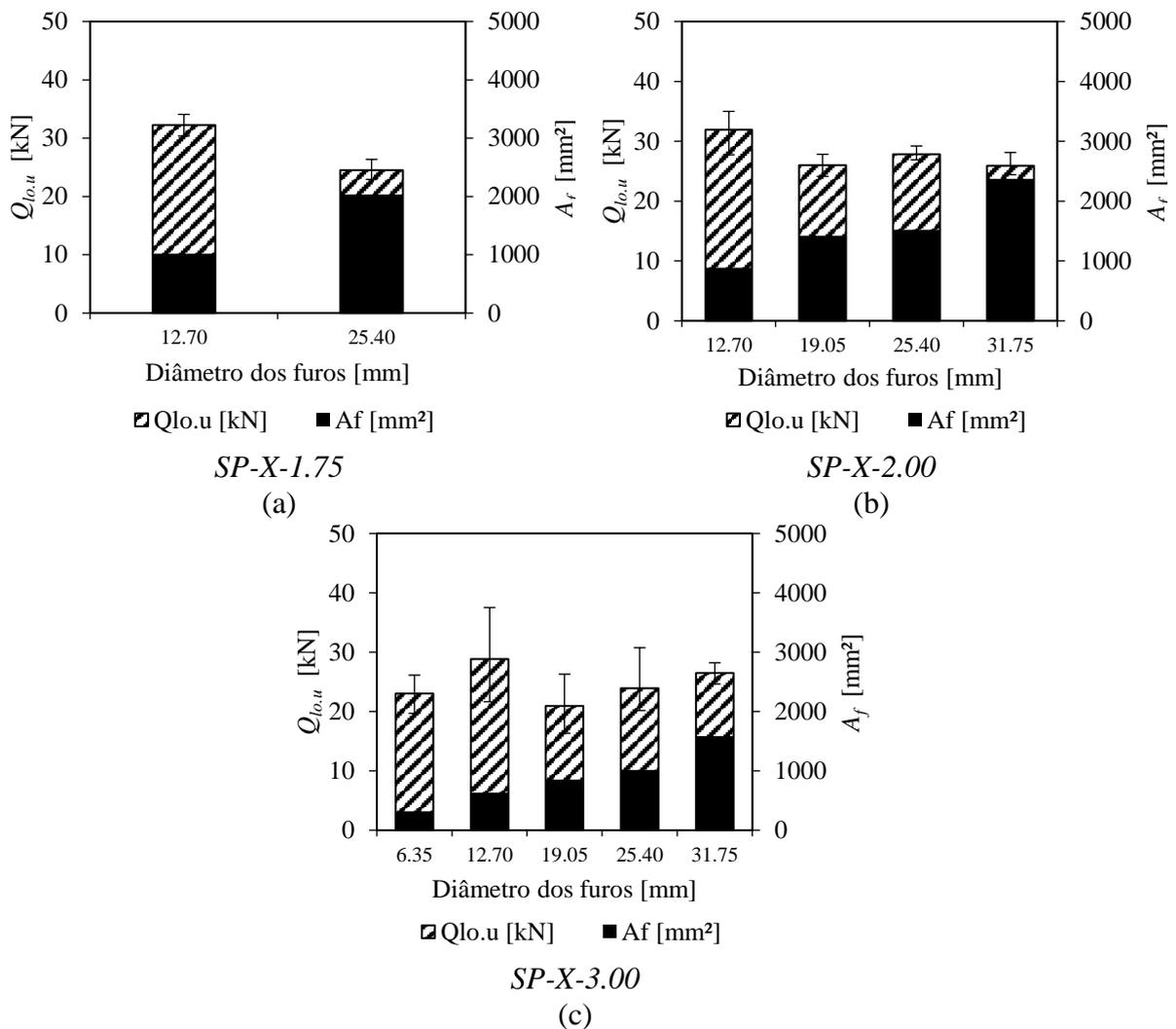


Figura 4.12: Carregamento último [kN] e área total de furos [mm²] versus diâmetro dos furos [mm], considerando espaçamentos de [mm/mm]: (a) 1.75; (b) 2.00; (c) 3.00.

Em virtude, no entanto, da elevada variabilidade apresentada pelos resultados, as observações anteriormente realizadas, podem ser levadas em conta, apenas em linhas gerais. Podendo-se concluir que todas as configurações de furos que se encontram à direita do diâmetro

de 12.70 mm (que são os diâmetros de 19.05 mm, 25.40 mm, e 31.75 mm) apresentaram decréscimo na capacidade última, quando suas áreas de furo foram aumentadas; enquanto que, todas as configurações de furo “à esquerda” de 12.70 mm (apenas o configuração de furo com diâmetro de 6.35 mm), apresentou decréscimo em sua capacidade última, quando ocorreu a diminuição da área total de furos.

4.3.5 Efeito da variação do espaçamento longitudinal entre furos

A Figura 4.13 apresenta os gráficos de barra (com o valor médio), juntamente com as respectivas barras de erro (com valores máximo e mínimo), plotados para analisar o carregamento e a área total de furos em função do espaçamento entre furos. Para possibilitar a efetuação das comparações foram consideradas os valores de diâmetro, que apresentaram duas ou mais variações de espaçamento (12.70 mm, 19.05 mm, 25.40 mm, e 31.75 mm).

Ao longo do eixo x, com o aumento do espaçamento entre furos, ocasiona a diminuição da quantidade de furos por conector e da área total de perfurações. Isso pode gerar, de modo semelhante ao apresentado em 4.3.4, pelo menos duas possíveis consequências, que são: (Consequência C) a diminuição a área total de furos pode ocasionar um decréscimo na capacidade resistente da conexão, devido à diminuição da área de ancoragem dos conectores no concreto; (Consequência D) o distanciamento entre os furos, ocasionado devido ao aumento do espaçamento entre os furos, pode desacentuar possíveis concentrações de tensões geradas em virtude da proximidade entre os furos, e melhorar o desempenho mecânico das conexões.

Observaram-se algumas tendências para cada um dos quatro gráficos plotados. No caso da Figura 4.13b (diâmetro de 12.70 mm) e da Figura 4.13c (diâmetro de 19.05 mm), observou-se um incremento de resistência com a diminuição do espaçamento entre furos, demonstrando que, para os espaçamentos limites de 1.75 e 2.00 correspondentes, respectivamente, aos diâmetros de 12.70 mm e 19.05 mm, não houve prejuízo à capacidade última das conexões. A observação realizada baseia-se no fato de que, com a diminuição do espaçamento entre os furos, há um aumento na quantidade de furos, o que leva a uma melhor ancoragem do PRFV no concreto, ocasionando, por sua vez, um melhor comportamento mecânico para a conexão (Consequência C).

A observação anteriormente efetuada é válida, no entanto, somente até certo limite. A partir de certo ponto, com a aproximação demasiada do espaçamento entre furos, poderá ocorrer uma concentração de tensões nessa região. Isso induzirá certa fragilidade no local,

ocasionando um rompimento precoce da conexão, em virtude do surgimento e da propagação de fissuras a partir da região fragilizada (inverso da Consequência D).

Figura 4.13d apresenta um comportamento bastante esclarecedor, para os ensaios efetuados, ao demonstrar um comportamento em formato de parábola para a configuração de diâmetro de 25.40 mm; induzindo à otimização da configuração de furos para espaçamentos próximos a 2.00. Esse resultado corrobora a observação feita anteriormente. A Figura 4.13e apresenta os resultados obtidos para a configuração de furo de 31.75 mm, indicando não haver praticamente alteração no valor dos resultados obtidos para o carregamento último, ao modificar-se o espaçamento de 2.00 para 3.00. Serão feitas, no entanto, algumas ponderações, com relação a esse resultado.

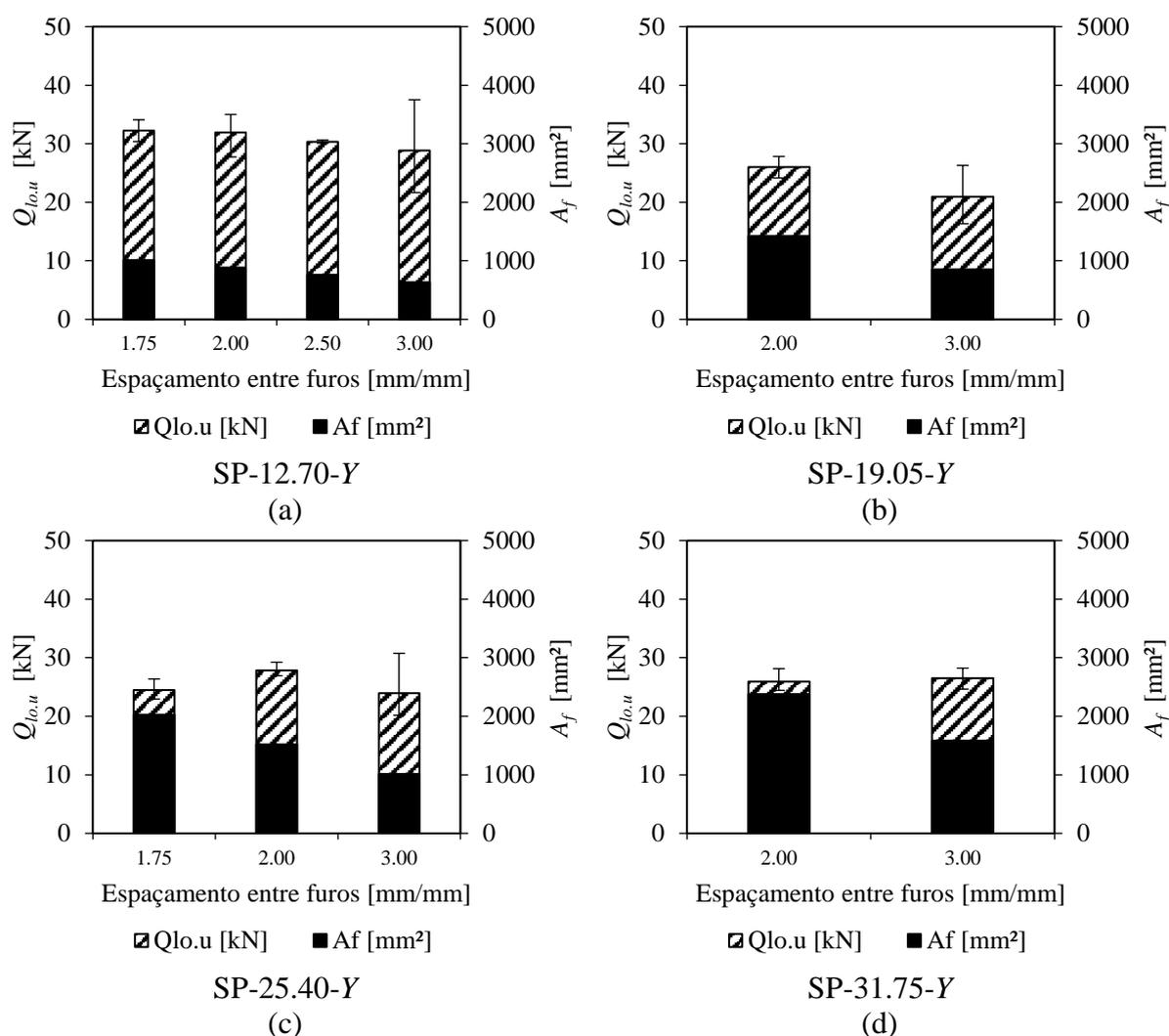


Figura 4.13: Carregamento último [kN] e área total de furos [mm²] versus espaçamento entre furos, considerando configurações de diâmetro de: (a) 12.70 mm; (b) 19.05 mm; (c) 25.40 mm; (d) 31.75 mm.

A partir do momento em que Figura 4.13d demonstra essa tendência de otimização da conexão em formato de parábola, algumas observações podem ser feitas. No caso dos furos com diâmetro de 12.70 mm, o ponto de inflexão provavelmente é menor que 1.75; pois há uma curva crescente correspondente ao valor da capacidade última, partindo do espaçamento de 3.00 em direção ao espaçamento de 1.75. No caso do diâmetro de 19.05 mm, o ponto de inflexão provavelmente é menor que 2.00, pois há uma tendência de incremento de resistência partindo do espaçamento de 3.00 em direção ao espaçamento de 2.00. Já no caso da configuração com diâmetro de 25.40 mm, o ponto de inflexão encontra-se em valores próximos a 2.00.

Ou seja, há uma tendência bastante evidente de deslocamento do ponto de inflexão de valores de espaçamentos menores para valores de espaçamentos maiores, quando ocorre o aumento diâmetro do furo adotado para cada configuração de conexão. O ponto de inflexão apresentou-se: menor que 1.75, para furos de 12.70 mm; menor que 2.00, para furos de 19.05 mm; próximo a 2.00, para furos de 25.40 mm; e maior que 2.00 para furos de 31.75 mm. O fato de não haver ocorrido alteração no valor do carregamento último para furos de 31.75 mm, quando o espaçamento foi modificado de 2.00 para 3.00, indica que o primeiro valor se encontra no ramo ascendente da otimização dos furos, e o segundo valor encontra-se no ramo descendente da otimização dos furos.

Isso se dá pelo fato de que ao aumentar-se o diâmetro dos furos, a borda do referido furo aproxima-se da borda da conexão, aumentando a probabilidade de ocorrer algum tipo de concentração de tensão entre essas duas bordas. Isso faz com que a capacidade última da conexão fique cada vez mais limitada conforme se aumente o diâmetro do furo.

4.3.6 Efeito da variação da área de furos

A Figura 4.14a mostra a capacidade última das conexões em função da área total de furos, o número indicador que encontra-se ao lado de cada símbolo (triângulos, quadrados ou círculos, que podem ser brancos ou pretos) mostra o espaçamento entre furos adotado para a conexão (1.75, 2.00, 2.50 ou 3.00). Um dos objetivos dos ensaios *push-out* foi determinar, em linhas gerais, o espaçamento e o diâmetro que induzem ao valor máximo para o carregamento último, considerando cada configuração de diâmetro e espaçamento estudadas. Ou seja, realizar a otimização da conexão, por meio da determinação de uma parábola para cada configuração de furo, que apresenta o máximo carregamento em função do espaçamento entre furos.

A Figura 4.14b e a Figura 4.14c mostram as curvas polinomiais de 2° grau obtidas para os ensaios realizados em conectores com furos de 12,70 mm e 25.40 mm. A Equação 4.1 representa a curva obtida para os furos de 12.70 mm, ao passo que, a Equação 4.2 representa a curva obtida para os furos de 25.40 mm, nas quais $Q_{lo.u}$ [kN] representa a capacidade última da conexão e A_f [mm²] representa a área de furos.

$$Q_{lo.u} = -0.000018617153A_f^2 + 0.039918495058A_f + 10.95675 \quad 4.1$$

$$Q_{lo.u} = -0.000014069972A_f^2 + 0.043284342357A_f - 5.435 \quad 4.2$$

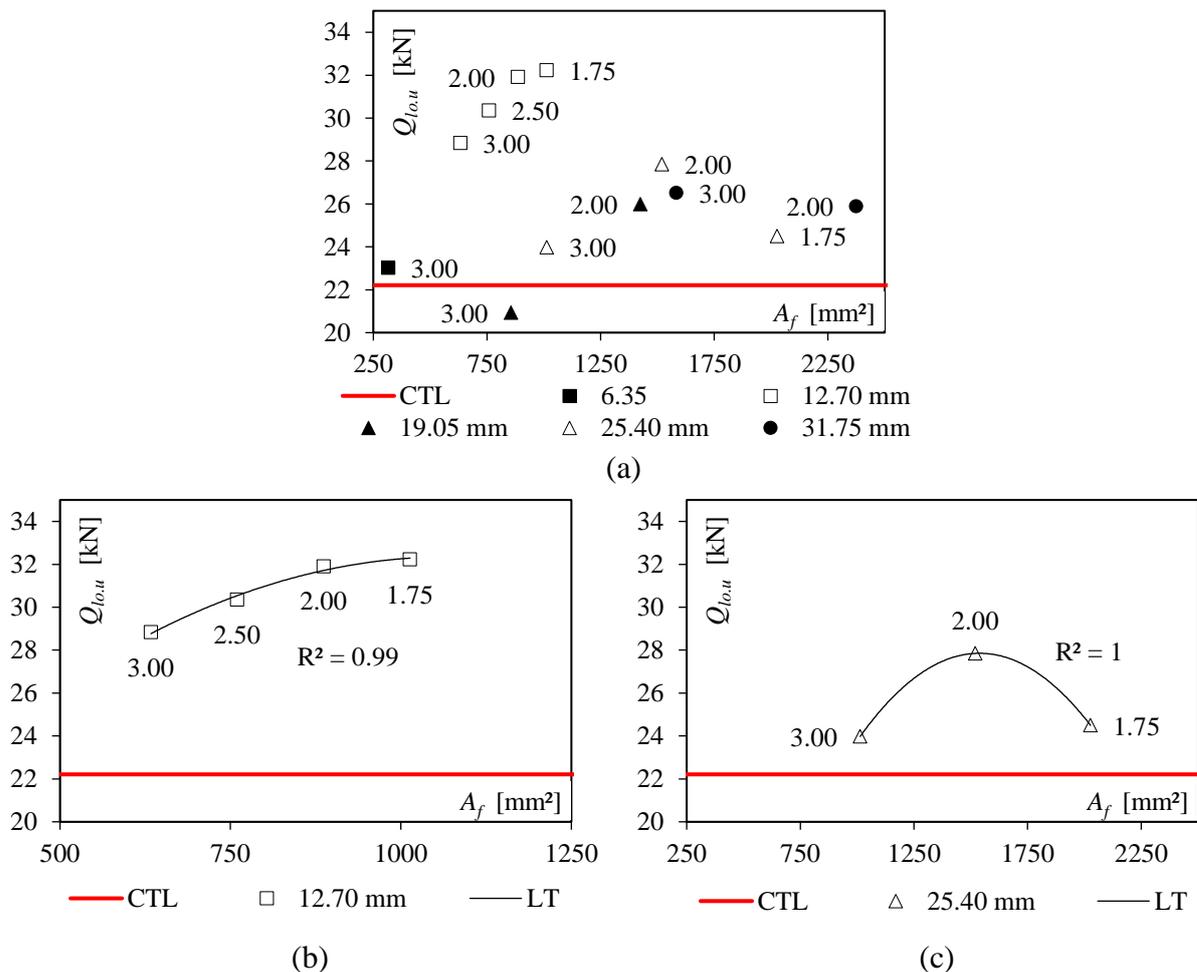


Figura 4.14: Carregamento último *versus* área total de furos: (a) todos os conectores; (b) conectores com furos de 12.70 mm; (c) conectores com furos de 25.40 mm.

Toda equação do 2° grau apresenta a forma genérica da Equação 4.3. Os coeficientes A , B e C são responsáveis por dar forma à curva.

$$f(x) = Ax^2 + Bx + C \quad 4.3$$

Pressupondo-se que, para cada diâmetro de furo, haverá uma curva semelhante às apresentadas na Figura 4.14b e na Figura 4.14c, pode-se estabelecer uma relação entre as diversas curvas existentes substituindo-se cada um dos coeficientes A , B e C por determinada função. No caso do presente trabalho, em virtude da diminuta quantidade de dados, foram utilizadas funções lineares obtidas a partir dos coeficientes polinomiais das Equações 4.1 e 4.2. Ou seja, os coeficientes A , B e C podem ser substituídos cada qual por uma função linear nos formatos apresentados nas Equações 4.4, 4.5 e 4.6, onde d_f [mm] representa o diâmetro dos furos.

$$A = a_1 d_f + a_2 \quad 4.4$$

$$B = b_1 d_f + b_2 \quad 4.5$$

$$C = c_1 d_f + c_2 \quad 4.6$$

Obtendo-se, assim, a Equação 4.7

$$Q_{lo.u} = a_1 d_f + a_2 A_f^2 + b_1 d_f + b_2 A_f + c_1 d_f + c_2 \quad 4.7$$

Empregando-se os coeficientes polinomiais das Equações 4.1 e 4.2 para o estabelecimento de funções lineares são encontrados, portanto, as seguintes constantes:

$$a_1 = 3.580 \times 10^{-7}$$

$$a_2 = -2.316 \times 10^{-5}$$

$$b_1 = 2.650 \times 10^{-4}$$

$$b_2 = 3.655 \times 10^{-2}$$

$$c_1 = -1.291$$

$$c_2 = 27.35$$

Substituindo-se os coeficientes a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , c_1 e c_2 na Equação 4.7, e calculando-se os valores para $Q_{lo.u}$ [kN] para cada um dos modelos, obtém-se os dados apresentados na Tabela 4.9. O erro médio entre os modelos experimental e a equação empírica foi de 1.97%.

Com exceção dos modelos SP-6.35-3.00 e SP-19.05-3.00, que apresentaram coeficientes de variação classificados com médios, todos os demais apresentaram coeficientes de variação classificados como baixo, conforme sistema de classificação apresentado por

Pimentel-Gomes (2009). O uso da equação empírica que foi obtida aparenta ser promissor, mas está restrito aos conectores com geometria, material constituinte e posicionamento no painel similares aos empregados neste trabalho. A generalização de seu uso para outras configurações de conexão carece de outros estudos. Sugere-se, portanto, que seja melhorada com uso de dados obtidos com a execução de outros ensaios *push-out*, ou com a realização de experimentos empregando-se técnicas de modelagem computacional em elementos finitos.

Tabela 4.9: Comparação entre o resultado experimental e o modelo empírico

Conector			$Q_{lo.u}$ [kN]		Erro [%]
D_f [mm]	S_f [mm]	A_f [mm ²]	Experimental	Modelo empírico	
6.35	3.00	316.69	23.02	29.17	11.79
12.70	1.75	1013.41	32.23	32.29	0.10
12.70	2.00	886.74	31.91	31.72	0.30
12.70	2.50	760.06	30.35	30.54	0.31
12.70	3.00	633.38	28.84	28.77	0.11
19.05	2.00	1425.11	25.99	28.85	5.23
19.05	3.00	855.07	20.93	26.38	11.53
25.40	1.75	2026.83	24.50	24.49	0.00
25.40	2.00	1520.12	27.85	27.85	0.00
25.40	3.00	1013.41	23.98	23.98	0.00
31.75	2.00	2375.19	25.89	26.63	1.40
31.75	3.00	1583.46	26.51	28.00	2.73

4.3.7 Ganhos de resistência em virtude da perfuração dos conectores

A Figura 4.15 apresenta o ganho de resistência obtido em ordem crescente, divididos em duas categorias: para furos com diâmetros de 6.35 mm e 12.70 mm (Figura 4.15a) e para furos com diâmetros de 19.05 mm e 25.40 mm (Figura 4.15b). No primeiro caso os valores oscilaram entre 4 % e 45 %, ao passo que, no segundo caso variaram entre -6 % (houve prejuízo nesse caso) e 25%. Ambos os valores apresentados se encontram no ramo ascendente da curva de otimização. Recomenda-se que o dimensionamento dos conectores seja feito nesse ramo, de modo a economizar o trabalho de perfuração dos conectores.

Nota-se, portanto, que furos com menores diâmetros tendem a apresentar melhores desempenhos, pelo fato de exercerem menor influência nas tensões próximas à borda do conector. O máximo ganho de resistência obtido (45 %) foi alcançado para a configuração de furos de 12.70 mm, com espaçamento de 1.75 mm (32.23 %), quando comparado ao grupo controle, que não possui furos. As configurações de furo do primeiro grupo (Figura 4.15a)

apresentaram-se, também, mais eficientes pois induziram a ganhos de resistência mais elevados, com menores áreas de perfuração.

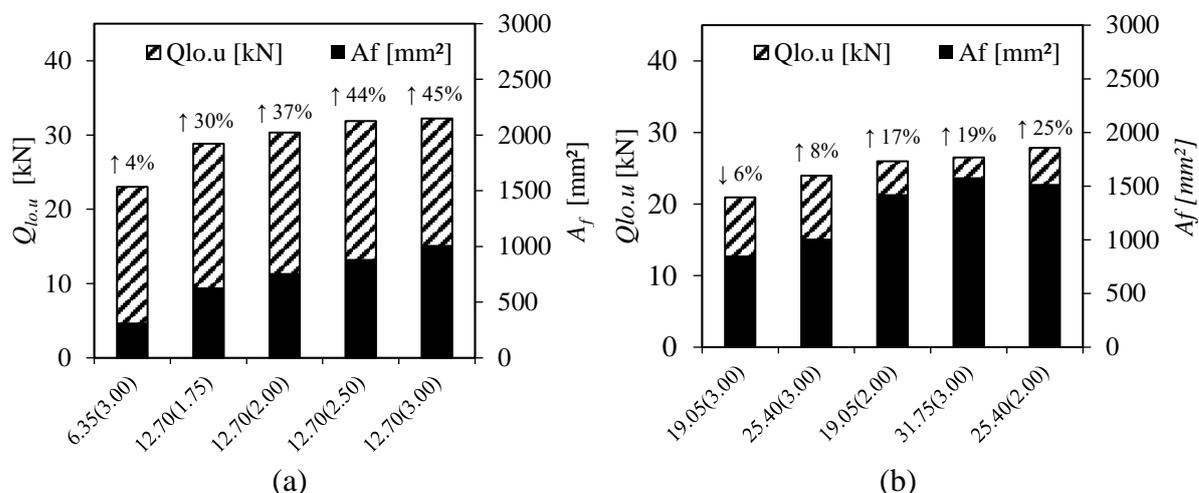


Figura 4.15: Ganho de resistência em relação ao grupo controle: (a) furos com diâmetros de 6.35 mm e 12.70 mm; (b) furos com diâmetros de 2.40 mm, 19.05 mm e 25.40 mm.

4.3.8 Efeito da variação da duplicação da fileira de furos

A Figura 4.16 apresenta os resultados dos ensaios realizados com os conectores com furos com diâmetros de 6.35 mm, comparados por quantidade de fileiras. A área de furos foi duplicada de 317 mm² (uma fileira) para 633 mm² (duas fileiras). Para uma fileira de furos, o resultado encontrado foi 23.02 kN, ao passo que, para duas fileiras de furos o resultado obtido foi 24.09 kN. Houve um incremento, portanto, de apenas 4.65 % na capacidade última da conexão, que foi considerado pouco significativo. Esse resultado indica que a duplicação da fileira de furos gerou alguma fragilidade na conexão, pois a configuração SP-12.70-3.00, que possui uma área de furos similar, apresentou um carregamento último de 28.07 kN.

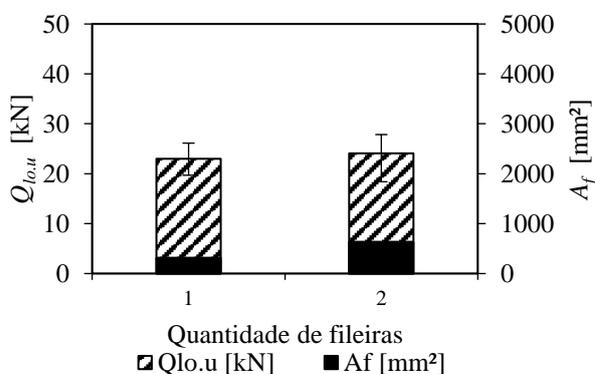


Figura 4.16: Carregamento último *versus* quantidade de fileiras, considerando a configuração de furos com diâmetro de 6.35 mm e espaçamento de 3.00.

4.3.9 Efeito da variação da resistência do concreto

A Figura 4.17 apresenta a capacidade última dos conectores ($Q_{lo,u}$) em função da resistência à compressão do concreto constituinte dos corpos de prova representativos da conexão entre as camadas de concreto e os conectores de PRFV (30 MPa, 40 MPa e 50 MPa). Nestes ensaios foi utilizada a configuração de furos SP-19.05-2.00. Esperava-se, naturalmente, um aumento na capacidade última das conexões, em virtude do aumento na resistência à compressão do concreto constituinte dos blocos, presumindo-se que isso geraria uma melhor ancoragem para os conectores. Por análise da Figura 4.17, não se observaram, no entanto, uma tendência nítida para esses incrementos na capacidade última. Pois os valores encontrados mantiveram-se quase que praticamente constantes: 22.76 kN (30 MPa), 25.99 kN (40 MPa), e 24.23 kN (50 MPa).

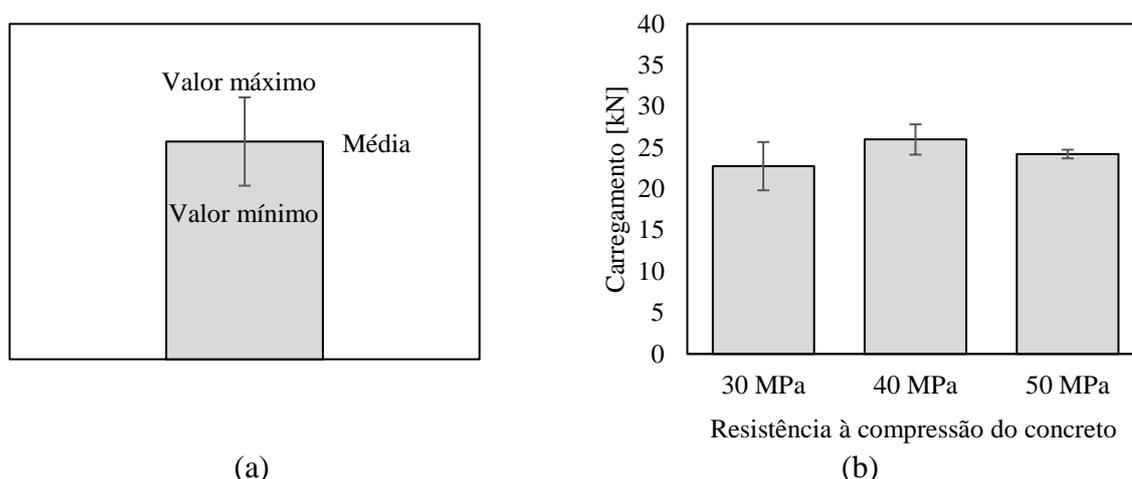


Figura 4.17: Carregamento último *versus* classe de resistência do concreto: (a) legenda do gráfico; (b) conectores com furos com diâmetro de 19.05 mm e espaçamento de 2.00.

4.3.10 Efeito da substituição da armadura por fibras de aço

Os corpos de prova confeccionados com concreto com fibras de aço apresentaram certo incremento na capacidade última da conexão (16.4 %), em relação aos corpo de prova confeccionado com armadura convencional (Figura 4.18). Como os corpos de prova com fibras de aço apresentaram, no entanto, o maior valor entre todos os ensaios para o coeficiente de variação (31.12 %), esse resultado, não foi considerado confiável.

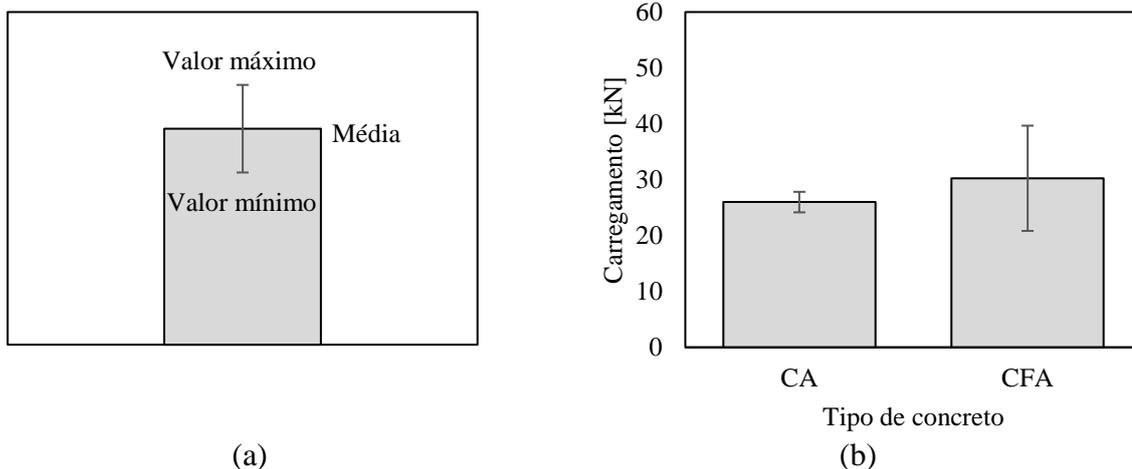


Figura 4.18: Carregamento última *versus* tipo de concreto: (a) legenda do gráfico; (b) conectores com furos com diâmetros de 19.05 mm e espaçamento de 2.00.

4.3.11 Influência do material isolante no comportamento mecânico da conexão

A Figura 4.11e apresenta o resultado do ensaio para determinação da aderência entre o EPS e concreto, cujo valor máximo encontrado foi 3.17 kN. Considerando-se as áreas de contato entre o isolamento e o concreto, obteve-se uma aderência de 8.81 kN/m². Esta aderência é mecanicamente solicitada, no entanto, somente após a ruptura das conexões, pois durante o ensaio, devido à pequena deformabilidade apresentada pelos conectores, e a alta deformabilidade apresentada pelo EPS, as cargas concentram-se todas no conector, até que ocorra a ruptura. A partir desse ponto, a deformação do EPS pode ser visualmente notada, até a conclusão do ensaio.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o detalhamento e a avaliação da qualidade de fabricação de conexões constituídas por chapas perfuradas de polímero reforçado com fibras de vidro (PRFV) para paredes de concreto com isolamento incorporado (painéis sanduíche), empregando-se um sistema de produção de baixo custo. Foi incluído, também, no programa experimental a execução de 46 ensaios *push-out* com as conexões fabricadas, com o intuito de avaliar seu comportamento mecânico. As principais conclusões obtidas encontram-se resumida a seguir:

- Um sistema de infusão por resina à vácuo de baixo custo foi utilizado para produzir os compósitos, empregando-se materiais que podem ser encontrados praticamente em qualquer lugar e ambiente.
- As chapas de polímero reforçado com fibras de vidro (PRFV) produzidas apresentaram as seguintes propriedades médias: 2.32 mm de espessura; 164.24 MPa de tensão última à tração; 39.04 % de fração volumétrica de fibras; 13.35 GPa de módulo de elasticidade longitudinal; 4.75 GPa de módulo de elasticidade transversal, e 0.35 de coeficiente de Poisson.
- Considerando as análises realizadas (coeficientes de variação, ANOVA, e aderência à curva normal), as chapas apresentaram características de homogeneidade satisfatórias nos três níveis de estudo realizados, que foram ao longo da extensão superficial das chapas, entre diferentes chapas, e entre diferentes grupos de produção.
- Após a fabricação dos compósitos, 46 espécimes confeccionados com a conexão tipo *Perfofrp* foram submetidos ao ensaio *push-out*, com o objetivo de avaliar o desempenho mecânico desse tipo de conexão.
- Todos os conectores apresentaram padrões de fissuração bastante semelhantes com tendências de inclinação em uma determinada direção, partindo da parte superior em contato com o apoio (camada externa de concreto), em direção à parte inferior em contato com a camada submetida ao carregamento (camada interna de concreto).
- A resposta das conexões apresentou-se rígida até a ruptura da conexão e, após esse ponto, o comportamento apresentou-se bastante aleatório, com

algumas conexões apresentando um patamar de escoamento aproximadamente definido e outras apresentando um decaimento de carga um pouco mais brando.

- Observou-se que para ambos os espaçamentos adotados, os conectores com furos de 12.70 mm apresentaram os melhores desempenhos (32.23 kN, 31.91 kN e 28.84 kN, para 1.75, 2.00 e 3.00, respectivamente).
- A otimização da configuração dos furos está associada a um espaçamento característico para cada diâmetro. Ou seja, os resultados indicam que, dependendo do diâmetro adotado, haverá um determinado espaçamento que induzirá ao melhor comportamento mecânico. Observou-se, também, uma tendência de deslocamento dos pontos de inflexão (dos gráficos da capacidade última em função do espaçamento entre furos) de valores de espaçamentos menores (cerca de 1.75) para valores de espaçamentos maiores (cerca de 2.50), quando ocorre o aumento do diâmetro do furo (de 12.70 mm para 31.75 mm) adotado para cada configuração geométrica. Com base nesse princípio uma equação empírica foi proposta, e apresentou um erro médio em relação aos resultados experimentais de 1.97 %.
- Para furos menores (6.35 mm e 12.70 mm), o ganho de resistência em relação ao grupo controle (conectores sem furos) oscilou entre 4 % e 45 %, ao passo que, para furos maiores (19.05 mm, 25.40 mm, e 31.75 mm) variou entre -6 % e 25%, com ambos os valores apresentados localizados no ramo ascendente da curva de otimização.
- Com a duplicação da fileira de furos para a conexão SP-6.35-3.00, houve um incremento de apenas 4.65 % na capacidade última da conexão, que foi considerado pouco significativo.
- Não foi verificada uma tendência de incremento de resistência das conexões com o aumento da resistência do concreto, pois os valores encontrados mantiveram-se praticamente constantes: 22.76 kN (30 MPa), 25.99 kN (40 MPa), e 24.23 kN (50 MPa).
- Os corpos de prova confeccionados com concreto com fibras de aço apresentaram certo incremento na capacidade última da conexão (16.4 %), em relação aos corpos de prova confeccionado com armadura convencional. Esse resultado, porém, é pouco confiável, devido ao elevado coeficiente de

variação apresentado pelos resultados do concreto confeccionado com fibras de aço (31.12 %).

- Obteve-se uma aderência de 8.81 kN/m² entre o concreto e o isopor. Essa aderência é mecanicamente solicitada, no entanto, somente após a ruptura das conexões, devido à pequena deformabilidade apresentada pelos conectores, e a alta deformabilidade apresentada pelo EPS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADVANCED VACUUM. **Infusão de Resina à Vácuo**. Disponível em: <<https://www.advancedvacuum.com.br/>>.

AHN, J. H. et al. Shear resistance of the perfobond-rib shear connector depending on concrete strength and rib arrangement. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 66, n. 10, p. 1295–1307, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.04.008>>.

AL-RUBAYE, S. et al. Evaluating elastic behavior for partially composite precast concrete sandwich wall panels. n. October, p. 71–88, 2018.

ASTM. **ASTM D3039/D3039M - Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. West Conshohocken, 2017.

ASTM. **ASTM D2584 - Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resin**. West Conshohocken, 2018.

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

BENAYOUNE, A. et al. Flexural behaviour of pre-cast concrete sandwich composite panel - Experimental and theoretical investigations. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 4, p. 580–592, 2008.

BERTINI, A. A. **Estruturas tipo sanduíche com placas de argamassa projetada**. 2002. Universidade de São Paulo, 2002.

BUSH, T. D.; STINE, G. L. Flexural Behavior of Composite Precast Concrete Sandwich Panels With Continuous Truss Connectors. **PCI Journal**, v. 39, n. 2, p. 112–121, 1994.

BUSH, T. D.; WU, Z. Flexural analysis of prestressed concrete sandwich panels with truss connectors. **PCI Journal**, v. 43, n. 5, p. 76–83, 1998.

CARDOSO, M. G. **Dosagem de Concretos Autoadensáveis Reforçados com Fibras pelo Método do Empacotamento Compressível**. 2020. Universidade de Brasília, 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, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.04.022>>.

CHOI, K. B. et al. In-plane shear behavior of insulated precast concrete sandwich panels reinforced with corrugated GFRP shear connectors. **Composites Part B: Engineering**, v. 79, p. 419–429, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.04.056>>.

CHOI, W.; JANG, S. J.; YUN, H. Do. Design properties of insulated precast concrete sandwich panels with composite shear connectors. **Composites Part B: Engineering**, v. 157, n. June 2018, p. 36–42, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.081>>.

CRUZ, P. J. S. et al. Desenvolvimentos recentes no domínio da conexão aço concreto no contexto das estruturas mistas. In: VI Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, São Paulo. **Anais...** São Paulo: EPUSP, 2006.

EUROCODE. **EN 1994-1-1 - Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings**. [s.l.: s.n.].

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.

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, 2020.

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. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.09.017>>.

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, 2013a. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.06.015>>.

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, 2013b. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.06.022>>.

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. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.021>>.

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, abr. 2018b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.141>>.

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

LEONHARDT, F. et al. Neues, vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit. **Beton - und Stahlbetonbau**, v. 82, n. 12, p. 325–331, 1987.

LIMA, J. M. **Estudo da capacidade resistente do conector de cisalhamento treliçado via método dos elementos finitos**. 2018. Universidade de Brasília, 2018.

MACCALL, C. W. Thermal Properties of Sandwich Panels. **Concrete Internacional**, v. 7, n. 1, p. 35–41, 1985.

MARIANO, A. M.; ROCHA SANTOS, M. Revisão da Literatura: Apresentação de uma Abordagem Integradora Structural Equations View project Service Quality View project. In: XXVI Congreso Internacional de la Academia Europea de Dirección y Economía de la Empresa (AEDEM), September, Reggio Calabria. **Anais...** Reggio Calabria: AEDEM, 2017. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/319547360>>.

MAXIMOS, H. N. et al. Behavior and Design of Composite Precast Prestressed Concrete Sandwich Panels with NU-Tie. n. March, p. 28, 2007.

NAITO, C. et al. Performance and Characterization of Shear Ties for Use in Insulated Precast Concrete Sandwich Wall Panels. **ASCE Journal of Structural Engineering**, v. 138, n. 1, p. 52–61, 2012.

NORRIS, T. G.; CHEN, A. Development of insulated FRP-confined Precast Concrete Sandwich panel with side and top confining plates and dry bond. **Composite Structures**, v. 152, p. 444–454, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.05.053>>.

O'HEGARTY, R.; KINNANE, O. Review of precast concrete sandwich panels and their innovations. **Construction and Building Materials**, v. 233, p. 117145, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117145>>.

OGUEJIOFOR, E. C.; HOSAIN, M. U. Numerical analysis of push-out specimens with perfobond rib connectors. **Computers and Structures**, v. 62, n. 4, p. 617–624, 1997.

OH, T. S.; JANG, S. J.; YUN, H. Do. Shear reinforcing influence of GFRP

shearconnectors in the concrete sandwich wall panel (CSWP) for exterior envelopes of buildings. **Advanced Materials Research**, v. 658, p. 38–41, 2013.

PCI COMMITTEE REPORT. State of the art of precast/prestressed concrete sandwich wall panels. **PCI Journal**, v. 56, n. 2, p. 131–176, 2011.

PESSIKI, S.; MLYNARCZYK, A. Experimental Evaluation of the Composite Behavior of Precast Concrete Sandwich Wall Panels. **PCI Journal**, v. 48, n. 2, p. 54–71, 2003.

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

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

SARA, B. M.; BAHRAM, M. S. Perfobond shear connectors for composite construction. **Engineering Journal**, v. 39, n. 1, p. 2–12, 2002.

SEOK, J. J.; HYUN, D. Y. Effects of Insulation Types on In-Plane Shear Behavior of Insulated Concrete Sandwich Wall Panels with GFRP Shear Connector. **Contemporary engineering sciences**, v. 8, n. 7, p. 315–322, 2015.

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. 1–13, 2016.

VERÍSSIMO, G. **Desenvolvimento de um conector de cisalhamento em chapa dentada para estruturas mistas de aço e concreto e estudo do seu comportamento**. 2007. Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

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, 2013.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física I**. 12. ed. São Paulo: Addison Wesley, 2008.

APÊNDICE A

Tabela A.1: Resultados individuais de cada ensaio *push-out* executado.

Espécime	<i>Q_{l0.u}</i>		<i>S_{l0.u}</i>		<i>K_f</i>	
	Valor [kN]	Média [kN]	Valor [mm]	Média [mm]	Valor [kN/mm]	Média [kN/mm]
CA-40-2×6.35-3.00-A	27.86		2.18		12.79	
CA-40-2×6.35-3.00-B	26.01	24.09	-	1.44	-	19.47
CA-40-2×6.35-3.00-C	18.39		0.70		26.15	
CA-40-6.35-3.00-A	23.22		0.93		25.09	
CA-40-6.35-3.00-B	26.13	23.02	1.26	0.99	20.66	23.64
CA-40-6.35-3.00-C	19.70		0.78		25.18	
CA-40-12.7-1.75-A	30.38		0.97		31.41	
CA-40-12.7-1.75-B	34.08	32.23	1.60	1.28	21.36	26.38
CA-40-12.7-2.00-A	35.00		1.47		23.85	
CA-40-12.7-2.00-B	32.97	31.91	1.10	1.15	30.10	28.37
CA-40-12.7-2.00-C	27.75		0.89		31.16	
CA-40-12.7-2.50-A	30.62		0.56		55.04	
CA-40-12.7-2.50-B	30.09	30.35	1.79	1.17	16.82	35.93
CA-40-12.7-3.00-A	21.65		0.93		23.24	
CA-40-12.7-3.00-B	27.35	28.84	-	1.04	-	28.07
CA-40-12.7-3.00-C	37.52		1.14		32.89	
CA-30-19.05-2.00-A	25.68		-		-	
CA-30-19.05-2.00-B	19.83	22.76	-	-	-	-
CA-40-19.05-2.00-A	24.15		2.21		10.95	
CA-40-19.05-2.00-B	27.83	25.99	2.25	2.23	12.38	11.67
CA-50-19.05-2.00-A	23.70		1.29		18.39	
CA-50-19.05-2.00-B	24.75	24.23	0.67	0.98	37.21	27.80
CA-40-19.05-3.00-A	26.30		1.89		13.89	
CA-40-19.05-3.00-B	16.34	20.93	1.11	1.19	14.75	21.09
CA-40-19.05-3.00-C	20.16		0.58		34.64	

Espécime	<i>Q_{lo.u}</i>		<i>S_{lo.u}</i>		<i>K_f</i>	
	Valor [kN]	Média [kN]	Valor [mm]	Média [mm]	Valor [kN/mm]	Média [kN/mm]
CA-40-25.4-1.75-A	22.94		1.43		16.04	
CA-40-25.4-1.75-B	24.20	24.50	0.48	1.01	50.94	30.15
CA-40-25.4-1.75-C	26.36		1.12		23.46	
CA-40-25.4-2.00-A	29.22		2.02		14.50	
CA-40-25.4-2.00-B	26.91	27.85	0.51	1.13	53.16	33.02
CA-40-25.4-2.00-C	27.42		0.87		31.41	
CA-40-25.4-3.00-A	30.74		2.24		13.70	
CA-40-25.4-3.00-B	21.05	23.98	1.14	1.40	18.50	19.07
CA-40-25.4-3.00-C	20.16		0.81		25.00	
CA-40-31.75-2.00-A	28.13		1.12		25.21	
CA-40-31.75-2.00-B	24.42	25.89	-	1.29	-	21.20
CA-40-31.75-2.00-C	25.13		1.46		17.20	
CA-40-31.75-3.00-A	26.69		0.51		52.23	
CA-40-31.75-3.00-B	28.22	26.51	1.14	0.94	24.84	32.71
CA-40-31.75-3.00-C	24.63		1.17		21.07	
CA-40-CTL-A	20.73		1.88		11.03	
CA-40-CTL-B	23.15	22.21	0.97	1.37	23.78	17.57
CA-40-CTL-C	22.76		1.27		17.90	
CFA-40-19.05-2.00-A	39.66		1.31		30.23	
CFA-40-19.05-2.00-B	20.84	30.25	1.24	1.28	16.79	23.51
CA-40-EPS	3.17	3.17	4.36	4.36	0.73	0.73

Obs.: Nesta tabela, a legenda para identificação dos espécimes apresentou algumas diferenças em relação ao restante do texto. Foi empregado o seguinte modelo: *A-X-Y-Z-n*. Onde: *A* pode ser concreto armado (*CA*) ou concreto com fibras de aço (*CFA*); *X* é a resistência do concreto em MPa; *Y* é o diâmetro dos furos; *Z* é o espaçamento entre furos; e *n* é a identificação da réplica.

APÊNDICE B

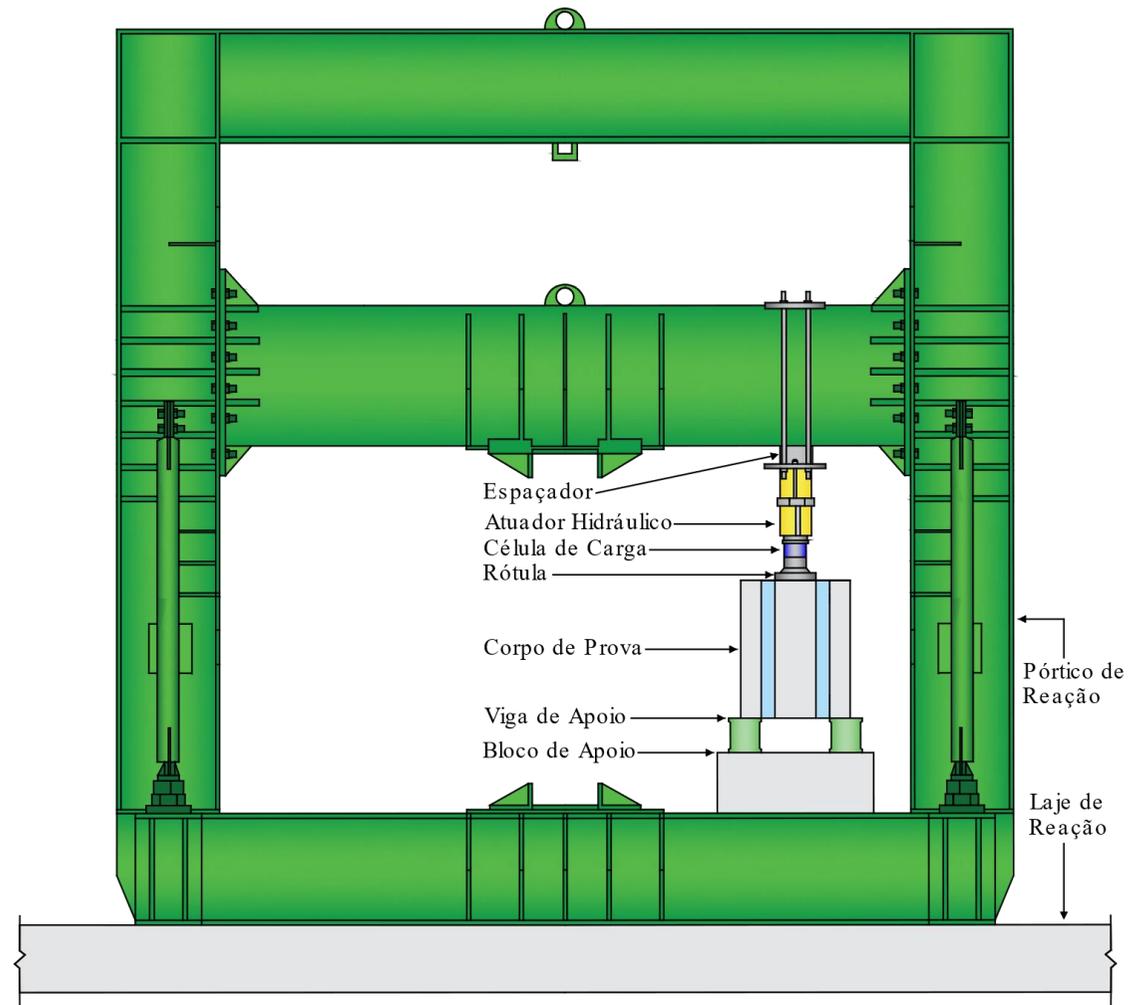


Figura B.1: Corpo de prova empregada para a realização do ensaio de cisalhamento duplo (*push-out test*), posicionado dentro do pórtico de reação do Laboratório de Estruturas (LabEst), pertencente à Faculdade de Tecnologia (FT) da Universidade de Brasília (UnB).