



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciência

Instituto Politécnico

Danilo de Souza Salgueiro Ferreira

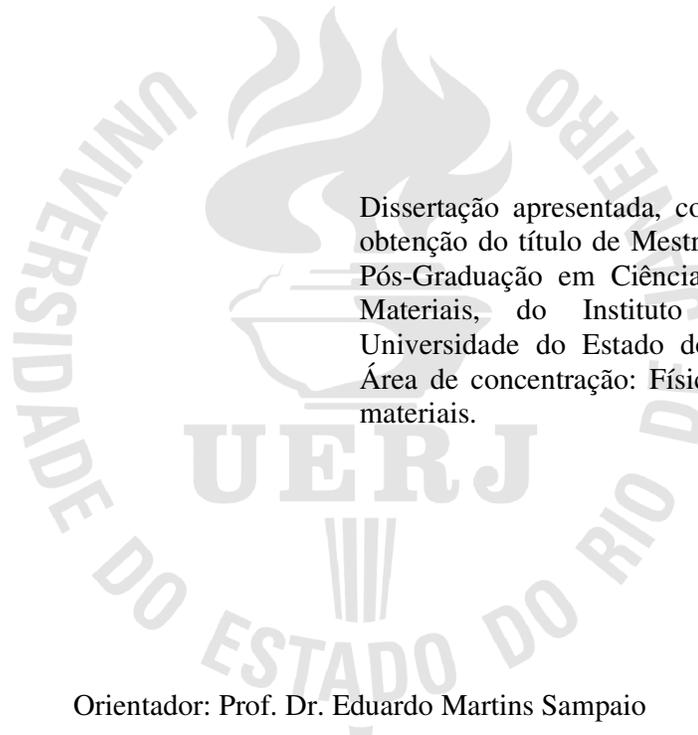
Avaliação do comportamento mecânico de vigas de concreto com falha crítica reforçadas com compósito laminando de fibra de carbono

Nova Friburgo

2019

Danilo de Souza Salgueiro Ferreira

**Avaliação do comportamento mecânico de vigas de concreto com falha crítica
reforçadas com compósito laminando de fibra de carbono**



Dissertação apresentada, como requisito para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Física e mecânica dos materiais.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Martins Sampaio

Co-orientador: Prof. Dr. Joaquim Teixeira de Assis

Nova Friburgo

2019

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/E

F383 Ferreira, Danilo de Souza Salgueiro.
Avaliação do comportamento mecânico de vigas de concreto com falha crítica reforçadas com compósito laminado de fibra de carbono / Danilo de Souza Salgueiro Ferreira. - 2019.
121 f. : il.

Orientadores: Eduardo Martins Sampaio e Joaquim Teixeira de Assis.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico.

1. Materiais compostos – Ensaio mecânico – Teses. 2. Concreto - Ensaio mecânico - Teses. 3. Fibras de carbono - Teses. 4. Construção de concreto – Deterioração - Teses. 5. Concreto – Mistura - Teses. 6. Resistência de materiais - Teses. 7. Materiais – Testes - Teses. I. Sampaio, Eduardo Martins. II. Assis, Joaquim Teixeira de. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto Politécnico. IV. Título.

CDU 620.1:531.4-36

Bibliotecária: Sandra Mueller CRB7/3633

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação.

Assinatura

Data

Danilo de Souza Salgueiro Ferreira

**Avaliação do comportamento mecânico de vigas de concreto com falha crítica
reforçadas com compósito laminando de fibra de carbono**

Dissertação apresentada, como requisito para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Física e mecânica dos materiais.

Aprovada em ____ de _____ de 2019

Banca examinadora

Prof. Dr. Eduardo Martins Sampaio (Orientador)

Instituto Politécnico – UERJ

Prof. Dr. Joaquim Teixeira de Assis (Co-orientador)

Instituto Politécnico – UERJ

Prof. Dr. José Renato de Castro Pessôa

Universidade Estadual de Santa Cruz – UESC

Prof. Dr. Heraldo Silva da Costa Mattos

Universidade Federal Fluminense – UFF

Nova Friburgo

2019

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família. Em especial a minha mãe Leia Aparecida de Souza e meu Pai Hélio Salgueiro Ferreira que foram responsáveis pela minha educação e o aprendizado dos valores que mais prezo como ser-humano. Sem eles, nada disso poderia ter sido realizado.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por permitir que eu caminhasse até aqui e pudesse realizar este curso.

Aos meus pais por sempre apoiarem minhas escolhas e independente de qualquer coisa, me incentivar a nunca desistir do que eu sempre acreditei.

A minha namorada, Nayara, por todo amor, força, paciência, carinho e dedicação ao longo do desenvolvimento desse trabalho

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Eduardo Martins Sampaio e Prof. Dr. Joaquim Teixeira de Assim, pelo conhecimento compartilhado durante todo esse tempo de estudo, a boa vontade, disposição e auxílio nos experimentos, estando presentes sempre que eu necessitei de orientação.

O técnico do LEFI, Luiz Felipe Lobato da Fonseca, pelas horas dedicadas na construção das formas e fabricação dos corpos de prova utilizados neste estudo.

Ao técnico do LAA, Marcelo Corrêa Lima, pelo empenho em realizar as medidas de rugosidade, auxiliar no desenvolvimento do reforço e aplicar o mesmo aos corpos de prova.

Ao técnico do LAA, Ricardo Hudson da Silva, pela paciência e incontáveis horas dedicadas na realização dos ensaios mecânicos.

Ao mestre Guilherme Alvarenga Queiroz, por ajudar no desenvolvimento do reforço e aplicação do mesmo, além de compartilhar ideias para o melhor desenvolvimento deste estudo.

Aos professores Dr. Carlos Ivan Ribeiro de Oliveira e Dr. José Renato de Castro Pessôa, sempre dispostos a auxiliar na solução de dúvidas referentes aos temas relevantes à pesquisa.

A toda a equipe do LAA e do TECPOL por sempre estar disposta a ajudar e agilizar a realização dos ensaios.

A todos os profissionais da UERJ que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho,

A CAPES, por conceder uma bolsa auxílio que permitiu dedicação integral a esta pesquisa.

RESUMO

FERREIRA, Danilo de Souza Salgueiro. *Avaliação do comportamento mecânico de vigas de concreto com falha crítica reforçadas com compósito laminado de fibra de carbono*. 2019. 121 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e tecnologia de materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2019.

As estruturas de concreto são muito comuns na construção civil, pois este material possui diversas características que contribuem para sua grande aceitação. Apesar disto, o concreto está sujeito a fatores que podem afetar suas condições em serviço e diminuir sua vida útil. A utilização de materiais compósitos laminados para o reforço ou reabilitação dessas estruturas é uma prática eficaz que vem se tornando popular graças a vantagens observadas em relação a outras técnicas de intervenções mais tradicionais. Este trabalho comprometeu-se com o estudo do comportamento mecânico de corpos de prova prismáticos de concreto, em condições de reparo e reforço, submetidos ao ensaio de resistência à flexão de três pontos. Na condição de reforço, corpos de prova íntegros receberam um tratamento superficial de lixamento e posterior colagem do material compósito com um adesivo a base de epóxi. Na condição de reparo, um entalhe foi introduzido na metade do comprimento do corpo de prova sendo posteriormente preenchido com adesivo. Neste caso, também foi realizado o lixamento na superfície do corpo de prova, assim como a colagem do material compósito. Uma situação intermediária também foi estudada, consistindo apenas no preenchimento do entalhe com o adesivo. Foram utilizados os adesivos estruturais S&P 220 e NVT 201E. Quando reforçados, a resistência à flexão dos corpos de prova obteve incrementos de aproximadamente 2,59 vezes com a utilização do adesivo S&P 220 e de aproximadamente 3,14 vezes com a utilização do adesivo NVT 201E. Quando reparados, a utilização do adesivo S&P 220 conferiu um aumento cerca de 6,45 vezes em relação de controle, enquanto a utilização do adesivo NVT 201E contribuiu com incrementos de aproximadamente 6,60 vezes em relação às condições de controle. Já a introdução do adesivo no entalhe foi capaz de superar a resistência à flexão das condições de controle. Incrementos de até 23,72% foram alcançados com o adesivo S&P 220 enquanto a utilização do adesivo NVT 201E resultou em aumentos de resistência à flexão em até 52,41%.

Palavras – Chave: Concreto. Materiais compósitos. Reparo.

ABSTRACT

FERREIRA, Danilo de Souza Salgueiro. *Evaluation of the mechanical behavior of critical failure concrete beams reinforced with carbon fiber laminating composit*. 2019. 121 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e tecnologia de materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2019.

Concrete structures are very common in civil construction, because this material has several characteristics that contribute to its great acceptance. Despite this, concrete is subject to factors that can affect its service conditions and shorten its life. The use of laminated composite materials for the reinforcement or rehabilitation of these structures is an effective practice that is becoming popular thanks to advantages observed in relation to other more traditional techniques of interventions. This work was undertaken to study the mechanical behavior of prismatic concrete specimens under conditions of repair and reinforcement submitted to the three-point flexural strength test. In the reinforcing condition, intact specimens received a surface sanding treatment and subsequent bonding of the composite material with an epoxy-based adhesive. In the repair condition, a notch was introduced at half the length of the specimen being later filled with adhesive. In this case, sanding was also carried out on the surface of the specimen, as well as the bonding of the composite material. An intermediate situation was also studied, consisting only of filling the notch with the adhesive. The S&P 220 and NVT 201E structural adhesives were used. When reinforced, the flexural strength of the specimens obtained increments of approximately 2.59 times with the use of the S&P 220 adhesive and approximately 6.45 times with the use of the NVT 201E adhesive. When repaired, use of the S&P 220 adhesive gave an increase of about 6.60 times in control ratio, while the use of the NVT 201E adhesive contributed with increases of approximately 3.45 times over the control conditions. Increases of up to 23.72% were achieved with the S&P 220 adhesive while the use of the NVT 201E adhesive resulted in flexural strength increases of up to 52.41%.

Keywords: Concrete. Composite materials. Repair.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Método NSM.....	18
Figura 2 - Estrutura de concreto reforçada através da técnica EBR.....	19
Figura 3 - Acessórios esportivos construídos com materiais compósitos.....	22
Figura 4 - Sequência genérica de empilhamento em um laminado.....	23
Figura 5 - Comportamento do laminado em relação a orientação das suas fibras.....	23
Figura 6 - Estrutura química do grupo epóxi.....	25
Figura 7 - Adesivo S&P 220.....	26
Figura 8 - Tecido de fibra de carbono LT450-C10-C da Devold AMT [®]	27
Figura 9 - Esquematização da seção transversal de um material composto por camadas de fibras de carbono.....	28
Figura 10 - Processo de fabricação comum a fibras de carbono e grafite.....	29
Figura 11 - Produção dos maiores produtores de cimento no mundo.....	37
Figura 12 - Cenário nacional de comercialização de cimento entre 2015 e 2018.....	38
Figura 13 - Modos clássicos de falha.....	44
Figura 14 - Modos de ruptura prematura.....	45
Figura 15 - Representação esquemática da teoria mecânica da adesão.....	47
Figura 16 - Representação esquemática da rugosidade média (Ra).....	49
Figura 17 - Representação esquemática do parâmetro $R\Delta_a$	50
Figura 18 - Esquematização do parâmetro Rz	51
Figura 19 - Representação esquemática dos corpos de prova fabricados.....	55
Figura 20 - Dimensões padronizadas do modelo de viga e configuração do ensaio.....	56
Figura 21 - Moldagem dos corpos de prova cilíndricos.....	60
Figura 22 - Corpos de prova cilíndricos em cura úmida.....	60
Figura 23 - Moldagem dos corpos de prova prismáticos.....	60
Figura 24 - Desmoldagem dos corpos de prova prismáticos.....	61
Figura 25 - Face inferior dos corpos de prova entalhados.....	62
Figura 26 - Ferramentas para o preparo de superfície.....	63
Figura 27 - Corpos de prova após preparo preliminar.....	63
Figura 28 - Operação de lixamento.....	63
Figura 29 - Avaliação da rugosidade superficial dos corpos de prova.....	65
Figura 30 - Teste preliminar para aplicação do reforço nos corpos de prova.....	65

Figura 31 - Etapas de laminação do reforço.....	66
Figura 32 - Aplicação de vácuo na placa de reforço.....	67
Figura 33 - Operação de desmolde e corte dos reforços.....	67
Figura 34 - Reforços preparados para aplicação	67
Figura 35 - Dimensões consideradas na determinação do comprimento do laminado.....	68
Figura 36 - Etapas de aplicação do reforço.....	69
Figura 37 - Desbaste do excesso de adesivo nas laterais dos corpos de prova	70
Figura 38 - Prensa hidráulica para ensaios de compressão.....	71
Figura 39 - Execução dos ensaios de resistência à flexão.....	74
Figura 40 - Ensaio de tração do material compósito laminado de reforço.....	78
Figura 41 - Dimensões do corpo de prova e esquematização do ensaio de resistência à flexão	78
Figura 42 – Algumas etapas do procedimento de digestão ácida.....	79
Figura 43 - Perfis de rugosidade para o corpo de prova L1V3R2 antes e após o lixamento. ...	81
Figura 44 - Perfis de rugosidade para o corpo de prova L1V4R3 antes e após o lixamento. ...	82
Figura 45 - Perfis de rugosidade para o corpo de prova L2V4R5 antes e após o lixamento ...	83
Figura 46 - Perfis de rugosidade para o corpo de prova L2V4R6 antes e após o lixamento ...	84
Figura 47 - Irregularidade dimensional verificada no momento do ensaio	95
Figura 48 - Comparativo entre modos de falha.....	96
Figura 49 - Comparativo para a configuração V1	96
Figura 50 - Comparativo para a configuração V2.....	97
Figura 51 - Comparativo para a configuração V3	98
Figura 52 - Comparativo para a configuração V4.....	98
Figura 53 - Comparativo para as configurações V5 e V6.....	99
Figura 54 - Padrão de falha na configuração V1	99
Figura 55 - Padrão de falha na configuração V2.....	100
Figura 56 - Tipo de falha comum grupo L1V3	100
Figura 57 - Tipo de falha comum no grupo L1V4	101
Figura 58 – Tipo de falha comum nos grupos L2V3 e L2V4	102
Figura 59 - Falha característica para a configuração V5 colada com o S&P 220.	102
Figura 60 - Falha característica para a configuração V6 colada com o NVT 201E.....	103
Figura 61 - Padrões observados nos diagramas para a configuração V1.....	104
Figura 62 - Padrões observados nos diagramas para a configuração V2.....	105
Figura 63 - Comportamento observado nos diagramas para a configuração V3	106

Figura 64 - Comportamento observado nos diagramas para a configuração V4	107
Figura 65 - Comportamento observado nos diagramas para as configurações V5 e V6	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades de matrizes poliméricas mais utilizadas	24
Tabela 2 - Propriedades das fibras mais utilizadas como reforço	27
Tabela 3 - Propriedades Aproximadas de classes comuns de fibras de carbono.....	28
Tabela 4 - Propriedades de algumas fibras comercialmente mais utilizadas	30
Tabela 5 - Tempo de pega e resistência a compressão dos diferentes tipos de cimento.....	33
Tabela 6 - Dados técnicos relevantes relacionados a aplicação do S&P 220	53
Tabela 7 - Propriedades do S&P 220.....	53
Tabela 8 - Dados técnicos do NVT 201E.....	54
Tabela 9 - Informações técnicas sobre a cura do NVT 201E.....	54
Tabela 10 - Propriedades do NVT 201E.....	54
Tabela 11 - Informações técnicas referentes aos agregados graúdo e miúdo	57
Tabela 12 - Quantidades de materiais para o traço de referência.....	58
Tabela 13 - Quantidades de materiais para o traço dos corpos de prova prismáticos	58
Tabela 14 - Valores para o coeficiente d_2	72
Tabela 15 - Avaliação da eficiência do ensaio	73
Tabela 16 - Resistência à compressão axial para o traço de referência	80
Tabela 17 - Parâmetros de rugosidade para o corpo de prova L1V3R2	81
Tabela 18 - Parâmetros de rugosidade para o corpo de prova L1V4R3	82
Tabela 19 - Parâmetros de rugosidade para o corpo de prova L2V4R5	83
Tabela 20 - Parâmetros de rugosidade para o corpo de prova L2V4R6	83
Tabela 21 - Faixa de valores para os parâmetros de rugosidade avaliados.....	84
Tabela 22 - Propriedades em tração do material compósito laminado – Norma ASTM D 3039.	85
Tabela 23 - Propriedades em flexão do material compósito laminado – Norma ASTM D 7264.	85
Tabela 24 - Algumas propriedades do PRFC C–Laminate ®.....	86
Tabela 25 - Resultados referentes ao primeiro lote utilizando o adesivo S&P 220.	87
Tabela 26 - Resultados referentes ao segundo lote utilizando o adesivo NVT 201E.....	89
Tabela 27 - Resultados referentes ao terceiro lote com utilização de ambos adesivos.	90
Tabela 28 - Resultados da verificação de normalidade para distribuição de tensões máximas alcançadas.	92

Tabela 29 - Resultados da verificação de normalidade para os deslocamentos máximos atingidos.....	92
Tabela 30 - Coeficientes de variação estatística observados antes e após a aplicação do teste de <i>Grubbs</i> para as tensões máximas.....	93
Tabela 31 - Coeficiente de variação estatística observados antes e após a aplicação do teste de <i>Grubbs</i> para os deslocamentos.....	93

LISTA DE SIMBOLOS

E	Módulo de young ou módulo de elasticidade
ν	Coefficiente de Poisson
E_L	Módulo de Young na direção longitudinal
E_T	Módulo de Young na direção transversal
G_{LT}	Módulo de Cisalhamento
ν_{LT}	Coefficiente de Poisson na longitudinal
ν_{TL}	Coefficiente de Poisson na Transversal
MPa	Megapascals
GPa	Gigapascals
Ra	Rugosidade média
n	Número de medições discretas
Z_i	Amplitude de cada medição
E_{LE}	Comprimento efetivo avaliado
Rq	Desvio médio quadrático
p_i	Altura i-ésimo pico mais alto
v_i	Profundidade do i-ésimo pico mais profundo
e	Espessura do entalhe
b_P	Largura do prisma
d_P	Altura do prisma
S_L	Comprimento de Spam livre
L_P	Comprimento do prisma
F_{ck}	Resistência à compressão de projeto
δ_B	Massa unitária da brita 0 (δ_B)
γ_B	Massa específica da brita 0 (γ_B)
γ_m	Massa específica da areia (γ_m)
MF	Módulo de finura (MF)
S_f	Metade do comprimento de vão livre colado
U_L	Comprimento não colado
F_c	Resistência à compressão
D_C	Diâmetro do Cilíndro
F_P	Força máxima alcançada em compressão

N	Newtons
S_{ec}	Fesvio padrão do ensaio de compressão
q	Número de exemplares da amostra
A_i	Amplitude dos valores de resistência
CV_{ec}	Coefficiente de variação dentro do ensaio de compressão
f_{cm}	Resistência à compressão média
σ_R	Módulo de ruptura
P_F	Carga máxima na flexão
S	Desvio padrão do ensaio de flexão
CV_{ef}	Coefficiente de variação estatística do ensaio de flexão
x_i	Valor do parâmetro considerado na avaliação
m	Número total de corpos de prova de uma amostra
Z	Estatística Z
α	Nível de significância estatística
H_0	Hipótese nula para o teste de Grubbs
H_1	Hipótese não-nula para o teste de Grubbs
W	Estatística W
H'_0	Hipótese nula para o teste de Shapiro-Wilk
H'_1	Hipótese não-nula para o teste de Shapiro-Wilk
w_t	Largura do provete de material compósito para ensaio de tração
L_t	Comprimento do provete de material compósito para ensaio de tração
e_t	Espessura do provete de material compósito para ensaio de tração
e_b	Espessura do provete de material compósito para ensaio de flexão
L_b	Comprimento do provete de material compósito para ensaio de flexão
W_b	Largura do provete de material compósito para ensaio de flexão
S_b	Comprimento do spam do provete de material compósito para ensaio de flexão

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	17
1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
1.1	Contexto histórico	20
1.2	Materiais compósitos	21
1.2.1	Material compósito laminado	22
1.2.2	Matrizes	24
1.2.2.1	Epóxi	25
1.2.3	Fibras	26
1.2.3.1	Fibras de carbono	28
1.2.4	Polímeros reforçados com fibras	31
1.3	Concreto	32
1.3.1	Constituintes do concreto	32
1.3.1.1	Cimento portland	33
1.3.1.2	Agregados	35
1.3.1.3	Relação água/cimento	35
1.3.1.4	Aditivos	36
1.3.2	Cenário mundial do cimento	36
1.4	Atributos relacionados à aplicação	39
1.4.1	Compatibilidade entre materiais	39
1.4.2	Durabilidade	40
1.4.3	Requisito para os adesivos	40
1.4.4	Requisito para os PRF	41
1.4.5	Requisito para o concreto	42
1.5	Conceitos relacionados à técnica EBR	43
1.5.1	Modos de falha	43
1.5.1.1	Rupturas clássicas	44
1.5.1.2	Ruptura prematura	45
1.5.2	Preparo superficial	46
1.5.2.1	Teoria mecânica da aderência	47
1.5.2.2	Rugosidade superficial	48
2	MATERIAIS E MÉTODOS	52

2.1	Materiais	52
2.1.1	Adesivos	52
2.1.1.1	S&P 220.....	53
2.1.1.2	NVT E201.....	53
2.2	Métodos	54
2.2.1	Programa experimental.....	54
2.2.2	Concreto de Referência	57
2.2.3	Moldagem dos corpos de prova	59
2.2.4	Entalhe nos corpos de prova	61
2.2.5	Aplicação do reforço	62
2.2.5.1	Escolha do preparo de superfície	62
2.2.5.2	Avaliação da superfície do concreto	64
2.2.5.3	Desenvolvimento do reforço.....	65
2.2.5.4	Dimensões do reforço.....	68
2.2.6	Ensaio mecânicos.....	70
2.2.6.1	Ensaio de compressão axial	70
2.2.6.1.1	Avaliação estatística do ensaio	72
2.2.6.2	Ensaio de resistência à flexão	73
2.2.6.2.1	Análise estatística.....	74
2.2.6.3	Caracterização do material compósito de reforço	77
2.2.6.3.1	Ensaio de tração do material de reforço	77
2.2.6.3.2	Ensaio de resistência à flexão do material de reforço	78
2.2.6.3.3	Digestão ácida (percentual de fibras)	79
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
3.1	Resistência à compressão axial	80
3.2	Tratamento superficial	80
3.3	Comportamento mecânico do material de reforço	85
3.4	Comportamento em flexão	86
3.4.1	Configurações de reforço e reparo	86
3.4.2	Preenchimento do entalhe.....	90
3.5	Abordagem estatística	91
3.5.1	Verificação da normalidade dos lotes.....	91
3.5.3	Dispersão na deflexão.....	94
3.6	Análise comparativa	96

3.7	Análise do modo de falha	99
3.8	Análise dos diagramas força x deslocamento	104
	CONCLUSÃO	109
	REFERÊNCIAS	112
	ANEXO A – Valores Críticos para Z	119
	ANEXO B - Valores para os coeficientes a_{n-i+1}	120
	ANEXO C - Valores para estatística w pelo nível de significância	121

INTRODUÇÃO

A grande maioria das estruturas existentes no mundo possui um material em comum que é o concreto. Uma das formas mais utilizada, denominada concreto reforçado, tem grande aceitação no ramo da construção civil por diversos fatores: sua versatilidade em assumir diversas formas, seu valor econômico que torna sua utilização viável em muitos projetos, suas boas propriedades em compressão e sua durabilidade (KARZAD et al., 2017).

Embora sua utilização seja muito popular, o concreto não está isento de eventuais fatores que possam comprometer sua vida útil. O aumento das cargas não previsto em projetos pode prejudicar a capacidade estrutural de transferência dos esforços. As condições ambientais desfavoráveis e o próprio envelhecimento da estrutura também podem contribuir para a degradação da sua utilização em serviço. Por meio da aplicação de um reforço externo, é possível reestabelecer a capacidade de suportar cargas dos elementos estruturais de concreto (MUKHTAR; FAYSAL, 2018).

Para o caso da reabilitação ou reforço das estruturas de concreto já estabelecidas, há uma variedade de materiais disponíveis para as diversas necessidades que requerem uma recuperação estrutural. Argamassas com sílica ativa e chapas de aço coladas externamente com adesivos a base de epóxi são as soluções clássicas que podem suprir determinadas necessidades de reparo (MARQUES, 2017).

Uma opção relativamente atual é a utilização dos Polímero Reforçados com Fibras (PRF). Em relação a outros materiais mais tradicionais, a escolha dos PRF se baseia em fatores atrativos como alta resistência mecânica e rigidez, durabilidade em ambientes quimicamente agressivos, baixo peso, facilidade e rapidez de instalação (FRIGIONE; LETTIERI, 2018). Entre os PRF mais empregados, estão aqueles que utilizam fibras de aramida (PRFA), fibras de basalto (PRFB), fibras de carbono (PRFC) e fibra de vidro (PRFV) (KAURA, 2017).

Em poucas linhas, esta técnica se baseia na união tecidos, placas ou perfis de materiais compósitos por meio da utilização de um adesivo para a colagem ou inserção na superfície do elemento de concreto a ser reforçado. As possibilidades variam em relação ao tipo de material que pode ser reforçado assim como o método de reforço desejado. Por exemplo, é viável a sua utilização em concreto armado, concreto protendido, alvenarias, construção de madeiras e até mesmo em estruturas metálicas. No que tange ao reforço estrutural à flexão, os principais

métodos de instalação são mundialmente conhecidos como *Near Surface Mounted* (NSM) e *Externally Bonded Reinforcement* (EBR) (AMARASINGHE; GAMAGE, 2015).

O método de reforço NSM é uma técnica relativamente nova e vem ganhando maior atenção dos pesquisadores com o passar dos últimos anos (MUKHTAR; FAYSAL, 2018). Resumidamente, consiste em inserir um material compósito em entalhes cortados na face submetida à tração da estrutura de concreto a qual deseja-se reforçar. Esses entalhes devem ser preenchidos com o adesivo adequado e as barras de material compósito devem ser instaladas de forma cuidadosa. Nesse tipo de técnica, as barras podem apresentar diferentes tipos de seções transversais (ZHANG; YU; CHEN, 2017). Na figura 1 é possível ver o método NSM na prática.

Figura 1 - Método NSM



Fonte: ARAÚJO et al., 2017

O método mais comumente utilizado é conhecido como o método EBR ou método de reforço colado externamente. Constitui uma das formas mais práticas de intervir em estruturas de concreto, pois a invasão é mínima e a instalação é realizada de forma fácil e rápida se comparada a outras técnicas de reforço. Sua eficácia depende da ação conjunta de todo o sistema, com destaque para a durabilidade da união estabelecida entre o substrato de concreto e o material compósito que ocorre por meio de um adesivo, geralmente um adesivo epóxi (CABRAL-FONSECA et al, 2018). A figura 2 ilustra o método EBR.

Não só a técnica EBR, mas a técnica NSM também é fortemente dependente do comportamento da ligação que ocorre entre o concreto e o material compósito. Por esse motivo, independente da técnica que esteja sendo utilizada para realizar a intervenção, a falha de uma estrutura reforçada é causada na grande maioria das vezes pelo descolamento do

reforço de material compósito (BILOTTA et al., 2015). A atenção do presente estudo é voltada para o princípio ao qual se baseia a técnica EBR.

Figura 2 - Estrutura de concreto reforçada através da técnica EBR



Fonte: AYEMBA, 2017

OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo a comparação entre o desempenho de dois adesivos estruturais utilizados em situações de reforço e reparo nos corpos de prova prismáticos de concreto submetido ao ensaio de resistência à flexão de três pontos. Neste contexto, os adesivos considerados são um adesivo comercial próprio para aplicações em reparo de estruturas de concreto e um adesivo desenvolvido no Laboratório de Adesão e Aderência (LAA), geralmente utilizado para reparo de tubos e chapas metálicas.

O primeiro capítulo deste trabalho compromete-se em apresentar conceitos pertinentes às operações de reforço e reabilitação de estruturas de concreto por meio da colagem externa de materiais compósitos laminados. No segundo capítulo, são apresentadas os materiais e as metodologias adotadas para a realização deste trabalho e por fim são apresentados os resultados obtidos acompanhados de uma análise baseada na literatura disponível para o segmento em questão.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Contexto histórico

Os primeiros estudos voltados para aplicação de reforços externos em concretos datam da década de 1960 e são apresentados simultaneamente na África do Sul e França por L'Hermitte e Bresson, com a ideia principal de reforçar estruturas de concreto armado através da colagem de chapas de aço com adesivos estruturais na face do elemento submetida à tração (CZADERSKI; MEIER, 2018).

Na década de 1970, os reforços externos aplicados em pontes da autoestrada M5, na Inglaterra, serviram como base por vários anos de pesquisa e desenvolvimento para uma parceria entre o Laboratório de Pesquisa de Transporte (TRL), o Departamento de transportes da Inglaterra e alguns fabricantes de adesivos. No que se diz respeito aos programas experimentais, várias instituições acadêmicas do Reino Unido estiveram envolvidas com investigações teóricas e avaliação de adesivos em longos testes realizados em vigas reforçadas (HOLLAWAY; LEEMING, 1999).

Simultaneamente, os pesquisadores dos Laboratórios Federais Suíços de Ciência e Tecnologia de Materiais (EMPA) desenvolviam pesquisas buscando uma melhor compreensão para o comportamento das chapas metálicas coladas com adesivos epóxi em estruturas de concreto. A substituição dos materiais metálicos por compósitos reforçados com fibras surgiu na década de 1980, idealizada pelos pesquisadores do EMPA (CZADERSKI; MEIER, 2018).

Por muitos anos, engenheiros civis e estruturais colocaram em prática algumas técnicas de reparo ou reforço com materiais compósitos mesmo sem a existência de normas oficiais de construção que contemplavam a utilização destes materiais.

As décadas de 1980 e 1990 foram fundamentais para o desenvolvimento dos primeiros estudos na área de reforço e reabilitação de estruturas civis com materiais compósitos ao redor do mundo (muitos países da Europa e outros países como Estados Unidos, Canadá e Japão). Desta forma, foi necessário incorporar os materiais compósitos às normas existentes, assim como o desenvolvimento de normas específicas que contemplassem fundamentos, métodos e design relacionados à nova técnica.

Entre os anos de 1990 e 2000 muitas revisões e o desenvolvimentos de novos estudos foram relatados pelo Instituto Internacional de Polímeros Reforçados com Fibras na Construção (IIFC), estabelecido em Hong Kong. A Sociedade Americana de Engenheiros Civis (ASCE) possui uma vasta coleção de artigos sobre o uso dos materiais compósitos na construção civil. Neste âmbito, foi fundado o *Journal of Composites for Construction*, que se tornou um das mais completas fontes para a pesquisa voltada para a aplicação dos compósitos na construção civil (BANK, 2006).

Algumas instituições como o Instituto Americano do Concreto (ACI), Federação Internacional do Concreto (FIB), Sociedade Japonesa de Engenheiros Civis (JSCE) são exemplos que continuam a buscar soluções para aprimorar e desenvolver novas técnicas no que corresponde à intervenção de estruturas de concreto com materiais compósitos, elaborando importantes documentos relevantes na área (CARVALHO, 2011).

1.2 Materiais compósitos

Na segunda metade do século XX, foi introduzido o conceito dos materiais compósitos como uma classe distinta de materiais. Essa classe seria responsável por definir aqueles materiais devidamente projetados para atender certas necessidades que materiais metálicos, cerâmicos e poliméricos separadamente não poderiam atender. De forma ampla, o material compósito pode ser entendido como um material multifásico onde cada fase tem influência significativa no comportamento geral do elemento final (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2012).

Segundo Agarwal, Broutman e Chandrashekhara (2006), os materiais compósitos são aqueles constituídos por uma ou mais de uma fase descontínua inseridos em uma fase contínua. A fase descontínua, conhecida como fibra, apresenta maior rigidez e resistência mecânica que a fase contínua denominada matriz.

Uma das principais característica dos materiais compósitos que os diferencia dos materiais convencionais está relacionada ao seu comportamento mecânico. Considera-se geralmente que os materiais comuns de engenharia têm sua constituição homogênea e suas propriedades mecânicas são as mesmas em todas as direções, os caracterizando como materiais isotrópicos. Apenas duas constantes elásticas são necessárias: o módulo de Young (E) e o coeficiente de poisson (ν).

Por ser constituído por duas ou mais fases, os materiais compósitos laminados são conhecidamente heterogêneos e suas propriedades mecânicas são distintas nas três direções mutuamente perpendiculares, o que lhes confere características ortotrópicas. Assim sendo, é necessário o conhecimento de pelo menos cinco constantes elásticas do material para definir seu comportamento mecânico (JONES, 1998). Essas constantes elásticas são os módulos de Young nas direções longitudinal (E_L) e transversal (E_T), o módulo de Cisalhamento (G_{LT}) e os coeficientes de Poisson na longitudinal (ν_{LT}) e na transversal (ν_{TL}) (GERDEEN; RORRER, 2012).

Em relação às outras classes de materiais mais comumente utilizados na engenharia, suas principais vantagens estão relacionadas ao desempenho estrutural. A relação entre máxima resistência mecânica e densidade, denominada resistência específica, é alta, assim como sua alta rigidez específica, que é a relação entre módulo de elasticidade e densidade. Possui alta vida útil em fadiga e pode ser extremamente resistente em ambientes quimicamente agressivos.

Figura 3 - Acessórios esportivos construídos com materiais compósitos



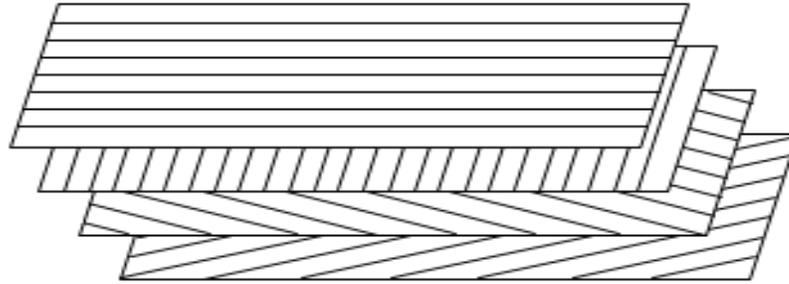
Fonte: CHAWLA, 2012.

1.2.1 Material compósito laminado

A definição de laminado segundo Reddy e Miravete (1995) refere-se a um conjunto de camadas, denominadas lâminas, empilhadas de forma que sejam alcançadas as propriedades mecânicas e físicas desejáveis no material acabado. Essas camadas podem conter fibras alinhadas de forma unidirecional ou multidirecional e a maneira como são ordenadas é responsável por conferir diferentes propriedades a cada tipo de laminado. Há também a

possibilidade de um laminado ser fabricado com camadas compostas por fibras de diferentes materiais. A figura 4 é uma representação genérica de uma sequência de empilhamento de um material compósito laminado.

Figura 4 - Sequência genérica de empilhamento em um laminado

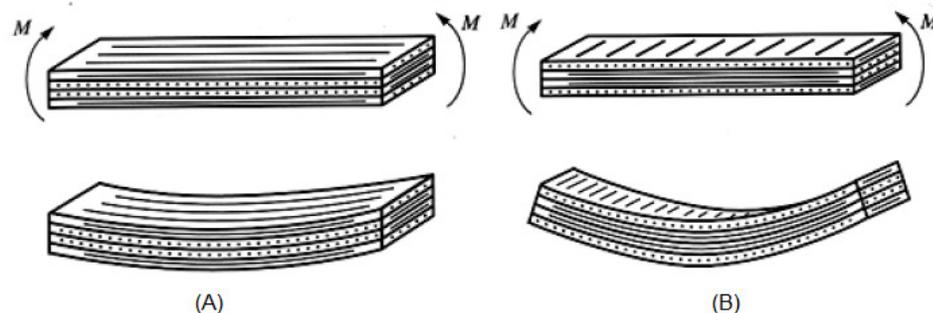


Fonte: REDDY; MIRAVETE, 1995.

Para que essas camadas tornem-se um material compósito laminado, é necessário que todas sejam impregnadas com uma resina de laminação, cuidadosamente posicionadas umas sobre as outras em processos de fabricação que variam entre laminação manual, *bag molding* e moldagem por compressão. A fabricação de laminados também é possível a partir do enrolamento filamentar.

A figura 5 mostra o comportamento de dois materiais laminados com configurações distintas quando submetidos a um mesmo momento fletor. Na figura 5 (A) a orientação das laminas é $[0/90]$ enquanto na figura 5 (B) a orientação das laminas é $[90/0]$.

Figura 5 - Comportamento do laminado em relação a orientação das suas fibras



Fonte: ROHEM, 2010.

O material laminado na figura 5 (A) possui maior resistência ao momento fletor que o material laminado na figura 5 (B). Isso ocorre graças ao posicionamento mais externo das

fibras orientadas a 0°, que são mais resistentes ao momento fletor que as fibras externas orientadas a 90° (ROHEM, 2010).

1.2.2 Matrizes

Nos materiais compósitos reforçados com fibras, a função principal das matrizes é conferir à estrutura do compósito uma distribuição de cargas cisalhantes de maneira uniforme quando solicitado em serviço, além de manter as fibras juntas a fim de garantir uniformidade dimensional do material. Geralmente possuem menor resistência mecânica que a fase fibra, mas são responsáveis também por protege-las contra abrasão, danos mecânicos e degradação química ocasionada por ambientes agressivos (JABBAR, 2017).

A matriz desempenha um papel fundamental na prevenção à flambagem das fibras quando submetidas a esforços compressivos, tendo em parte uma influência considerável na resistência à compressão. Outro fator que deve ser levado em consideração na escolha do material para a matriz é a resistência aos esforços cisalhantes. Quando submetidos à flexão, a resistência ao cisalhamento interlaminar é um critério importante a ser considerado, porém quando há esforços de torção, a resistência ao cisalhamento no plano é o fator de maior importância (MALLICK, 2008).

Tanto os materiais poliméricos, metálicos e cerâmicos podem ser utilizados como matrizes de materiais compósitos. No que se diz respeito aos polímeros, tanto os materiais termoplásticos quanto os materiais termofixos são comumente utilizados como matrizes. Dentre estes materiais mais comuns para os compósitos de fibras contínuas, as resinas poliéster e epóxi são as mais populares no meio. A tabela 1 apresenta algumas propriedades relevantes referente à dois diferentes tipos de matrizes

Tabela 1 - Propriedades de matrizes poliméricas mais utilizadas

Propriedade	Epóxi	Poliéster
Massa específica (g/cm ³)	1,2 ~ 1,3	1,1 ~ 1,4
Resistência à tração (MPa)	50 ~ 125	30 ~ 100
Módulo de elasticidade (GPa)	2,5 ~ 4,0	2,0 ~ 4,0
Coefficiente de Poisson	0,2 ~ 0,3	0,2 ~ 0,3
Coefficiente de expansão térmica (10 ⁻⁶ /°C)	50 ~ 100	50 ~ 100
Retração de cura (%)	1 ~ 5	5 ~ 12
Temperatura máxima em serviço (°C)	150	80

Fonte: CHAWLA, 2012.

No caso dos compósitos de matriz metálica, a matriz considerada é um metal ou uma liga contínua que possui um reforço em forma de fibras. Uma variedade de ligas podem ser usadas, como por exemplo ligas de alumínio, ligas de titânio, ligas de magnésio, cobre entre outros. Existem três tipos de materiais compósitos de matriz metálicas (MMC) e são classificados MMCs reforçados por partículas, MMCs reforçados por whiskers ou fibras curtas e finalmente MMCs reforçados por fibras longas.

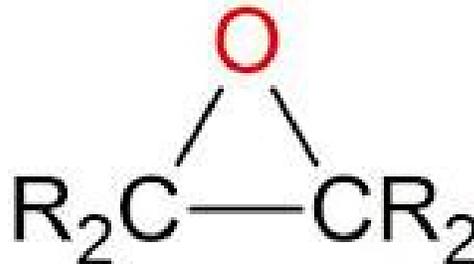
Quando utiliza-se matrizes cerâmicas em um material compósito reforçado com fibras, busca-se o aumento da tenacidade à fratura, com exceção aos compósitos com matrizes vítreas. A base das matrizes cerâmicas é constituída por carbeto de silício (SiC), nitreto de silício (Si₃N₄), cerâmicas vítreas, outras cerâmicas à base de sílica, enquanto a alumina (Al₂O₃) e a mulita (Al₆Si₂O₁₃) tem um futuro promissor nessa área (CHAWLA, 2012).

Como neste estudo as matrizes utilizadas na laminação dos reforços e colagem nos corpos de prova são resinas epóxi, a revisão bibliográfica contemplará apenas essa classe de matrizes termofixas.

1.2.2.1 Epóxi

As resinas epóxi constituem a classe de materiais poliméricos termofixos mais utilizadas como matrizes na obtenção de compósitos reforçados com fibras. Um epóxi é um polímero que contém um grupo químico composto por um átomo de oxigênio e dois átomos de carbono, como pode ser visto na figura 6:

Figura 6 - Estrutura química do grupo epóxi

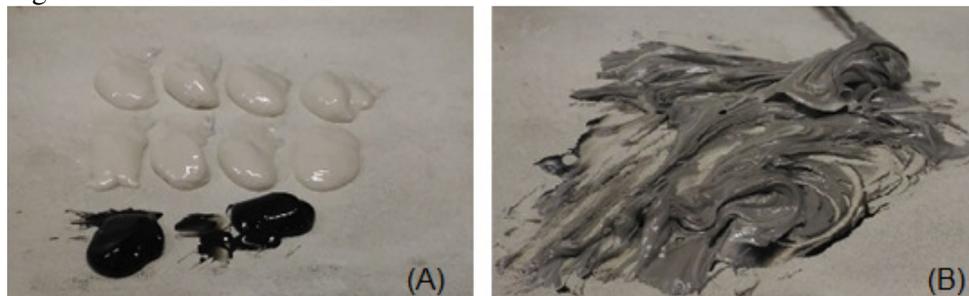


Fonte: MORGAN, 1986.

Os sistemas de resinas epóxi, assim como os de poliéster, podem sofrer cura em temperatura ambiente, dependendo do agente de cura adicionado (AGARWAL; BROUTMAN; CHANDRASHEKHARA, 2006). Os agentes de cura são compostos amino ou ácidos orgânicos e as reticulações (*cross-linking*) são alcançadas quando há a introdução de compostos químicos como epóxi que reagem entre as cadeias adjacentes. A quantidade de reticulações é determinada a partir da quantidade de agente de cura que é adicionado. Rigidez, resistência mecânica e temperatura de transição vítrea são algumas propriedades que são fortemente alteradas pelo aumento das reticulações, enquanto dureza é diminuída (MORGAN, 1986).

Com relação aos adesivos estruturais, os que atingem cura em temperaturas relativamente baixas, como as resinas epóxi, vem sendo bastante difundindo em aplicações da construção civil, principalmente no que está relacionado ao reparo ou aumento de carga pela colagem de PRF. Após a mistura da resina com o agente de cura, deve ser esperado um tempo até que a cura esteja completa de forma que seja alcançada a máxima resistência de união suficiente para que a transferência de cargas se dê de forma adequada (MICHELS et al., 2016). A figura 7 mostra um tipo de adesivo especialmente desenvolvida para colagem de reforço de materiais compósitos em substrato de concreto.

Figura 7 - Adesivo S&P 220.



Legenda: (A) – Adesivo epóxi e agente de cura separados; (B) – Adesivo misturado para aplicação.
Fonte: O autor, 2019.

1.2.3 Fibras

As fibras são conhecidamente a fase de reforço mais comum que constitui os materiais compósitos. Uma grande variedade de fibras pode ser encontrada em diversas configurações,

e cada uma delas possui propriedades como resistência mecânica, rigidez, densidade relativamente baixa, entre outras (DANIEL; ISHAI, 2006).

Nos compósitos de matrizes metálicas, os tipos de fibras mais comumente utilizadas são o alumínio, cobre, ferro, níquel, e titânio, enquanto que nos compósitos de matrizes orgânicas o vidro, boro, grafite, aramida e o carbono são os materiais dos quais as fibras são preferencialmente fabricadas. Algumas propriedades são apresentadas na tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades das fibras mais utilizadas como reforço

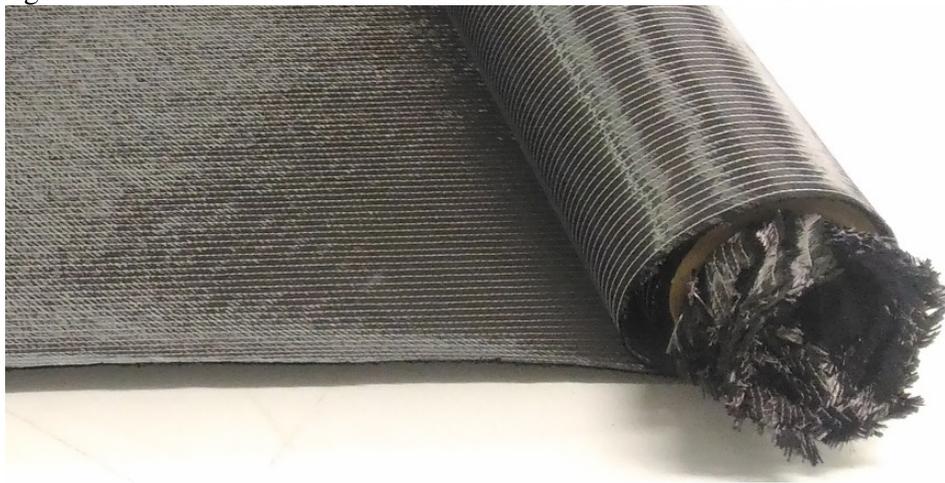
Propriedade	Vidro	Aramida	Boro	Carbono
Diâmetro típico (μm)	10	11	140	7
Densidade (g/cm^3)	2,54	1,45	2,70	1,76
Módulo de Elasticidade (GPa)	72	131	393	231
Resistência à tração (GPa)	3,45	3,62	3,10	3,65
Deformação na ruptura (%)	4,80	2,80	0,79	1,40
Coefficiente de expansão térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	5	59	5	7

Fonte: MALLICK, 2008.

As fibras são disponibilizadas nas mais variadas formas, pois há grande influência da sua configuração nas propriedades finais do material compósito. As formas disponibilizadas variam de filamentos, mechas, tecidos, *prepregs*, pré-formas e *whiskers*.

Os tecidos, por exemplo, geralmente são fabricados em um processo de tecelagem onde as fibras são dispostas alinhadas em uma única direção, geralmente orientadas a 0° , 45° ou 90° em relação ao equipamento utilizado (STRONG, 2008). A figura 8 apresenta a manta de fibra de carbono utilizada para fabricar os reforços no presente estudo.

Figura 8 - Tecido de fibra de carbono LT450-C10-C da Devold AMT[®].



Fonte: O autor, 2019.

Como a utilização das fibras no presente estudo resume-se às fibras de carbono, apenas está será abordada adiante.

1.2.3.1 Fibras de carbono

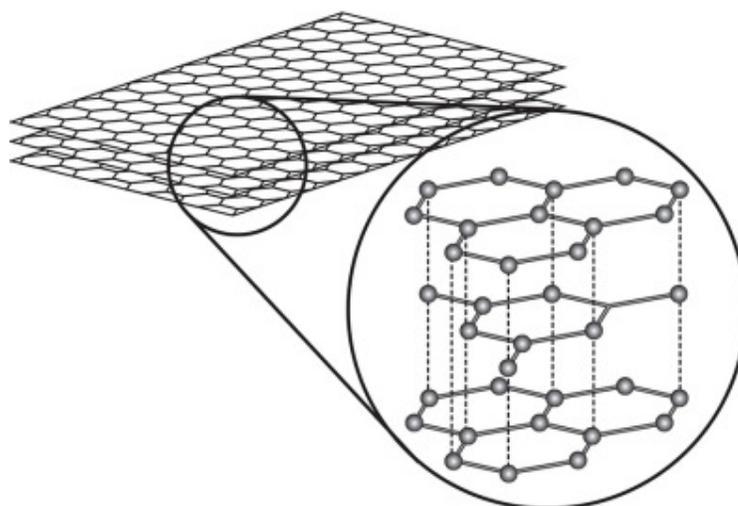
As fibras de carbono são sólidos semicristalinos orgânicos organizados em um nível atômico por arranjos bidimensionais planos de átomos de carbono, como pode ser visto na figura 9. Essas fibras podem ser produzidas em diferentes níveis de acordo com seu módulo de elasticidade, sendo denominadas como módulo padrão (SM), módulo intermediário (IM), alta resistência (HS) e ultra alto módulo (UHM) (BANK, 2006). Algumas propriedades são listadas na tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades Aproximadas de classes comuns de fibras de carbono.

Propriedade	SM	HS	UHM
Densidade (g/cm ³)	1,7	1,8	2,1
Módulo de Elasticidade (GPa)	250	250	800
Resistência à tração (GPa)	3,70	4,80	2,40
Alongamento máximo (%)	1,2	1,4	0,2

Fonte: BANK, 2006.

Figura 9 - Esquemática da seção transversal de um material composto por camadas de fibras de carbono



Fonte: DAMBROT, 2016.

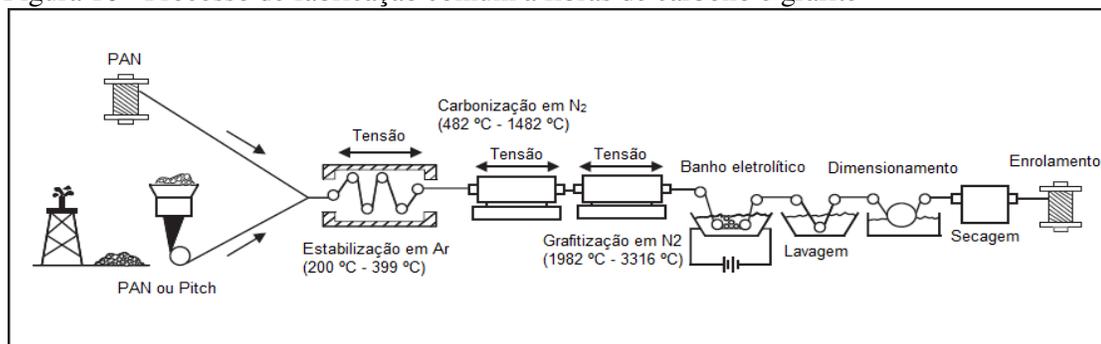
Sabe-se que o carbono pode ser encontrado em uma variedade de estruturas cristalinas, porém a que é de interesse nesta ocasião é a forma mostrada na figura 9, que é denominada estrutura grafítica, onde os átomos de carbono estão dispostos em camadas hexagonais. A forma grafítica do carbono é altamente anisotrópica e possui um alto empacotamento das camadas de planos.

O alto módulo de elasticidade é resultado das fortes ligações entre os átomos de carbono no plano da camada, enquanto que na direção das camadas vizinhas, há a predominância de fracas ligações de Van der Waals, resultando em um módulo com magnitude inferior nessa direção. A finalidade de muitos métodos de obtenção de fibras de carbono visa atingir um alto grau de orientação preferencial dos planos hexagonais na direção ao longo do eixo das fibras (CHAWLA, 2012).

Os métodos de obtenção mais comuns são aqueles que fazem a utilização de fibras orgânicas precursoras como poliacrilonitrila (PAN), pitch de petróleo e o raioim, sendo este último agora em menor escala. Em relação a outros materiais, os que foram citados possuem alta concentração relativa de carbono de forma que podem ser convertidos à forma de grafite.

Para fibras com módulo de elasticidade padrão, o método que utiliza a PAN é o que apresenta melhor custo-benefício, já o método que utiliza o pitch é mais adequado para fibras com altos módulos e menor condutividade térmica. Apesar de ser a técnica mais antiga de obtenção de fibras de carbono, o raioim é solicitado sob encomenda a consumidores que adotaram sua utilização de longa data (STRONG, 2008). A figura 10 ilustra de forma prática os métodos de obtenção das fibras de carbono a partir da PAN e do pitch.

Figura 10 - Processo de fabricação comum a fibras de carbono e grafite



Fonte: STRONG, 2008.

De forma sucinta, a obtenção dessas fibras se dá por meio de um processo onde a fibra precursora é fundida, transformada em filamentos finos e tracionada nos equipamentos de

tecagem em atmosfera com ar na faixa temperaturas que variam de 200 °C a 400 °C. Após isso, as fibras são carbonizadas por pirólise em temperaturas superiores a 800 °C em atmosfera inerte de nitrogênio. O processo denominado grafitação é opcional e consiste no aumento da cristalinidade para a produção de fibras de ultra-alta-rigidez que alcançam módulos de elasticidade superiores aos 410 GPa (DANIEL; ISHAI, 2006).

Após a grafitação, as fibras passam por um banho eletrolítico onde acontece a remoção de detritos provenientes dos processos anteriores. Em seguida, a solução eletrolítica também é removida em uma lavagem e um tratamento superficial introduz um acabamento polimérico, normalmente em epóxi, para aprimorar a compatibilidade das fibras com as mais variadas resinas (STRONG, 2008). Por fim são realizadas etapas de dimensionamento e secagem antes do enrolamento das fibras, para posterior utilização na fabricação de materiais compósitos (DANIEL; ISHAI, 2006).

Comparado com outros materiais conhecidos utilizados como fibras, o carbono é o que possui melhores propriedades quanto à resistência à tração e peso, baixo coeficiente de expansão térmica linear, alta resistência à fadiga e condutividade térmica. Quando expostas suas desvantagens, o seu custo é o principal fator que por ventura pode excluí-lo de aplicações mais tradicionais, além da baixa resistência ao impacto e alta condutividade elétrica, que pode caracterizar um fator negativo em respeito a projetos de segurança de determinados equipamentos (MALLICK, 2008). A tabela 4 apresenta propriedades de algumas fibras mais utilizadas.

Tabela 4 - Propriedades de algumas fibras comercialmente mais utilizadas

Fibra	Densidade (g/cm ³)	Módulo elástico (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação na ruptura (%)
Vidro (E)	2,54	72	3,45	4,80
Carbono (PAN)	1,76	231	3,65	1,40
Carbono (Pitch)	2,00	380	1,90	0,50
Kevlar 49f	1,45	131	3,62	2,80
Boro	2,70	393	3,10	0,70
SiC (Monofilamento)	3,08	400	3,44	0,86
SiC (Multifilamento)	2,55	196	2,75	1,40
PE de Cadeia Prolongada	0,97	117	2,59	3,50
Al ₂ O ₃	3,90	380	3,10	
Al ₂ O ₃ -SiO ₂	2,73	103	1,03	

Fonte: MALLICK, 2008.

1.2.4 Polímeros reforçados com fibras

São materiais compósitos desenvolvidos com o objetivo de suprir as necessidades da indústria aeroespacial por volta da década de 1940, sendo difundidos em outras áreas do conhecimento humano nas décadas seguintes. Em engenharia de estruturas, são encontradas referências que datam da primeira metade da década de 1950, porém sua utilização na prática se deu a partir da segunda metade da década de 1980, com maior expressividade no início na década de 1990 (CARVALHO; 2011).

A utilização dos PRF por meio da colagem externa no fortalecimento à flexão ou reparo de estruturas de concreto se tornou uma prática amplamente aceita nas três últimas décadas (WAN; JIANG; WU, 2018) devido às suas características superiores a outros materiais.

Comparado às chapas de metal, que constituem uma metodologia clássica de reforços externos, as placas de PRF apresentam inúmeras vantagens. Para uma mesma capacidade de reforço, as placas de PRF são mais leves e mais finas, fato este que contribui na eliminação de suportes temporários para que a resina adquira as propriedades de adesão necessárias. Além disso, não há adição de carga morta nas estruturas de concreto. A sua instalação requer menos tempo e a adequação a ambientes confinados o torna um material versátil. Não menos importante, a resistência à corrosão dos PRF é altíssima em relação aos metais, o que elimina a necessidade de substituição dos componentes do sistema (KAURA; 2017).

Independente do custo unitário de um sistema de PRF ser maior que o custo de um sistema de chapas metálicas, há que se considerar que os sistemas que utilizam PRF são mais eficientes, pois utilizam menor quantidade de mão de obra e são rapidamente instalados, podendo assim ter um custo benefício atrativo.

É conhecido da literatura que os polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC) são os mais eficientes no aumento da resistência à flexão de vigas de concreto do que os polímeros reforçados com fibras de vidro (PRFV) e as chapas metálicas, por exemplo (TARIGAN; PATRA; SITORUS, 2018).

1.3 Concreto

Em linhas gerais, o termo concreto pode estar associado a um material compósito que consiste de agregados de partículas unidos uns aos outros por meio de uma pasta proveniente da reação entre o cimento e a água (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2012).

É o material da construção civil mais utilizado ao redor do mundo, visto que é comumente encontrado nas fundações de casas, estruturas de pontes, prédios, torres de arrefecimento e até mesmo em barragens de usinas hidrelétricas (PEDROSO, 2009).

Se comparado a outros materiais utilizados, o concreto é aquele que apresenta uma grande parcela de vantagens responsáveis por fazê-lo tão popular nos canteiros de obra e demais áreas de construção civil. O fator econômico é um atrativo, visto que seu volume é composto em maior parte por agregados, como areia e brita, que são componentes de baixo custo com alta disponibilidade de mercado.

É particularmente resistente a ambientes químicos agressivos graças às suas propriedades físico-químicas, além de apresentarem elevada resistência à agressões físicas do ambiente como choque e vibrações devido a sua alta resistência mecânica. Não menos importante, a sua adaptabilidade à forma desejada da construção também o torna um material versátil (FUSCO, 2008).

1.3.1 Constituintes do concreto

A versatilidade do concreto não está associada apenas às formas que este material pode assumir, mas também à capacidade de ser produzido com vários tipos constituintes. Diversas classes de cimento disponíveis podem ser utilizados de acordo com a necessidade da construção. Além dos agregados mais comuns como pedra britada e areia, podem ser incorporados aditivos, polímeros, fibras e até mesmo concreto reciclado (NEVILLE; BROOKS, 2010).

1.3.1.1 Cimento Portland

É o cimento consumido em maior quantidade no mundo sendo o mais amplamente empregado nas formulações de concreto (PEDROSO, 2009). Trata-se de um material que caracteriza o maior valor agregado dentre todos os constituintes do concreto. Como acontece com uma diversidade de materiais, o cimento também possui diversas composições que influenciam em suas características e desempenho (RECENA, 2015).

Tabela 5 - Tempo de pega e resistência a compressão dos diferentes tipos de cimento

Tipo de cimento	Classe	Tempos de pega		Resistência à compressão (MPa)			
		Início (h)	Fim (h)	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
CP I	25				≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0
	32	≥ 1	≤ 10	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0
	40				≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0
CP II	25				≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0
	32	≥ 1	≤ 10	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0
	40				≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0
CP III	25				≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0
	32	≥ 1	≤ 12	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0
	40				≥ 12,0	≥ 23,0	≥ 40,0
CP IV	25				≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0
	32	≥ 1	≤ 12	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0
CP V ARI		≥ 1	≤ 10	≥ 14,0	≥ 24,0	≥ 34,0	-

Fonte: ABCP, 2002.

Basicamente são compostos de Cal (CaO), sílica (SiO₂), alumina (Al₂O₃) e óxido de ferro (Fe₂O₃), aglutinados por sinterização, ou seja, são aquecidos até que sua fusão atinja um estado inicial e posteriormente são fragmentados por moagem até que se alcance a finura adequada. Quando há variação de sua composição, ela acontece por meio de adições para que sejam atendidas necessidades usuais ou específicas de cada tipo de aplicação (FUSCO, 2008).

As adições são matérias-primas incorporadas ao cimento na fase da moagem para que haja variação de suas propriedades de acordo com as necessidades de uso. Entre as adições, estão o gesso, escórias de alto forno, materiais pozolânicos, materiais carbonáticos e outros (ABCP, 2002). Segundo Pedroso (2009) o mercado Brasileiro voltado para construção civil disponibiliza um total de oito tipos de cimento:

- Cimento Portland Comum (CP I), que não possui adições exceto o gesso e é regulamentado pela norma ABNT NBR 5732. Sugerido para aplicações que não são exigidas propriedades especiais do cimento;

- Cimento Portland Composto (CP II), onde as adições possíveis são as escórias de alto forno, pozzolana ou fíler calcário em pequenas proporções, sendo regulamentado pela norma ABNT NBR 11578. Atende grande parte das necessidades de aplicações usuais;
- Cimento Portland de Alto Forno (CP III), que pode conter escória de alto forno em proporções que variam entre 35 a 70% e é regulamentado pela norma ABNT NBR 5753. Sugerido para aplicações onde seja necessário concreto-massa;
- Cimento Portland Pozolânico (CP IV), que possui pozzolana em quantidade que varia de 15 a 50% em sua composição. É regulamentado pela norma ABNT NBR 5736 e é recomendado para obras situadas em ambientes sujeitos a ação da umidade;
- Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V ARI), que possui uma dosagem adequada de calcário e argila no momento da moagem. É regulamentado pela norma ABNT NBR 5733 e sua utilização é recomendada em aplicações onde seja necessária que uma alta resistência seja alcançada nos primeiros dias da cura.
- Cimento Portland Resistente a Sulfato (RS) que é regulamento pela norma ABNT NBR 5737 e é indicado para ambientes quimicamente agressivos como redes de esgoto e áreas litorâneas.
- Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC) que é regulamentado pela norma ABNT NBR 13116 é indicado para grandes obras com altas taxas de concretagem;
- Cimento Portland Branco (CPB) obtido a partir de matérias-primas com baixo teor de óxidos de ferro e manganês, é regido pela norma ABNT 12989, sendo indicado para obras de projetos arquitetônicos e para aplicações não-estruturais.

1.3.1.2 Agregados

Em média, a relação de ocupação do volume da massa de concreto pelos agregados está em torno dos 75%. A partir disso, é possível considerar que a qualidade dos agregados tem influência tanto no desempenho estrutural do concreto como em sua durabilidade. Apesar do seu baixo custo ser um grande atrativo, deve-se deixar claro que este não é o único motivo pela sua utilização. Os agregados garantem melhor estabilidade dimensional ao concreto do que em relação à pasta hidratada sem a incorporação de nenhum tipo de agregado (NEVILLE; BROOKS, 2010).

Baseado na composição da sua distribuição granulométrica, os agregados são classificados como agregado graúdo e agregado miúdo. Geralmente o agregado miúdo é proveniente de areia natural ou artificial, enquanto o agregado graúdo tem origem no britamento de rochas estáveis (FUSCO, 2008).

As propriedades físicas do agregado como densidade, distribuição de poros e resistência mecânica têm grande influência na massa unitária e no módulo de elasticidade do concreto. Outros fatores que também estão relacionados com o desempenho em serviço do concreto são a morfologia e o tamanho dos agregados. Em relação à morfologia e o tamanho, quanto mais achatado e alongado for o agregado, maior será o efeito negativo que este tem na estrutura de concreto, por causar a deterioração das suas propriedades mecânicas (MEHTA; MONTEIRO, 2005).

1.3.1.3 Relação água/cimento

Esta relação define as massas de cimento e água que serão incorporados ao estado fresco do concreto (RODRIGUES, 1983). Desempenha um papel importantíssimo em materiais que utilizam cimento como as argamassas e o concreto. É proposto pela Lei de Abrams que a resistência à compressão do concreto a um determinado período de cura varia de forma inversa com a relação água/cimento (HAACH; VASCONCELOS; LOURENÇO, 2011).

Deve levar-se em consideração que a relação água/cimento em determinados graus de hidratação da pasta de cimento também é responsável pela determinação do grau de

porosidade que o concreto exibirá quando em estado endurecido (NEVILLE; BROOKS, 2010)

1.3.1.4 Aditivos

São substâncias adicionadas durante a preparação do concreto em uma proporção não superior a 5% da massa de cimento, responsável muitas vezes em modificar as propriedades do concreto seja no estado fresco ou mesmo quando um sólido endurecido (ABNT, 2011).

A composição química dos aditivos tem uma variação ampla, e muitos desempenham mais do que uma função quando introduzidos na mistura do concreto. Sais e polímeros solúveis, por exemplo, podem ser adicionados à mistura fresca do concreto para que seja possível aumentar a trabalhabilidade do concreto sem que seja necessária a alteração da quantidade de água. Esses aditivos são denominados plastificantes ou redutores de água. Outros tipos estão disponíveis, como os retardantes ou aceleradores de cura e incorporadores de ar (MEHTA; MONTEIRO, 2005).

Os aditivos polifuncionais, por exemplo, foram projetados a partir de misturas das estruturas químicas de aditivos plastificantes e superplastificantes com objetivo de conferir ao concreto em estado fresco um maior tempo de trabalhabilidade. Dessa forma, foi possível que o concreto formulado nas centrais dosadoras chegasse aos canteiros de obra com uma plasticidade adequada a fim de evitar que fosse necessário o retrabalho de dosagem no local de aplicação (CORRÊA, 2010).

1.3.2 Cenário mundial do cimento

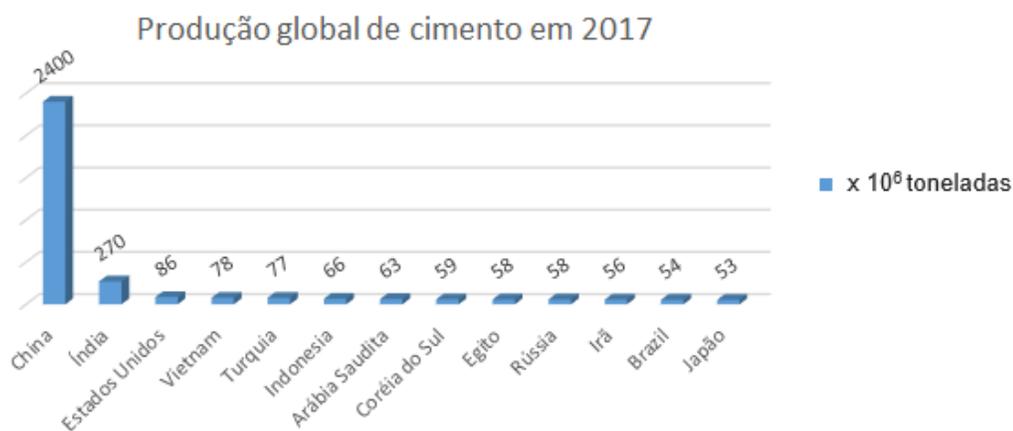
Nos anos de 2016 e 2017 a produção de cimento nos Estados Unidos teve ligeiro aumento em relação aos anos anteriores. Foram produzidos entre 82,9 e 83,5 milhões de toneladas de cimento Portland respectivamente, sendo estes resultado abaixo do ano de 2005, onde o país atingiu um recorde histórico de 99 milhões de toneladas. Dentre os principais motivos, pode se destacar a queda anual em construções enfrentadas pelo setor público, aumento do tempo ocioso de equipamentos de produção devido a atualizações para a

introdução de novas tecnologias na cadeia produtiva e interrupção das atividades de construção causadas incidência de furacões em estados produtores como o Texas e a Flórida (VAN OSS, 2018).

Em outro patamar de produção, a China vem se tornando um utilizador insuperável de concreto. Só no ano de 2017 o país asiático foi responsável por uma produção de cimento maior que o resto do mundo inteiro. Cerca de 2,4 bilhões de toneladas foram produzidas enquanto o resto do mundo teve uma produção total de 1,7 bilhões de toneladas. A Índia, que é o país que mais se aproxima da China neste ranking, contabilizou cerca de 270 milhões de toneladas (MCCARTHY, 2018). Analistas ainda acreditam que o mercado Asiático deve apresentar uma melhora no ano de 2019, visto que muitos países próximos como Japão, Filipinas, Vietnã e Indonésia vem experimentando aumento no consumo de cimento pra utilização doméstica. A figura 11 apresenta esses resultados consolidados de forma mais didática.

Segundo dados disponibilizados pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), o Brasil vem na contramão deste cenário. O mercado nacional experimenta uma retração acumulada de 24,2% nas vendas de cimento durante o triênio de 2015/2017. Cerca de 53,8 milhões de toneladas foram vendidas no ano de 2017, registrando uma queda de 6,4% em relação ao ano anterior (LOPES, 2018).

Figura 11 - Produção dos maiores produtores de cimento no mundo



Fonte: MCCARTHY, 2018.

Projeções apontavam uma reação do mercado no ano de 2018, porém em setembro o setor amargou mais uma queda na comercialização deste insumo. Cerca de 5,4% em relação

ao mês anterior e uma perspectiva de queda acumulada de 2,2% em relação ao ano anterior. De acordo com Camillo Penna, presidente do SNIC, a lentidão do reestabelecimento econômico do país e a greve dos caminhoneiros ocorrida em maio 2018 são os principais fatores que contribuíram para menor comercialização do cimento. Neste último ocorrido, cerca de 900 mil toneladas de cimento não foram entregues em seus respectivos postos de venda (ALERIGI JUNIOR, 2018).

O ano de 2018 foi o quarto ano consecutivo de retração do mercado, sendo o total acumulado 1,2% menor que o ano de 2017 o que contabiliza cerca de 52,7 milhões de toneladas comercializadas. Para o ano de 2019, projeções do SNIC apontam uma elevação de 3% no que se diz respeito a comercialização do cimento. A esperança da retomada da economia e a lei sancionada pelo governo no final de 2018 a respeito do distrato de imóveis, onde eleva a multa para quem desiste da compra do imóvel ainda na planta são os principais pontos de impacto positivo para alavancar novamente a comercialização do insumo no país (MELLO, 2019).

Figura 12 - Cenário nacional de comercialização de cimento entre 2015 e 2018



Fonte: MELLO, 2019.

1.4 Atributos relacionados à aplicação

1.4.1 Compatibilidade entre materiais

A ideia inicial que dava base para as questões envolvendo reparos de estruturas levava em consideração que o material utilizado para a fabricação do reparo deveria possuir similaridade com o substrato a ser reparado. Como exemplo próximo à realidade aqui explorada, uma estrutura feita de material de origem cimentícia deveria apenas ser reparado com materiais cimentícios. A evolução das práticas de reparo levou a adoção do conceito da compatibilidade. (CZARNECKI et al., 1999).

Neste contexto, a compatibilidade pode ser entendida como um equilíbrio existente das propriedades químicas, físicas, eletroquímicas e dimensionais que garantam aos materiais de reparo e do substrato a capacidade de suportar tensões e deformações provenientes de fatores intrínsecos e externos que possam vir a comprometer o funcionamento da estrutura durante um determinado período de tempo (MORGAN, 1996).

A compatibilidade dimensional, por exemplo, está relacionada com o controle de alteração volumétrica. As mudanças no volume da estrutura reforçada devem ser tratadas com certa precaução no intuito de evitar a formação de trincas indesejadas na interface do reparo. Quando há alteração do volume de um material reforçado que está confinado a suas dimensões, são induzidas deformações que, se excederem a capacidade de tensão de tração do sistema, podem resultar em rachaduras catastróficas. A deformação do material de reparo está sujeita a muitas variáveis como, por exemplo, sua composição, espessura e temperatura de serviço (EMMONS; VAYSBURD, 1996).

É importante que a seleção de materiais seja realizada com atenção, pois na maioria dos casos o reforço aderente e o substrato a ser reforçado possuem comportamentos diferentes, o que implica na alteração do desempenho esperado da estrutura reparada (BUDHE et al., 2017).

1.4.2 Durabilidade

A qualidade e a durabilidade de uma união adesiva está diretamente relacionada à qualidade e a durabilidade dos materiais envolvidos assim como o comportamento da interface (ou interfase) adesiva. Segundo Cabral-Fonseca et al. (2018), os fatores que mais influenciam a durabilidade de uma junção entre concreto e um PRF podem ser agrupados em três diferentes categorias: materiais empregados nos adesivos e aderentes, projeto e processo de fabricação e condições em serviço.

Em relação aos materiais empregados nos adesivos, a composição química, a viscoelasticidade, reatividade, susceptibilidade à degradação, propriedades térmicas e mecânicas são as mais importantes a serem consideradas. Nos aderentes, uma consideração importante é a questão relacionada à química e à topografia de superfície. No que se diz respeito aos projetos e os processos de fabricação, devem ser considerados a configuração geométrica, a execução prática, viabilidade econômica, condições de cura e a rugosidade superficial.

As condições de serviço que podem comprometer o comportamento da interfaces entre PRF e concreto são dependentes de uma combinação de diferentes fatores ambientais que podem se influenciados pela localização geográfica da estrutura reforçada. Esses fatores ambientais mais conhecidamente prejudiciais são as estações chuvosas, atmosferas salinas, presença de soluções alcalinas, incidência da radiação ultravioleta, ciclos de temperatura diurna e noturna assim como ciclos sazonais de congelamento e descongelamento.

Não menos importante, o desempenho da interface adesiva também tem relação íntima com a preparação da superfície do substrato assim como a qualidade da mão de obra empregada no serviço de aplicação do reforço (SEN, 2015).

1.4.3 Requisito para os adesivos

O principal objetivo da camada adesiva é garantir que haja uma interface continua entre o PRF e o substrato de concreto a fim de se obter uma relação estável de colagem. Dessa forma, espera-se obter uma transferência de tensão de cisalhamento efetiva do elemento de concreto para os PRF (CABRAL-FONSECA et al, 2018).

Uma boa ligação entre concreto e adesivo começa pela escolha de um bom adesivo. A seleção de adesivos não é uma tarefa fácil, visto que não há um adesivo universal que atenda à todas as necessidades de intervenções e reforços. No entanto devem ser observados alguns fatores que podem ajudar na escolha, como a natureza dos substratos que serão colados, método de aplicação do adesivo, condições de cura e os tipos de tensão que este estará sujeito em sua vida útil. O fator econômico também deve ser levado em consideração. (BANEJA; SILVA, 2009).

Os adesivos estruturais são os mais recomendados, visto que essa definição aplica-se apenas ao materiais nos quais a resistência ao cisalhamento é superior aos 6,89 MPa. O sucesso da união adesiva entre os diferentes aderentes é fortemente dependente da sua capacidade em resistir aos esforços de cisalhamento (PETRIE, 2000). Para Mays e Hutchinson (1992), os adesivos devem ser selecionados cuidadosamente levando em consideração o seu comportamento em todas as fases do processo desde as condições de armazenamento da resina não misturada até a fase endurecida para qual o material foi projetado.

As condições de armazenamento devem respeitar as recomendações do fabricante tanto no que se diz respeito à temperatura, umidade relativa, como ao prazo de validade. No estado recém misturado, a resina deve ser trabalhada sempre no período estipulado a fim de garantir a viscosidade e tixotropia adequada para realizar sua correta manipulação e aplicação nos substratos. No estado endurecido, as propriedades do adesivo serão regidas pela estrutura assumida, composição química e pelas condições de cura.

Um parâmetro muito importante a ser considerado é a temperatura de transição vítrea (T_g). A faixa de serviço a qual encontra-se certos adesivos deve ser sempre inferior a sua T_g , caso contrário, propriedades como rigidez e resistência mecânica podem ficar comprometidas. A energia térmica fornecida em temperaturas superiores a T_g , permitem que as cadeias poliméricas dos adesivos adquiram certa mobilidade, resultando em um decréscimo da capacidade de ligação entre o material reforçado e o material de reforço.

1.4.4 Requisito para os PRF

Para que desempenhem boas condições de serviços, os PRF devem possuir rigidez e resistência mecânica suficiente para que suportem altas cargas aplicadas nos elementos

estruturais, além de apresentarem resistência a outros diversos fatores ambientais que podem influenciar negativamente na sua durabilidade (CABRAL-FONSECA et al, 2018).

Muitas são as causas de deterioração das propriedades em serviço dos PRF e por esse motivo eles devem apresentar boa resistência a uma série de efeitos que individualmente podem não ser tão prejudiciais, porém quando combinados, podem ser extremamente danosos.

Segundo Pritchard (1999), os maiores efeitos adversos são as tensões mecânicas provenientes de cargas estáticas, fenômenos relacionados à fadiga e fluência, pequenos impactos mecânicos, danos por erosão e abrasão. As alterações químicas podem ser provocadas por influência de umidade em excesso, atmosferas oxidantes e presença de poluentes. Ação da radiação ultravioleta e flutuações de temperatura extremas também devem ser consideradas.

1.4.5 Requisito para o concreto

A interface responsável por unir o PRF ao concreto tem grande influência no desempenho da estrutura reforçada. Ela é fortemente influenciada pelos tipos de carga aos quais a estrutura reforçada está submetida assim como o ambiente de instalação e a qualidade dos materiais envolvidos, seja o PRF ou o concreto. (MUKHTAR; FAYSAL, 2018).

Para que não ocorra descolamento desta interface, é necessário que seja estabelecida uma tensão mínima de ligação entre concreto e PRF maior que 1,5 MPa. Boas condições de colagem são alcançadas quando o substrato do concreto é devidamente preparado por meio de um tratamento superficial que garanta rugosidade adequada (BLANKSVÄRD, 2009).

1.5 Conceitos relacionados à técnica EBR

1.5.1 Modos de falha

A análise dos modos de falhas em elementos de concreto reforçados com materiais compósitos laminados através de procedimentos experimentais em condições controladas é de extrema importância para examinar o comportamento dessas estruturas sob as mais variadas condições de carregamento e configurações de reforço.

O reparo ou aumento de resistência que adota esta técnica pode levar a expressivos incrementos de resistência máxima. No entanto é necessário entender que nos mais variados tipos de testes executados, muitos modos de ruptura vem sendo identificados por vários pesquisadores ao redor do mundo, o que de certa forma pode levar a uma limitação na forma às quais são conduzidos esses incrementos (BEBER, 2003).

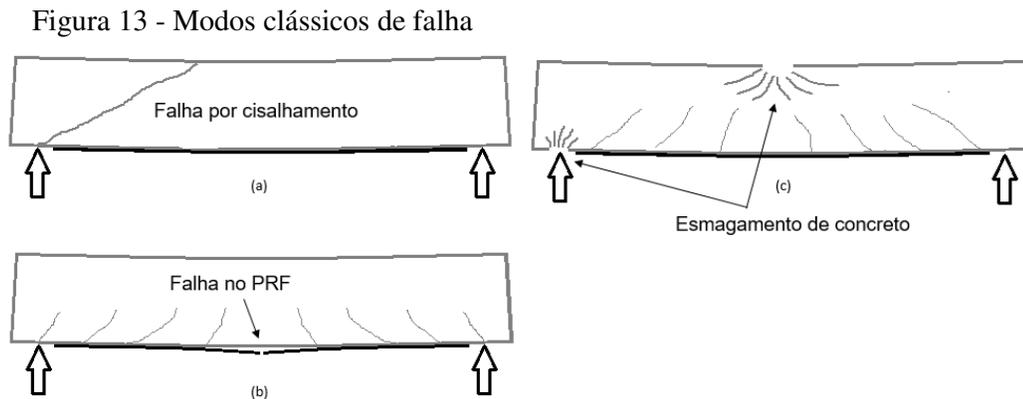
Apesar de ser conhecida uma técnica bem sucedida, a maioria dos modos de falha relatados por pesquisadores e profissionais da área ocorre de maneira frágil, com pouca deformação e algumas vezes sem nenhuma indicação visível de falha. Os modos mais comumente relatados são a falha no substrato de concreto e o descolamento das interface adesiva onde ocorre a ligação do reforço com o elemento estrutural (MAALEJ; LEONG, 2005).

Segundo o Bulletin 14 (FIB, 2001), os modos de falhas mais comuns já identificados podem ser divididos em dois grupos gerais. No primeiro grupo estão os modos de falha também conhecidos como modos clássicos. Nesses casos os PRF podem sofrer ruptura devido a elevadas tensões de tração ou quando o PRF mantém suas características de serviço até que o concreto falhe de maneira coesiva ou sofra esmagamento por compressão em regiões submetidas ao esforço compressivo.

O segundo grupo compreende todos os casos onde a eficiência do material compósito laminado é afetada antes que ocorra qualquer falha de modo clássico. São denominadas rupturas prematuras e um exemplo deste tipo de falha é a que ocorre por descolamento da camada adesiva. Um breve detalhamento está apresentado adiante.

1.5.1.1 Rupturas clássicas

São as rupturas caracterizadas pelo desempenho em serviço adequado da ligação de material compósito até que algum dos demais materiais da estrutura reforçada falhe ao atingir sua tensão limite (CARVALHO, 2011). Os três principais modos são ilustrados pela figura 13:



Fonte: SMITH E TENG, 2002.

De acordo com o Bulletin 14 (FIP, 2001), o três principais modos são os seguintes:

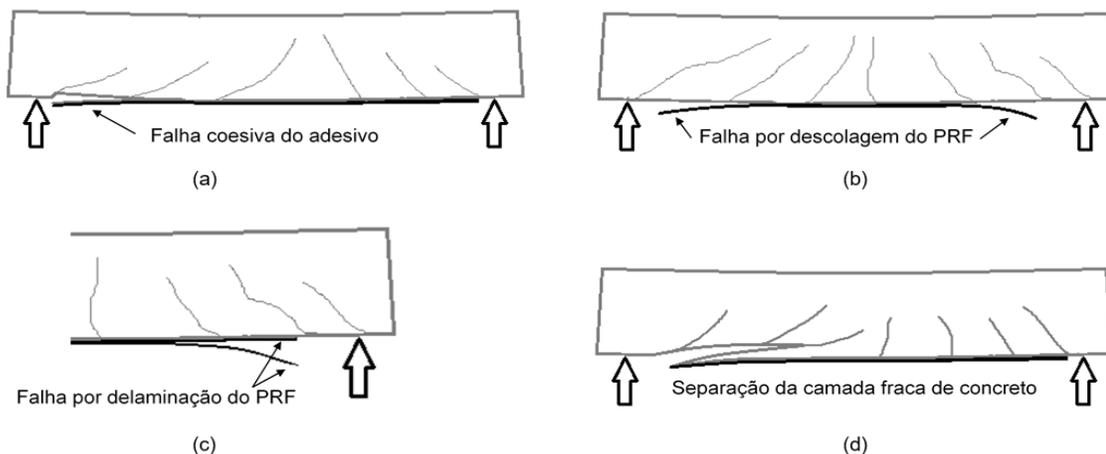
- a. Comportamento em flexão garantido pelo escoamento da armadura metálica e posterior falha no concreto sem que haja ruptura do reforço de material compósito laminado;
- b. Para pequenas proporções de reforço metálico ou reforço de material compósito, a falha em flexão ocorre com o escoamento da armadura e a ruptura do material compósito por esforços de tração;
- c. Esmagamento do concreto para relações de reforço relativamente altas. Neste caso o esmagamento compressivo ocorre antes que haja escoamento nos reforços metálicos ou nos reforços de material compósito. É considerado o modo mais indesejado, por ser um tipo de ruptura frágil.

1.5.1.2 Ruptura prematura

Nos casos dos reforços colados externamente a perda parcial ou total da interação que existe entre as interfaces de material compósito e o substrato de concreto pode conduzir a uma diminuição na capacidade resistente do elemento reforçado ou seu colapso total de maneira frágil. Quando uma pequena zona de ligação sofre uma descolagem com menos de 2 mm de perda no comprimento de ligação, não há uma falha que causará perda de capacidade de carregamento.

Se houver a propagação da área descolada, a ação do material compósito perderá gradativamente sua eficiência, não sendo mais possível suportar aumento de cargas culminando a falha por descolamento. Se a redistribuição de tensões for superior à capacidade resistente da armadura metálica, haverá então uma falha súbita e de modo frágil. É um tipo de falha que ocorre em diferentes interfaces da estrutura reforçada (FIB, 2001). A figura 14 ilustra os modos mais observados:

Figura 14 - Modos de ruptura prematura



Fonte: SMITH; TENG, 2002.

A descrição para estes modos também fornecida pelo Bulletin 14 (FIP, 2001):

a. Falha coesiva caracterizada pela descolamento da camada adesiva. Devido ao adesivo possuir maiores resistências a tração e cisalhamento, a falha ocorrerá no concreto. Uma fina camada de concreto ainda estará aderida ao adesivo. Para os casos onde há um concreto com resistência excepcionalmente alta ou fatores que afetem o comportamento do adesivo (como temperatura e umidade) haverá falha ao longo da camada adesiva.

b. Falha de adesão caracterizada pelo descolamento nas interfaces entre adesivo e concreto ou entre adesivo e PRF. Geralmente é causada por uma preparação de superfície deficiente no concreto ou um espalhamento não uniforme do adesivo sobre o PRF.

c. Delaminação interna no PRF devido a falha por cisalhamento interlaminar. Este mecanismo de falha pode ser explicado pela mecânica da fratura, onde ocorrerá a propagação de uma trinca. Constitui um caso de falha secundária e geralmente após a iniciação da falha no concreto e não determina a força de adesão entre as interfaces.

d. Falha por separação da camada enfraquecida de concreto na região de colagem.

1.5.2 Preparo superficial

A utilização de adesivos à base de epóxi com cura a frio requer uma preparação da superfície do substrato para que se atinja boas condições de adesão. Independente da natureza do substrato ou do adesivo, a ausência do tratamento ou uma execução mal realizada podem afetar negativamente a eficiência do reforço, caracterizando assim a importância que se assume a correta preparação da superfície (MAYS; HUTCHINSON, 1992).

A adesão é dependente de muitos fenômenos que podem estar presentes na interface de reparo, como por exemplo, a presença de forças secundárias induzidas no sistema e os mecanismos de interligação mecânica alcançados pelo nível de rugosidade superficial. No caso das estruturas de concreto, o tratamento de superfície tem como principal objetivo eliminar qualquer substância que impeça a correta adesão do adesivo no substrato assim como aumentar a área de contato superficial por meio do atingimento da rugosidade desejada (GARBACZ; GÓRKA; COURARD, 2005).

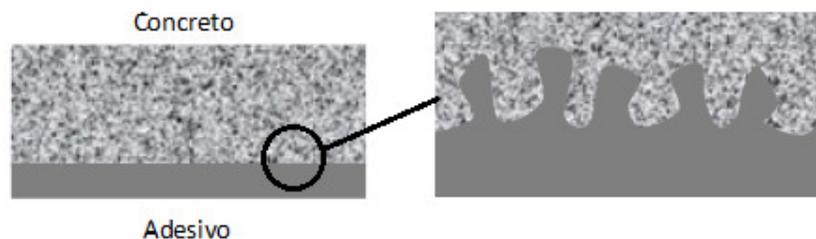
Estão disponíveis ferramentas para que se realize os mais diversos tipos de tratamento de superfície. Rompedores, trituradores, escarificadores são preparos mais agressivos e são denominados métodos mecânicos. Outras técnicas como lixamento, jateamento com areia, água ou granalhas de aço são denominados métodos abrasivos. É importante atentar ao fato que existem limitações intrínsecas de cada processo que devem ser verificadas cuidadosamente. Pequenas variações no perfil de rugosidade podem ter influência negativa na forma como a ligação entre concreto e compósito se desenvolvem (ARIYACHANDRA et al., 2017).

1.5.2.1 Teoria mecânica da aderência

Os mecanismos de interligações mecânicas podem ser melhor entendidos a partir da teoria mecânica de colagem. Segundo Silva, Magalhães e Moura (2007), ela se baseia no princípio que uma colagem adequada ocorre quando determinado adesivo permeia heterogeneidades da superfície do substrato (poros, cavidades, fendas) onde fica interligado mecanicamente, como pode ser visto na figura 15.

Além disso, o adesivo deve garantir uma molhabilidade apropriada em relação ao substrato em questão, assim como as propriedades reológicas necessárias para que essa penetração seja realizada em um tempo razoável, antes que ocorra sua cura. A microrugosidade das superfícies podem ser melhoradas de acordo com um tratamento superficial que favoreça as interligações mecânicas e conseqüentemente a durabilidade do sistema de ligação envolvido no reforço utilizado.

Figura 15 - Representação esquemática da teoria mecânica da adesão



Fonte: SILVA; MAGALHÃES; MOURA, 2007.

Quando há penetração do adesivo a uma certa profundidade nas heterogeneidades das estruturas de concreto, por exemplo, pode resultar na formação de uma interface com propriedades únicas. Essa ligação circunvizinha os agregados e adquire uma alta resistência mecânica que a torna difícil de ser rompida (YIN; FAN, 2018).

1.5.2.2 Rugosidade superficial

Sabe-se que a rugosidade superficial é um parâmetro responsável por influenciar diretamente o desempenho das ligações em estruturas de concreto reforçadas com material compósito (IOVINELLA; PROTA; MAZZOTTI, 2013). Segundo Dellate (1998, apud GRIGORIADIS, 2015), substratos que possuem maior rugosidade tem maior área superficial na qual pode ser desenvolvida um maior número de interligações mecânicas. Dessa forma, haverá o conseqüente aumento do valor da resistência de ligação entre dois tipos de substratos.

No entanto, quantificar a rugosidade superficial de estruturas de concreto não é uma tarefa fácil. Garantir a uniformidade das superfícies das estruturas de concreto no momento da concretagem é fundamental, porém é fortemente influenciado pelas habilidades do trabalhador responsável. Este fato se torna crítico quando é necessário o atingimento de níveis de rugosidade similares em estudos que consideram a produção de muitos corpos de prova (YALIM; KALAYCI; MIRMIRAN, 2008)

Conforme exposto por Maerz et al. (2001, apud YALIM; KALAYCI; MIRMIRAN, 2008) há evidências que para concretos com resistência à compressão inferior a 21 MPa, por exemplo, não há influência no tratamento superficial ao qual o concreto é submetido, pois sempre haverá falha no substrato.

Apesar desta área ser composta por uma vasta literatura, é notado que não há muitos trabalhos que concentram o seu foco em uma abordagem de critérios quantitativos que relacionem a medida da rugosidade superficial e a propriedade mecânica de ligação. Ainda não há muitas evidências de quais são os parâmetros que devem ser levados em consideração ou qual o nível de rugosidade necessário para que haja o desenvolvimento de uma ligação de forma eficiente (YIN; FAN, 2018).

A introdução de abordagens quantitativas pode possibilitar a padronização de métodos para quantificação e a definição de procedimentos adequados para tipos específicos de rugosidade. Espera-se também que os estudos quantitativos ajudem no entendimento do motivo pelo qual diferentes métodos de preparo de um mesmo substrato apresentem resultados semelhantes que levem à forças de adesão com magnitudes diferentes (SANTOS; JÚLIO, 2013).

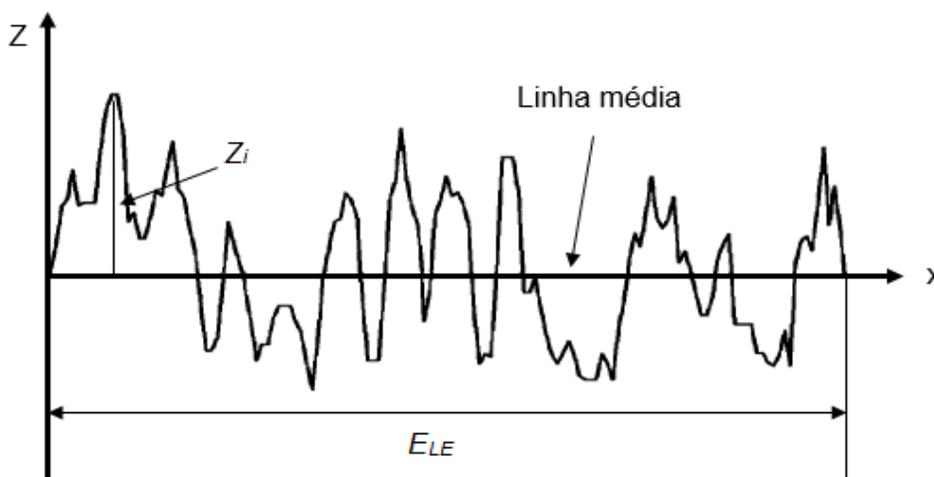
Os parâmetros de rugosidade mais comumente utilizados segundo Santos e Júlio (2013) são descritos adiante. O mais conhecido é a rugosidade média (R_a) devido a sua

simplicidade, sendo definido matematicamente como o desvio médio do perfil de rugosidade em relação à sua linha média, que é dado pela equação 1:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_i| \quad (1)$$

Onde n' é o número de medições discretas e Z_i é a amplitude de cada medição. A figura 4 é uma representação ilustrativa deste parâmetro. Na figura 16, E_{LE} é o comprimento efetivo avaliado.

Figura 16 - Representação esquemática da rugosidade média (R_a)



Fonte: GADELMAWLA et al., 2002.

O desvio médio quadrático (R_q), também conhecido como RMS, pode ser entendido matematicamente como a raiz quadrada da média dos quadrados das ordenadas do perfil em relação à linha média. É obtido pela equação 2:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_i|^2} \quad (2)$$

Representa o desvio padrão da distribuição das alturas da superfície, sendo mais sensível que a altura média aritmética a um grande desvio em relação a linha média (GADELMAWLA et al., 2002).

Apesar de muito comuns, tanto R_a e R_q não são suficientes para fornecer qualquer tipo de informação sobre a variabilidade da rugosidade local avaliada, visto que diferentes perfis podem apresentar a mesma rugosidade média (SANTOS; JÚLIO, 2013).

Conforme exposto por Grigoriadis (2015), os parâmetros que demonstraram forte influência em propriedades dos substratos como as interligações mecânicas são os valores da Inclinação média absoluta ($R_{\Delta a}$) e raiz quadrada média da inclinação ($R_{\Delta q}$). Como pode ser visto na equação 3, a avaliação do parâmetro $R_{\Delta a}$ se dá pelo cálculo da inclinação em dois pontos consecutivos de um mesmo perfil de rugosidade, sendo o valor final a média de todas as inclinações consideradas.

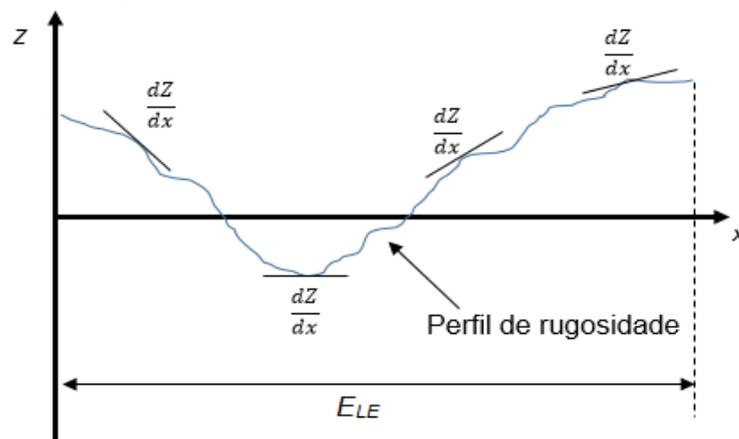
$$R_{\Delta a} = \frac{1}{E_{LE}} \int_0^L \left[\frac{dz}{dx} \right] dx = \frac{1}{E_{LE}} \sum_{n=1}^n |Z_{n+1} - Z_n| \quad (3)$$

Em relação ao parâmetro $R_{\Delta q}$, a raiz quadrada média da inclinação média é calculada, como pode ser visto na equação 4

$$R_{\Delta q} = \sqrt{\frac{1}{E_{LE}} \int_0^L \left(\frac{dz}{dx} \right)^2 dx} = \sqrt{\frac{1}{E_{LE}} \sum_{n=1}^n (Z_{n+1} - Z_n)^2} \quad (4)$$

A figura 17 traz uma representação esquemática para o melhor entendimento do parâmetro $R_{\Delta a}$.

Figura 17 - Representação esquemática do parâmetro $R_{\Delta a}$



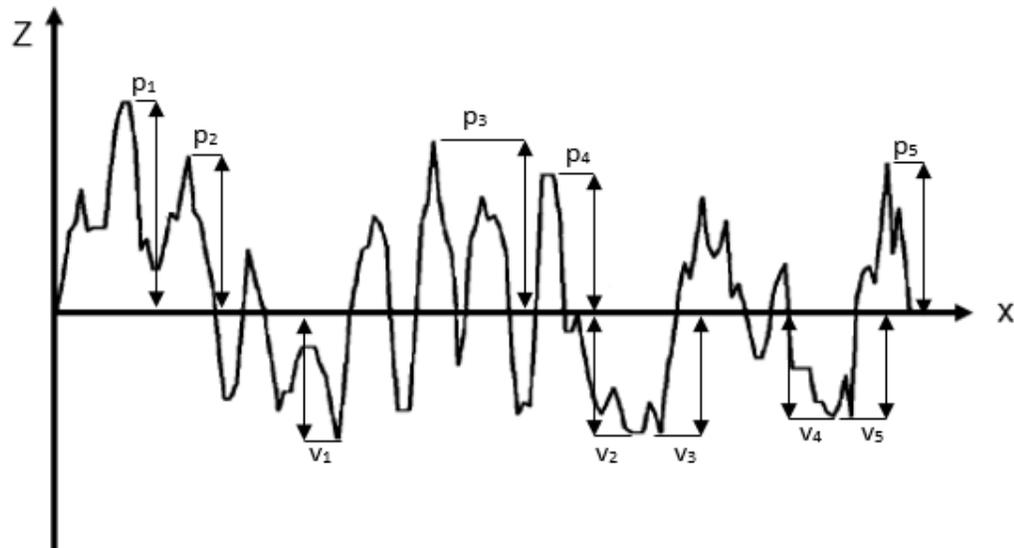
Fonte: GRIGORIADIS, 2015.

Superfícies com altos valores de $R\Delta a$ e $R\Delta q$ pode proporcionar melhor propriedades de interligações mecânicas comparado a uma superfície com baixos valores de $R\Delta a$ e $R\Delta q$.

Outro importante parâmetro é a altura máxima do perfil (R_z). Segundo a Organização internacional para Padronização (ISO), o parâmetro R_z é definido como a diferença em altura entre a média dos 5 picos mais altos e dos 5 vales mais profundos ao longo do perfil efetivo de avaliação. É um parâmetro mais sensivelmente influenciável por altos picos e vales profundos se comparado ao parâmetro R_a (GADELMAWLA et al., 2002). Sua determinação se dá através da equação 5 e pode ser melhor compreendido a partir da figura 18.

$$R_z = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n p_i - \sum_{i=1}^n v_i \right) \quad (5)$$

Figura 18 - Esquematização do parâmetro R_z



Fonte: GADELMAWLA et al., 2002

Na fórmula 5, p_i são as medidas para os maiores picos e v_i são as medidas para os vales mais profundos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

A preparação de todos os corpos de prova foi realizada com um concreto composto por cimento Portland CP II F 32 da marca Mauá[®], fabricado segundo recomendações da Norma Técnica Brasileira – NBR 11578 em unidades industriais de produção certificadas pelas normas de gestão da qualidade ISO 9001 e 14001.

Os agregados utilizados como agregado miúdo e agregado graúdo foram areia média e brita 0 provenientes de uma indústria de concreto localizada na cidade Nova Friburgo – RJ. Estes materiais foram utilizados no mesmo estado em que foram fornecidos, sem sofrer qualquer processo de beneficiamento ou cominuição a fim de evitar alteração de suas propriedades iniciais.

No amassamento de concreto foi utilizada água fornecida pela concessionária Águas de Nova Friburgo, para o abastecimento público e que de acordo com as recomendações da norma NBR 15900 é adequada para utilização em concretagem sem que seja necessária a caracterização de suas propriedades.

A manta de fibra de carbono utilizada para a fabricação do material compósito para reforço foi a LT450-C10-C produzida pela Devold AMT[®], disponível para utilização em estudos no Laboratório de Adesão e Aderência (LAA) do Instituto Politécnico da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (IPRJ). Para laminação, foi utilizada a Resina de Laminação Pipe Fix[®], também disponível no LAA.

2.1.1 Adesivos

Dois tipos de adesivos foram usados para colagem dos materiais compósitos nos corpos de prova de concreto. O adesivo S&P 220[®] fornecido pela S&P *Reinforcements Clever Solutions* e adquirida pelo LAA, enquanto que o adesivo NVT Pipe Fix[®] fornecido pela Novatec Soluções em Reparo, foi disponibilizada pelo LAA.

2.1.1.1 S&P 220

É um adesivo bi componente tixotropico de cor cinzenta, sem adição de nenhum tipo de solvente, desenvolvida para a aplicação em colagens estruturais de laminados de fibra de carbono ou chapas de aço. Os dados técnicos dessa substância foram informados pelo fornecedor e são apresentados nas tabelas 6 e 7:

Tabela 6 - Dados técnicos relevantes relacionados a aplicação do S&P 220

Densidade a ~ 23 °C	1,7 ~ 1,8 g/cm ³
Relação de mistura	4:1 (em volume)
Temperatura de aplicação	+ 8 ~ + 35 °C
Tempo de trabalhabilidade a ~23 °C (EM ISO 9514:2005)	Aproximadamente 25 minutos

Fonte: O FORNECEDOR, 2019.

Tabela 7 - Propriedades do S&P 220

Resistência à compressão (EN 1504-4)	≥ 70 N/mm ²
Módulo de elasticidade (DIN EN ISO 178)	≥ 7100 N/mm ²
Resistência ao corte (DIN EN ISO 12615)	≥ 26 N/mm ²
Dureza Shore – D (DIN EM ISO 53505)	87 ~ 93
Tensão de aderência (DIN EN 13892-8)	≥ 3 N/mm ² em concreto ≥ 3 N/mm ² em laminado de Fibra de carbono ≥ 14 N/mm ² em aço/aço

Fonte: O FORNECEDOR, 2019.

2.1.1.2 NVT E201

É um adesivo semiflexível à base de epóxi adequado para utilização em sistemas de reparos, com formulação a partir do balanceamento de agente flexibilizante, promotor de aderência e cargas inertes. Pode ser utilizado nas mais diversas práticas relacionadas a intervenção e reparos de estruturas metálicas, como colagem de chapas, reparo de dutos, nivelador de superfície, revestimento corrosivo entre outros.

As tabelas 8, 9 e 10 apresentam os principais parâmetros técnicos do adesivo informado pelo fornecedor:

Tabela 8 - Dados técnicos do NVT 201E

Relação de mistura	100:43 (Em peso)
Densidade	1,24 g/cm ³
Rendimento	1,24 kg/m ²

Fonte: O FORNECEDOR, 2019.

Tabela 9 - Informações técnicas sobre a cura do NVT 201E

Temperatura	Tempo de aplicação	Cura inicial	Cura funcional
25 °C	35 minutos	120 minutos	24 horas
35 °C	28 minutos	120 minutos	24 horas

Fonte: O FORNECEDOR, 2019.

Tabela 10 - Propriedades do NVT 201E

Tensão de tração máxima (ASTM D638)	27,25 MPa
Tensão de cisalhamento (ASTM D1002)	16 MPa
Teste de abrasão (DIN 53516)	0,45
Dureza Shore D (ASTM D2240)	60
Perda de massa (TGA)	≥ 300

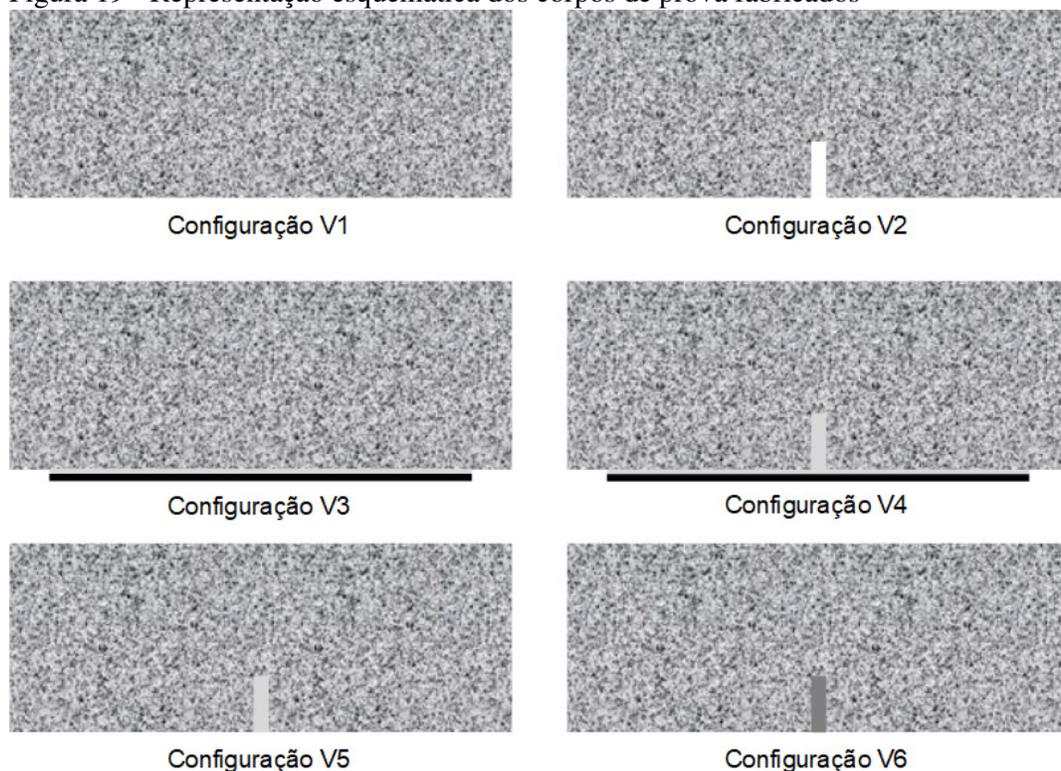
Fonte: O FORNECEDOR, 2019.

2.2 Métodos

2.2.1 Programa experimental

O programa experimental proposto tem a finalidade de avaliar o comportamento dos elementos prismáticos de concreto em 6 configurações distintas a partir do ensaio de resistência à flexão. Na figura 19 estão representadas esquematicamente todas as configurações propostas para este estudo.

Figura 19 - Representação esquemática dos corpos de prova fabricados



Fonte: O autor, 2019.

A primeira configuração denominada condição de controle (V1) e não recebeu nenhum tipo de tratamento superficial ou aplicação de reforço. Considera-se que esta série de corpos de prova serviu como parâmetro de comparação para avaliação do comportamento das vigas em condições normais de serviço.

A segunda configuração (V2) foi denominada condição entalhada e os elementos receberam um entalhe na metade do seu comprimento no intuito de simular um caso de falha crítica. Esta condição permite avaliar a perda de resistência à flexão do elemento de concreto quando submetido a um caso extremo padronizado para a realização deste estudo.

A terceira configuração (V3) foi denominada condição reforçada e consistiu em submeter os elementos de concreto à um tratamento superficial de lixamento e posterior reforço de material compósito sem a existência de nenhuma falha para que toda a capacidade de resistir ao esforço de flexão da estrutura reforçada fosse explorada.

A quarta configuração (V4) foi denominada condição entalhada reforçada e assim como a configuração V3, recebeu um tratamento superficial de lixamento e posterior reforço de material compósito para avaliar a contribuição do mesmo no caso de um elemento com falha crítica. Além disso, o entalhe presente neste grupo de corpos de prova foi preenchido

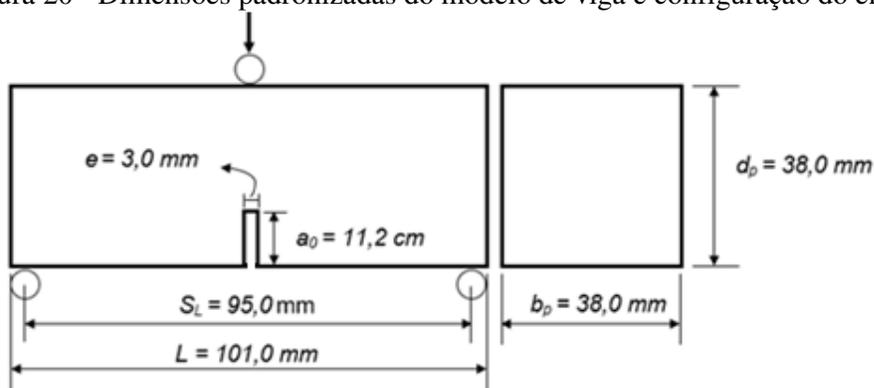
com ambos os adesivos nos seus respectivos lotes. Para as configurações V3 e V4, foram utilizados tanto o adesivo S&P 220[®] como o adesivo NVT Pipe fix[®].

As configurações V5 e V6 são semelhantes à configuração V2, porém neste caso a investigação concentra-se em uma condição onde os entalhes foram preenchidos com os adesivos estruturais. O número 5 corresponde aos elementos entalhados preenchidos com o adesivo S&P 220[®] e o número 6 identifica os elementos que receberam o NVT Pipe fix[®] no interior do entalhe.

Foram fabricados 3 lotes de corpos de prova de concreto com a mesma composição, sendo cada lote composto por 32 amostras. No primeiro e no segundo lote, as configurações V1, V2, V3 e V4 possuíam 8 elementos prismáticos de concreto cada. A única diferença entre esses dois lotes estava no adesivo utilizado para realizar a colagem do reforço. Os elementos das configurações V3 e V4 do primeiro lote utilizaram o adesivo S&P 220[®], enquanto que os elementos das mesmas configurações do segundo lote utilizaram o adesivo NVT 201E[®].

Os elementos de concreto em questão são vigas em escala reduzida que seguem as recomendações do comitê RILEM TC 89 – FMT de 1991. Este documento técnico apresenta o método do efeito de escala para a determinação da energia de fraturamento de corpos de prova de concreto em variadas dimensões. Sua escolha é justificada pelo fato que é permitida a exploração de dimensões reduzidas nos corpos de prova. A figura 20 é a representação do modelo de viga proposto neste estudo e a configuração do ensaio.

Figura 20 - Dimensões padronizadas do modelo de viga e configuração do ensaio



Fonte: RILEM TC 89 FMT, 1991.

Conforme sugerido pelo comitê RILEM TC 89 – FMT, as dimensões b_p e d_p não devem ser menores que pelo menos 3 vezes o tamanho máximo do agregado graúdo d_a . A

razão S_L/d_P deve ser no mínimo igual a 2,5. A espessura do entalhe e não deve exceder em $0,5d_a$ e a razão a_0/d_P de estar compreendida entre 0,15 e 0,5

Um sistema de siglas foi adotado para identificação dos lotes, configurações e corpos de prova da seguinte maneira: LiVjRx é a designação para um determinado corpo de prova, onde Li representa a numeração dos lotes ($i= 1, 2, 3$), Vj representa a numeração das configurações ($1 \leq j \leq 6$) e Rx é a referência a cada corpo de prova ($1 \leq x \leq 8$) baseada na ordem de ensaio de resistência à flexão. A sigla L1V1R1, por exemplo, foi designada ao primeiro corpo de prova do primeiro lote da primeira configuração que foi ensaiada, assim como a designação L1V2 refere-se a um resultado geral para os corpos de prova na configuração V2 pertencente ao lote 1.

2.2.2 Concreto de Referência

Foi proposto para o concreto utilizado no presente estudo uma resistência à compressão média (F_{ck}) de 25 MPa aos 28 dias de cura. Os parâmetros técnicos relevantes relacionados aos agregados são mostrados na tabela 11:

Tabela 11 - Informações técnicas referentes aos agregados graúdo e miúdo

Parâmetro	Unidade	Valor
Massa unitária da birta 0 (δ_B)	kg/m ³	1427
Massa específica da brita 0 (γ_B)	kg/m ³	2620
Massa específica da areia (γ_m)	kg/m ³	2650
Módulo de finura (MF)	-	2,60

Fonte: O autor, 2019.

Para avaliar a resistência à compressão do concreto obtido, foi definido que seria realizada a fabricação de 12 corpos de prova cilíndricos seguindo as recomendações da norma NBR 5738. Baseados no molde cilíndrico com dimensões normatizadas de 20 cm de altura por 10 cm de diâmetro, foi considerado o volume teórico para um corpo de prova foi de $1,57 \times 10^{-3} \text{ m}^3$. Para 12 corpos de prova, o volume teórico necessário de concreto seria de $18,85 \times 10^{-3} \text{ m}^3$.

Considerando todas as perdas de massa envolvidas no processo de concretagem, decidiu-se extrapolar o volume de concreto teórico para $22,00 \times 10^{-3} \text{ m}^3$. Dessa forma obteve-

se um total de 14 corpos de prova para posterior caracterização em relação à resistência à compressão.

A incorporação do aditivo Bautech polifuncional 3[®] teve como objetivo promover a melhoria das propriedades de plasticidade para que fosse facilitada a aplicação da massa de concreto nos moldes. Segundo o fabricante, este aditivo também garante a homogeneidade do traço e a melhor dispersão dos agregados com uma proporção ideal para o CP II entre 0,80% e 0,85% em relação ao peso do cimento. Na tabela 12 é possível verificar a quantidade de cada material utilizado para um traço padrão de 1 m³ e para o traço de referência.

Tabela 12 - Quantidades de materiais para o traço de referência

Material	Unidade	1 m³	22 x 10⁻³ m³
Cimento CP II F 32	kg	523	11,51
Areia	kg	782	17,20
Brita 0	kg	806	17,73
Água	kg	225	4,95
Bautech Polifuncional 3 [®]	kg	4,18	0,092

Fonte: O autor, 2019.

Dessa mesma forma foram realizados os cálculos para os corpos de prova prismáticos. O volume teórico de um corpo de prova prismático é $1,46 \times 10^{-4} \text{ m}^3$. Para 32 corpos de prova por lote, o volume teórico de concreto necessário foi de $4,67 \times 10^{-3} \text{ m}^3$. Considerando todas as perdas de massa envolvidas no processo de concretagem, decidiu-se extrapolar o volume de concreto teórico para $8,00 \times 10^{-3} \text{ m}^3$. Na tabela 13 é possível verificar a quantidade de cada material utilizado para um traço padrão de 1 m³ e para o traço destinado a um lote de corpos de prova prismáticos.

Tabela 13 - Quantidades de materiais para o traço dos corpos de prova prismáticos

Material	Unidade	1 m³	8 x 10⁻³ m³
Cimento CP II F 32	kg	523	4,19
Areia	kg	782	6,26
Brita 0	kg	806	6,45
Água	kg	225	1,80
Bautech Polifuncional 3 [®]	kg	4,18	0,035

Fonte: O autor, 2019.

2.2.3 Moldagem dos corpos de prova

Para a realização deste estudo, dois tipos de corpos de prova foram projetados com diferentes finalidades. Os corpos de prova cilíndricos foram utilizados para a avaliação da resistência à compressão do concreto e os corpos de prova prismáticos foram utilizados para avaliar a contribuição do reforço de material compósito proposto em cada configuração, como citado anteriormente.

As dimensões do corpo de prova cilíndrico foram 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro estipuladas pela norma NBR 5738. Para os corpos de prova prismáticos as dimensões básicas foram de 10,1 cm de comprimento por 3,8 cm de largura e altura com base na dimensão máxima do agregado graúdo seguindo as recomendações do comitê técnico RILEM TC 89 – FMT de 1991.

Foi utilizada a betoneira para misturar os componentes do traço de referência com a seguinte sequência de adição de materiais: primeiramente umedeceu-se a betoneira e adicionou-se brita 0 e 50% da quantidade total de água, a betoneira foi ligada e permaneceu girando por aproximadamente 1 minuto. Após isso, foi adicionado cimento, areia e mais 40% da quantidade total de água e a betoneira foi ligada novamente permanecendo em funcionamento por mais 1 minuto. Adicionou-se o aditivo Bautech polifuncional 3[®] ao restante de água e esta mistura foi despejada no interior do tambor e a betoneira foi ligada por mais um minuto. Esse procedimento foi baseado no procedimento adotado por Pessoa (2007).

Em seguida procedeu-se a determinação da consistência do concreto pelo método do abatimento do tronco de cone seguindo recomendações da norma NBR NM 67. O concreto em estado fresco foi transferido para o interior dos moldes cilíndricos, permanecendo dentro desses moldes por no mínimo 24 horas antes o período de desmoldagem, conforme estipulado pela norma NBR 5738, como pode ser visto na figura 21. Uma fina camada de material desmoldante foi aplicada no interior dos moldes para que impedisse a fixação do concreto. Após o desmolde, os corpos de prova foram transferidos para o interior de um recipiente úmido de lã permaneceram durante 28 dias até o final de sua cura. A figura 22 mostra os cilindros de concreto no primeiro dia após o desmolde.

Figura 21 - Moldagem dos corpos de prova cilíndricos



Fonte: O autor, 2019.

Figura 22 - Corpos de prova cilíndricos em cura úmida



Fonte: O autor, 2019.

A figura 23 mostra os corpos de prova prismáticos após moldagem no interior dos moldes sobre a bancada.

Figura 23 - Moldagem dos corpos de prova prismáticos



Fonte: O autor, 2019.

Após permanecerem por 24 horas nos moldes, os corpos de prova foram colocados em um recipiente de plástico e levados ao recipiente de cura úmida. A figura 24 mostra os corpos de prova prismáticos após o desmolde. Com a massa de concreto excedente, foram fabricados dois corpos de prova cilíndricos para o lote 1 e 2 e um corpo de prova cilíndrico para o lote 3.

Figura 24 - Desmolde dos corpos de prova prismáticos



Fonte: O autor, 2019.

2.2.4 Entalhe nos corpos de prova

Terminado o período de 28 dias de cura, os corpos de prova prismáticos foram retirados do recipiente úmido, lavados e secos superficialmente com um pano. Com os corpos de prova aparentemente secos, optou-se por realizar o entalhe com uma máquina de corte eletromecânica, visto que a execução do entalhe na etapa de pré – moldagem por meio da inserção de uma placa gerou resultados indesejados em outros estudos. Pessoa (2007) verificou que mesmo após aplicar uma camada de graxa em uma placa de vidro utilizada para realizar o entalhe, o desmolde era dificultado, pois partes do concreto continuavam aderidos à placa acarretando quebra dos corpos de prova. Na figura 25 estão os primeiros corpos de prova que receberam o entalhe.

Figura 25 - Face inferior dos corpos de prova entalhados



Fonte: O autor, 2019.

2.2.5 Aplicação do reforço

2.2.5.1 Escolha do preparo de superfície

Antes de qualquer tipo de intervenção de reparo que consista na colagem de reforços, as superfícies das estruturas de concreto que serão reforçadas devem ser cuidadosamente preparadas. O preparo do substrato de concreto deve garantir uma superfície sólida, limpa e devidamente rugosa. É indispensável que partículas aderidas, camadas soltas e filmes impregnados sejam removidos de forma que não haja nenhum obstáculo que comprometa a colagem do adesivo no substrato do concreto (YIN; FAN, 2018).

Dentre todos os tratamentos de superfície verificados na literatura (GARBAZ; GÓRKA; COURARD, 2005; ARIYACHANDRA et al., 2017), apenas três tratamentos estavam disponíveis no laboratório onde foram conduzidos os experimentos. Dessa forma três corpos de prova extra foram escolhidos aleatoriamente no lote e foram realizados o jateamento com grama de aço, desbaste com escova giratória de cerdas metálicas MBX e lixamento com lixa d'água.

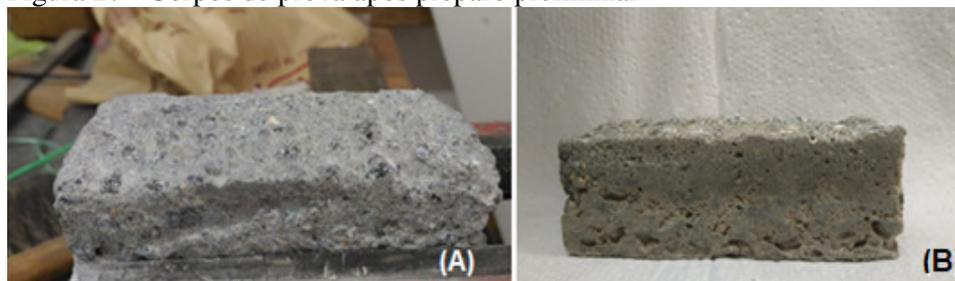
Os tratamentos com gramalhas de aço e cerdas metálicas foram bastante agressivos a superfície dos corpos de prova. Foi verificado que com a utilização de qualquer um desses dois procedimentos haveria a perda da regularidade dimensional que os corpos de prova exibiam e isso poderia comprometer tanto a aplicação do reforço como a execução dos ensaios de resistência à flexão de três pontos. As figura 26 apresenta os equipamentos e a figura mostra o resultado a utilização desses equipamentos nos corpos de prova.

Figura 26 - Ferramentas para o preparo de superfície



Legenda: (A) – MBX; (B) – Câmara de Jateamento.
Fonte: O autor, 2019.

Figura 27 - Corpos de prova após preparo preliminar



Legenda: (A) – Preparo com MBX; (B) – Preparo com Jateamento.
Fonte: O autor, 2019.

Baseado nestes testes preliminares, optou-se pela execução do lixamento com lixa d'água. Foi utilizada uma lixadeira circular com lixa d'água grão 24 a 2200 rpm, seguindo recomendações de profissionais da área. Cada corpo de prova foi lixado por aproximadamente 30 segundos. Este procedimento está ilustrado na figura 28.

Antes da aplicação do reforço, as superfícies lixadas foram jateadas com ar comprimido para eliminar qualquer umidade e os resíduos oriundos do lixamento.

Figura 28 - Operação de lixamento



Fonte: O autor, 2019.

2.2.5.2 Avaliação da superfície do concreto

A critério de registro e verificação do efeito do lixamento em relação a superfície bruta, decidiu-se avaliar o perfil de rugosidade das superfícies de alguns corpos de prova que receberiam o tratamento superficial e posterior colagem do material compósito de reforço.

O método de avaliação utilizado foi a Perfilometria mecânica, onde um sensor mantém o contato com a superfície analisada se movendo verticalmente ao longo de duas direções principais (x, y) gerando perfis de rugosidade em 2 e 3 dimensões (BISSONNETTE; COURARD; GARBACZ, 2016).

O equipamento utilizado foi um rugosímetro modelo Talyscan 150 da marca Taylor Hobson Precision[®], como pode ser visto na figura 29. A norma que rege esse procedimento é a NBR ISO 4287 porém devido as limitações impostas pela heterogeneidade da superfície do concreto verificada em testes preliminares, foi necessário diminuir a área de avaliação e o número de amostras.

O teste preliminar foi realizado ao escolher-se uma amostra aleatoriamente no primeiro lote fabricado. A primeira limitação encontrada foi em relação a irregularidade das superfícies dos corpos de prova, que geralmente excediam os limites máximos de pico ou vale que o equipamento poderia avaliar. O sensor do rugosímetro percorreu, por inúmeras vezes, áreas muito irregulares e com alta quantidade de poros, fato esse que comprometeu a aquisição de dados sendo necessário reiniciar o teste.

A segunda limitação encontrada foi o tempo de análise, que para avaliar toda a área de colagem de uma amostra levaria em torno de 16 horas. Após uma avaliação a olho nu em busca das superfícies mais homogêneas, foram selecionadas apenas 5 amostras nos lotes 1 e 2. Uma área de 9 mm² foi avaliada antes e após a realização do lixamento. Um total de 20 medições foi realizada, selecionando-se as que apresentaram resultados mais coerentes.

Figura 29 - Avaliação da rugosidade superficial dos corpos de prova



Fonte: O autor, 2019.

2.2.5.3 Desenvolvimento do reforço

Para o material de reforço foi desenvolvido empiricamente um laminado compósito de matriz polimérica com duas camadas de manta de fibra de carbono com as fibras orientadas a $90^{\circ}/0^{\circ}$.

Esta decisão foi tomada a partir de teste preliminares, onde inicialmente a ideia era impregnar uma camada de manta de fibra de carbono com o adesivo, colando-o no corpo de prova e submetendo o sistema a cura em temperatura ambiente por 72 horas. Os resultados deste procedimento não foram satisfatórios, pois a alta tixotropia dos adesivos impediram a correta impregnação da manta de fibra de carbono. Outro fator decisivo baseou-se na dificuldade em cortar pequenas áreas da manta de fibra de carbono de modo que esta mantivesse uma regularidade dimensional adequada para reprodutibilidade em diversos corpos de prova. O teste em questão pode ser visto na figura 30.

Figura 30 - Teste preliminar para aplicação do reforço nos corpos de prova



Fonte: O autor, 2019.

A proporção dos componentes A e B da resina foi 5,7:1,0 em peso, sendo 250 g do componente A e 44 g do componente B. Foram extraídos dois cortes retangulares de 600 mm x 300 mm do rolo de manta de fibra de carbono. O processo de fabricação empregado no reforço foi laminação manual. Sobre uma madeira encerada, foi colocado uma camada de peel ply e posteriormente uma camada de resina. Os dois cortes da fibra de carbono foram colocados em seguida, alternando-se com a aplicação de resina, como pode ser visto na figura 31.

Figura 31 - Etapas de laminação do reforço.



Fonte: O autor, 2019.

Antes de finalizar a laminação, uma camada de peel ply foi colocada na parte superior do material laminado ainda em período de cura e em seguida, todo o conjunto foi inserido em uma bolsa para aplicação de vácuo por aproximadamente 6 horas.

A utilização do Peel ply possibilita um melhor acabamento superficial ao material compósito laminado e após o processo de cura e facilita o procedimento de desmolde (GARCIA, 2014). A aplicação do peel ply também é responsável pela proteção da superfície contra vários contaminantes como poeira, umidade e outras substâncias externas assim como possibilita a criação de uma superfície rugosa única (BUDHE et al., 2017), contribuindo para melhores propriedades de adesão.

A aplicação do vácuo no processo de cura se justifica na tentativa de obter um material compósitos com maior teor de fibras, visto que esses geralmente apresentam melhores propriedades mecânicas (ROHEM, 2010). Também contribui para eliminação de voláteis e bolhas que podem ficar presos entre as camadas do laminado e entre a superfície da bolsa e a superfície do laminado (AGARWAL; BROUTMAN; CHANDRASHEKHARA, 2006). O processo está ilustrado na figura 32.

Figura 32 - Aplicação de vácuo na placa de reforço



Fonte: O autor, 2019.

Após permanecer 24 horas em cura, a placa do material compósito foi retirada da bolsa e levada à máquina de corte, onde foram cortados os reforços, como pode ser visto na figura 33.

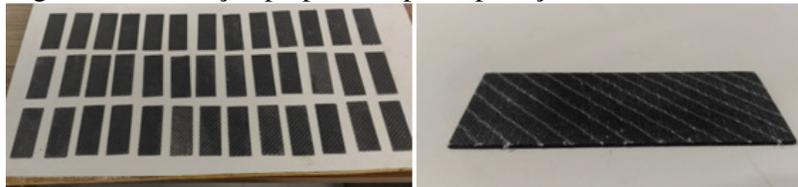
Logo após o corte, os reforços foram lavados e suas bordas foram desbastadas manualmente com lixa d'água grão 800. O excesso de umidade foi retirado com jateamento de ar comprimido. A figura 34 apresenta os reforços preparados para a aplicação.

Figura 33 - Operação de desmolde e corte dos reforços



Fonte: O autor, 2019.

Figura 34 - Reforços preparados para aplicação



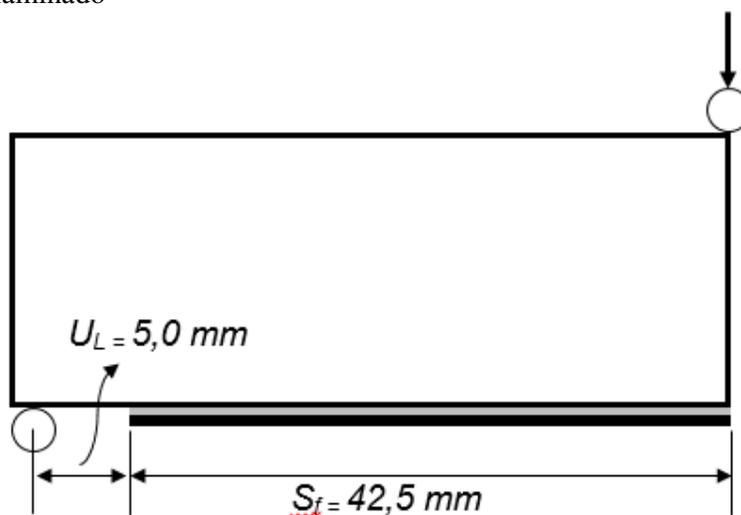
Fonte: O autor, 2019.

2.2.5.4 Dimensões do reforço

Para que seja simulada uma situação real de intervenção é necessário que uma parte da superfície submetida aos esforços de tração não esteja associada a nenhuma espécie de reforço. O laminado não deve sobrepor a área de contato entre os suportes do mecanismo de ensaio e o elemento de concreto. Isso provocaria uma deformação localizada e um rompimento indesejado por compressão no laminado a uma carga superior a qual o elemento de concreto falharia normalmente (GARDEN et al., 1998), o que comprometeria os resultados e invalidaria o intuito dos testes.

O comprimento do reforço foi definido com base na razão entre a metade do comprimento de vão livre colado, S_f , e comprimento não colado, U_L , estudada por El-Mihilmy e Tedesco (2001, apud PIMANMAS; PORNPONGSAROJ, 2004). O intervalo mais comumente estabelecido para a razão U_L/S_f deve estar compreendido entre 0,013 e 0,15. Levando em consideração a simetria dos corpos de prova, apenas a parte esquerda é considerada para ilustrar as dimensões consideradas na figura 35. Neste caso, devido as dimensões limitadas dos corpos de prova, o comprimento do reforço foi de 85 mm.

Figura 35 - Dimensões consideradas na determinação do comprimento do laminado



Fonte: PIMANMAS; PORNPONGSAROJ, 2004

A espessura do laminado é controlada pela quantidade de camadas de fibras e matriz consumidas (AGARWAL; BROUTMAN; CHANDRASHEKHARA, 2006). Os laminados

utilizados para reforçar os elementos de concreto possuem em média uma espessura de 1,15 mm. A espessura do reforço projetado para este estudo está em concordância com relatos encontrados na literatura. Segundo Buyukozturk e Hearing (1998), a espessura dos PRF de carbono utilizados na construção civil com este fim deve variar entre 1,00 mm e 3,00 mm.

2.2.5.5 Procedimento de colagem do reforço

A aplicação do reforço nos lotes 1 e 2 foi realizada seguindo recomendações técnicas do fabricante dos adesivos utilizadas. Primeiramente os componentes A e B dos dois adesivos foram misturados manualmente nas proporções especificadas. O adesivo S&P 220[®] possui uma relação de mistura de 4,0:1,0 baseada no volume, enquanto o adesivo NVT Pipe Fix[®] possui uma relação de mistura de 1,9:1,0 baseada no peso.

A sequência de aplicação do reforço pode ser vista na figura 36 e foi realizada da seguinte maneira: mistura manual dos componentes A e B dos adesivos; espalhamento do adesivo sobre o substrato de concreto e a superfície do reforço; aplicação de pressão manual sobre o reforço no local de colagem até que o excesso de adesivo surgisse nas bordas laterais dos corpos de prova. Segundo o fabricante do adesivo S&P 220[®], a espessura da camada adesiva deve estar compreendida entre 1 e 4 mm, sendo assim reproduzido neste experimento.

Figura 36 - Etapas de aplicação do reforço



Fonte: O autor, 2019.

No lote 3 foi realizado apenas o preenchimento do entalhes, como explicitado anteriormente. A mistura dos componentes A e B dos adesivos foram realizados da mesma maneira que na aplicação do reforço. Após o período de cura foi realizada uma etapa de desbaste do excesso de adesivo na lateral dos corpos de prova com lixamento utilizando lixa d'água grão 80, como pode ser visto na figura 37. Apesar do tempo de cura especificado pelos

fabricantes dos dois materiais ser de aproximadamente 24 horas, o tempo de espera para esse lixamento foi de aproximadamente 72 horas e foi padronizado em todos os corpos de prova.

Figura 37 - Desbaste do excesso de adesivo nas laterais dos corpos de prova



Fonte: O autor, 2019.

Após 24 horas ao lixamento de desbaste, os corpos de prova foram caracterizados pelo ensaio de resistência à flexão de três pontos.

2.2.6 Ensaio mecânicos

A avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos materiais é realizada quando corpos de prova são submetidos a condições controladas segundo as recomendações de normas padronizadas. Os ensaios mecânicos constituem um método eficaz na caracterização de materiais como o concreto, pois através da aplicação de uma esforço mecânico é possível obter uma resposta de um corpo de prova em determinada configuração ao tipo de tensão aplicada (ANDRADE, 2017). Neste estudo foram utilizados os três tipos de ensaios mecânicos. O ensaio de resistência à compressão, ensaio de resistência à flexão de três pontos e o ensaio de tração.

2.2.6.1 Ensaio de compressão axial

A avaliação da resistência à compressão do concreto é o tipo de ensaio mais comumente utilizado para o concreto no estado endurecido. O fatores que atribuem a popularidade deste método de caracterização estão relacionados em parte à facilidade de sua execução e em parte porque muitas características importantes do concreto são

qualitativamente relacionadas à sua resistência à compressão, além da importância intrínseca que esta desempenha em um projeto estrutural (NEVILLE, 2012). Em outras palavras, a resistência à compressão é a propriedade mais representativa da qualidade do concreto projetado (FUSCO, 2008).

O ensaio foi realizado segundo recomendações da norma NBR 5739 da ABNT. O equipamento de ensaio foi uma prensa hidráulica Solotest[®] com marcador digital e capacidade máxima de 100 toneladas disponível no Laboratório de ensaios físicos (LEFI) no Instituto Politécnico, que pode ser vista na figura 38.

Figura 38 - Prensa hidráulica para ensaios de compressão



Fonte: O autor, 2019.

Foram ensaiados um total de 14 corpos de prova cilíndricos, sendo que 2 corpos de prova foram ensaiados após 7 dias de cura e os outros 12 corpos de prova foram ensaiados após 28 dias de cura. O carregamento foi feito de modo contínuo sem aplicação de choques a uma taxa de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s até que se atingisse a ruptura do corpo de prova. Segundo a norma NBR 5739, a resistência a compressão desse ser calculada segundo a seguinte expressão:

$$f_c = \frac{4F_P}{\pi D_c^2} \quad (6)$$

Onde f_c é a resistência a compressão em MPa, F_p é a força máxima alcançada na compressão em N e D_C é o diâmetro do corpo de prova cilíndrico em mm.

2.2.6.1.1 Avaliação estatística do ensaio

O tratamento estatístico adotado para avaliar o desempenho deste ensaio é o proposto pela mesma norma que rege os ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos citada anteriormente.

O desvio padrão do ensaio (S_{ec}) é obtido a partir da média das amplitudes dos valores de resistência de todos os exemplares da amostra. A amplitude de cada exemplar deve ser dividida pelo coeficiente d_2 , relacionado na tabela 14, correspondente ao número de corpos de prova que o compõe, de acordo com a equação 7:

$$S_c = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{d_2 \cdot q} \quad (7)$$

Onde q é o número de exemplares da amostra e A_i é a amplitude dos valores de resistência, em MPa.

Tabela 14 - Valores para o coeficiente d_2

Quantidade de corpos de prova	Coefficiente d_2
2	1,128
3	1,693
4	2,059
5	2,326
6	2,534

Fonte: ABNT, 2007.

O coeficiente de variação dentro do ensaio (CV_{ec}) é obtido pela divisão do desvio padrão do ensaio pela resistência à compressão média alcançada (f_{cm}) de acordo com a equação 8:

$$CV_{ec} = \frac{S_{ec}}{f_{cm}} \quad (8)$$

A avaliação da eficiência do ensaio é concedida através dos conceitos atribuídos para cada faixa de resultados possíveis dentro do coeficiente de variação do ensaio, como pode ser visto na tabela 15.

Tabela 15 - Avaliação da eficiência do ensaio

Excelente	Muito bom	Bom	Razoável	Deficiente
$Cv_{ec} \leq 3,0$	$3,0 < Cv_{ec} \leq 4,0$	$4,0 < Cv_{ec} \leq 5,0$	$5,0 < Cv_{ec} \leq 6,0$	$6,0 < Cv_{ec}$

Fonte: ABNT, 2007.

2.2.6.2 Ensaio de resistência à flexão

Sabe-se que o concreto não é um tipo de material projetado para resistir a um esforço de tração aplicado diretamente, porém o conhecimento desta informação é importante para estimar uma faixa de tensões na qual as trincas irão começar a se desenvolver (NEVILLE, 2012).

Os ensaios de tração direta são dificilmente utilizados para avaliação do comportamento em tração do concreto. Isso está relacionado a introduções de tensões secundárias que não podem ser ignoradas e que podem gerar deformações nos corpos de prova passíveis de invalidar o procedimento. Para isso estão disponíveis os ensaios de resistência à tração por divisão de amostras cilíndricas de concreto, regido pela norma ASTM C 496, e os teste de resistência à flexão de três pontos, regido pela norma ASTM C 78 (MEHTA; MONTEIRO, 2005).

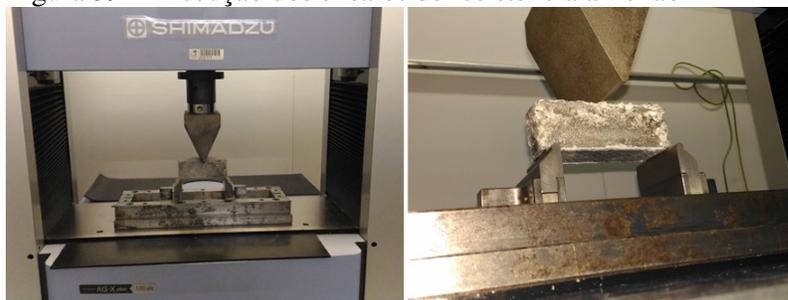
Para os testes de resistência à flexão de três pontos, um elemento de concreto não reforçado, denominado concreto plano, é submetido à flexão por meio da aplicação de uma carga simétrica entre dois pontos até que ocorra a falha do corpo de prova. A tensão de tração máxima alcançada na parte inferior do corpo de prova é denominada módulo de ruptura (σ_R) (NEVILLE, 2012).

O módulo de ruptura pode ser determinado a partir da equação 9, onde P_f é a carga máxima na flexão aplicada pelo equipamento de ensaio em N. S_L é o comprimento de Spam livre, b_p é largura do prisma e d_p é a altura do prisma, sendo todas medidas em mm.

$$\sigma_R = \frac{P_f S_L}{b_p d_p^2} \quad (9)$$

O ensaio de resistência à flexão de três pontos foi realizado na máquina universal de ensaios Shimadzu AGX-Plus no Laboratório de Tecnologia de Polímeros (TECPOL) do Instituto Politécnico da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (IPRJ). A velocidade de aproximação do travessão foi de 0,25 mm/min para que a ruptura dos corpos de prova acontecesse após decorridos 60 segundos de ensaio conforme especificado pelo comitê RILEM 50 – Fracture mechanics of concrete de 1985. A figura 39 apresenta o momento de execução de um dos ensaios de resistência à flexão.

Figura 39 - Execução dos ensaios de resistência à flexão



Fonte: O autor, 2019.

2.2.6.2.1 Análise estatística

Para auxiliar a investigação dos fatores que estão relacionados com as tensões de ruptura, forças máximas alcançadas e deslocamentos atingidos, assim como servir de base para futuros estudos que sigam os mesmos procedimentos, são apresentadas as técnicas de avaliação estatística adotadas.

A grande maioria das normas voltadas para o ensaio de resistência à flexão de corpos de prova de concreto, seja de 3 ou 4 pontos, não sugere um estudo estatístico particular. A norma ASTM C 78, por exemplo, apenas cita o coeficiente de variação estatística levando em consideração variáveis como operador do equipamento e local onde são realizados os testes.

Segundo a norma referida, o coeficiente de variação estatística dependente da resistência não deve exceder 16% quando um mesmo operador executa os ensaios da amostra considerada e para casos onde os ensaios são executados em mais de um laboratório, o coeficiente variação estatístico não deve exceder 19%.

Apenas um operador executou os ensaios no presente estudo, porém o programa experimental proposto esteve sujeito a outras variáveis não contempladas pela norma. Sendo assim, estipulou-se um coeficiente de variação máximo de 19% para a comparação de uma mesma configuração entre os lotes fabricados.

A partir das equações 10, 11, 12 e 13, foram avaliados a média (\bar{x}), o desvio padrão (s) e o coeficiente de variação estatística (CV_{ef}) referente as medidas das tensões de ruptura máximas para cada configuração. Os resultados que apresentaram valores significativamente afastados dos valores médios foram eliminados seguindo os critérios do Teste do valor extremo, também conhecido como teste de Grubbs. Seja m o número total de corpos de prova de uma amostra e x_i o valor do parâmetro considerado na avaliação para sua respectiva posição $i = 1, 2, 3, \dots, n'$.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^m x_i}{m} \quad (10)$$

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2}{(m - 1)} \quad (11)$$

$$s = \sqrt{s^2} \quad (12)$$

$$CV_{ef} = \frac{s}{\bar{x}} \quad (13)$$

O teste de Grubbs foi elaborado com o objetivo de detectar valores extremos em amostras experimentais de forma que fosse possível testar sua significância estatística. Um *outlier* é uma espécie de observação remota que aparenta desviar-se acentuadamente de outras observações que compõem a amostra. Esse tipo de ocorrência pode ser uma mera manifestação de variabilidade aleatória, mas também pode estar associado a uma fenômeno físico, um erro de procedimento experimental, cálculos equivocados, registro numérico errôneo entre outros.

No teste de Grubbs é utilizado a estatística Z , como pode ser vista na equação 14:

$$Z = \frac{|x_i - \bar{x}|}{s} \quad (14)$$

Neste caso, x_i é uma observação da amostra onde existe a incerteza que esta seja o valor extremo. Existem duas hipóteses que devem ser consideradas. Para um nível de significância α , H_0 é a hipótese onde x_i é uma observação considerada um valor extremo ou H_1 onde x_i não é observação considerada como um valor extremo. A hipótese H_0 é aceita quando $Z > Z_c$, que é um valor crítico tabelado baseado em uma distribuição normal Z (Anexo A).

A detecção de outliers por meio deste teste baseia-se em critérios para populações normalmente distribuídas. Quando os dados avaliados não fazem parte de uma distribuição Gaussiana, as probabilidades relacionadas a convergência desse teste serão diferentes e resultados confiáveis não são garantidos (GRUBBS, 1969). Os cálculos para o teste de Grubbs foram realizados através do software QuickCalcs da GraphPad Software®.

Devido à baixa complexidade de cálculo e sensibilidade adequada para avaliar amostra de variados tamanhos, mesmo com baixas populações (SHAPIRO; WILK, 1965), optou-se pela utilização do método Shapiro-Wilk para verificar a aderência a distribuição normal dos dados referentes aos ensaios de resistência a flexão.

A partir deste procedimento é calculado a estatística W capaz de avaliar se uma amostra aleatória de tamanho k provém de uma distribuição normal. A partir da equação 15, obtém-se valor de W , que deve ser comparado a um valor de W tabelado (Anexo C).

$$W = \frac{b_w^2}{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2} \quad (15)$$

Em que b_w é determinada da seguinte forma: se a população k é par, utiliza-se a equação 16. Para uma população k ímpar, a equação 17 é a mais adequada.

$$b_w = \sum_{i=1}^{n/2} a_{(n-i+1)} * (x_{(n-i+1)} - x_i) \quad (16)$$

$$b_w = \sum_{i=1}^{(n+1)/2} a_{(n-i+1)} * (x_{(n-i+1)} - x_i) \quad (17)$$

Onde $a_{(n-i+1)}$ são constantes tabeladas obtidas pelas médias, variâncias e covariâncias estatísticas de uma ordem de uma amostra aleatória de tamanho k normalmente distribuída (Anexo B).

Também é necessário estimar um nível de significância estatística α para a realização do teste de hipóteses. A partir de um valor-p para teste das hipóteses referentes a existência da normalidade. Dessa forma tem-se a hipótese nula H'_0 caso o valor-p $\geq \alpha$ e a hipótese não nula para H'_1 para o valor-p $\leq \alpha$. Para hipótese nula H'_0 , a amostra provém de uma distribuição normal e para hipótese não nula H'_1 , a amostra não provém de uma distribuição normal (LOPES; BRANCO; SOARES, 2013). Os cálculos foram realizados a partir do software Origin 8.5 da OriginLab®.

2.2.6.3 Caracterização do material compósito de reforço

O método empregado para a fabricação dos corpos de prova respeitam os parâmetros estabelecidos no desenvolvimento do reforço mostrado anteriormente. Os cortes da manta de fibra de carbono foram retirados do mesmo rolo utilizado na confecção do reforço, assim como a resina de laminação foi proveniente do mesmo lote de resina utilizada anteriormente. O processo de fabricação empregado foi a laminação manual.

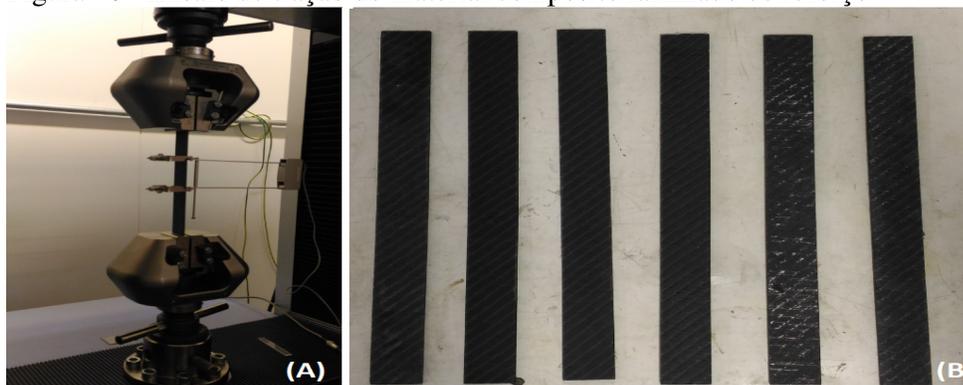
A proporção dos componentes A e B da resina de laminação Pipe Fix ® se manteve 5,7:1,0. Após o fim da fabricação, o laminado foi colocado em uma bolsa para aplicação de vácuo por aproximadamente 6 horas em um total de 24 horas de cura. As dimensões dos corpos de prova são as únicas variações observadas, visto que cada norma possui sua padronização.

2.2.6.3.1 Ensaio de tração do material de reforço

Os testes para avaliação das propriedades em tração do material compósito projetado foram realizados segundo as recomendações da norma ASTM D 3039. Foram utilizadas um total de 5 camadas de manta de fibra de carbono para que fosse alcançada a espessura recomendada. A quantidade de resina de laminação utilizada foi de 186 g, sendo 158,32 g do componente A e 27,76 g do componente B. As dimensões dos corpos de prova sugeridas para um compósito bidirecional são a largura $w_t = 25$ mm, comprimento $L_t = 250$ mm e a espessura $e_t = 2,5$ mm. A velocidade de aplicação de carga foi de 2,0 mm/min. Para avaliar a

deformação, extensômetros foram posicionados a uma distância de 50 mm ao longo do comprimento do corpo de prova, como pode ser visto na figura 41.

Figura 40 - Ensaio de tração do material compósito laminado de reforço

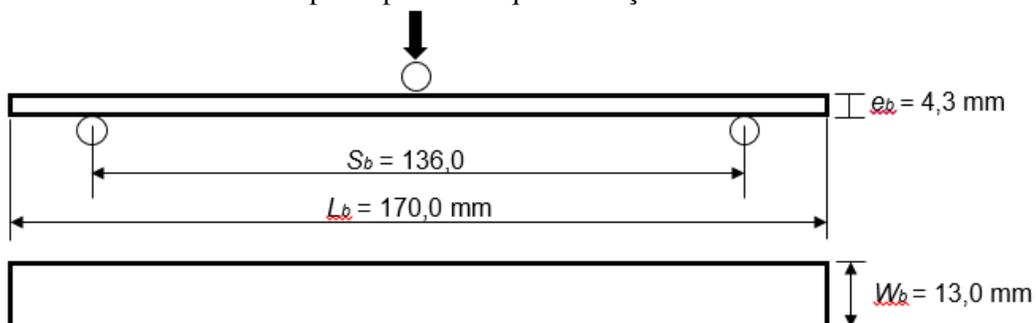


Legenda: (A) – Equipamento configurado para o ensaio; (B) – Corpos de prova padronizados
Fonte: O autor, 2019.

2.2.6.3.2 Ensaio de resistência à flexão do material de reforço

Os testes para avaliação das propriedades em flexão do material compósito projetado foram realizados segundo as recomendações da norma ASTM D 7264. A razão entre o comprimento de $Span$ S_b e a espessura dos corpos de prova adotada foi de 32:1. Foram utilizadas um total de 7 camadas para que se alcançasse uma espessura média e_b mínima proposta pela norma de 4,0 mm. Pequenas variações na espessura do laminado acabado não causam erros nos resultados desde que a razão de 32:1 seja mantida. É recomendado também que o comprimento total de L_b seja 20% maior que o comprimento do $Span$.

Figura 41 - Dimensões do corpo de prova e esquematização do ensaio de resistência à flexão



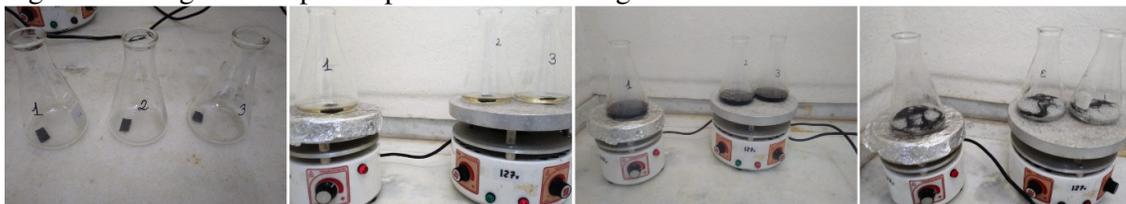
Fonte: O autor, 2019.

2.2.6.3.3 Digestão ácida (percentual de fibras)

Considerou-se o procedimento B da norma ASTM D 3171 para a determinação do percentual volumétrico de fibras e resina do laminado desenvolvido para utilização neste estudo. As etapas são descritas a seguir e ilustradas na figura 42:

- a) Utilizou-se uma balança analítica para realizar a pesagem de 3 pequenas amostras com aproximadamente 3,0 g de laminado.
- b) As amostras foram colocadas dentro de um banho aquecido com 20 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) por volta de de três horas.
- c) Para oxidar a matriz, foram introduzidos cerca de 25 ml de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) com concentração de 30% à solução
- d) Com o auxílio de uma bomba de vácuo e um cadinho poroso, filtrou-se a solução. As fibras foram lavadas com acetona e água destilada para eliminar qualquer resíduo de ácido ou resina.
- e) Aqueceu-se uma estufa e manteve-se a temperatura em 100 °C para que as fibras fossem secas.
- f) Após o fim da secagem, as fibras foram novamente pesadas.

Figura 42 – Algumas etapas do procedimento de digestão ácida



Fonte: O autor, 2019.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resistência à compressão axial

A avaliação do traço de referência foi realizada em duas etapas. Dos 14 corpos de prova obtidos, 2 foram avaliados aos 7 dias de cura (CP07) e 12 foram avaliados aos 28 dias de cura (CP28). A tabela 16 mostra os resultados dos ensaios.

Tabela 16 - Resistência à compressão axial para o traço de referência

Referência	CPs	Carga (tf)	Resistência à compressão (MPa)
CP07	2	9,98 ± 0,77	12,45 ± 0,96
CP28	12	20,51 ± 1,62	25,59 ± 2,02

Fonte: O autor, 2019.

A resistência à compressão axial média verificada nos ensaios alcançou valores médios próximos ao valor de 25 MPa proposto para o concreto no período de 28 dias em cura. Dessa forma, decidiu-se utilizar a mesma proporção de constituintes de concreto utilizadas no concreto de referência para todos os lotes de corpos de prova prismáticos que foram fabricados posteriormente.

A avaliação estatística do desempenho dentro do ensaio proposta pela norma NBR 5739 demonstrou uma boa distribuição dos resultados, onde o coeficiente de variação estatístico para o ensaio apresentou o valor $CV_{ec} = 0,097$, sendo este considerado excelente pela norma referida.

3.2 Tratamento superficial

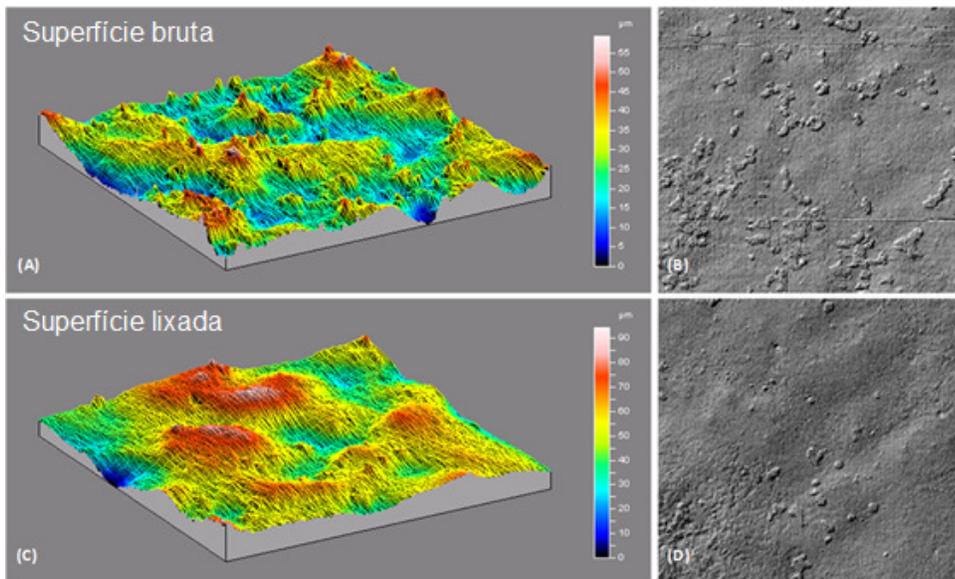
São apresentados aqui alguns resultados referentes às análises superficiais realizadas antes e após o lixamento da superfície dos corpos de prova que receberam a camada adesiva para a ligação entre concreto e o material compósito laminado. Nas figuras 43 e 44 são apresentados os perfis de rugosidade em 2 e 3 dimensões para dois corpos de prova do primeiro lote antes e após o lixamento.

Tabela 17 - Parâmetros de rugosidade para o corpo de prova L1V3R2

Situação	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)	R Δ a (Rad)	R Δ q (Rad)
Bruto	2,30 \pm 0,51	2,93 \pm 0,61	12,80 \pm 2,50	0,103 \pm 0,03	0,211 \pm 0,05
Lixado	1,60 \pm 0,32	2,08 \pm 0,42	9,33 \pm 1,94	0,105 \pm 0,02	0,157 \pm 0,04

Fonte: O Autor, 2019.

Figura 43 - Perfis de rugosidade para o corpo de prova L1V3R2 antes e após o lixamento.



Fonte: O autor, 2019.

A partir da tabela 17, para o corpo de prova L1V3R2, percebe-se que os parâmetros de rugosidade Ra, Rq e Rz sofreram uma pequena diminuição dos seus valores médios. No caso do parâmetro Rz, observou-se a diminuição de seu valor médio devido a eliminação de parte dos maiores picos, ocasionado um nível de uniformidade da superfície superior na condição após o lixamento, como pode ser comprovado pela comparação das figura 44 (D) em relação à figura 44 (B). Já o parâmetro R Δ a não sofreu alteração considerável, diferente do parâmetro R Δ q, que teve sua magnitude reduzida aproximadamente 25,59%.

Na tabela 18, diferente do observado para o corpo de prova L1V3R2, os parâmetros de rugosidade Ra, Rq e Rz para o corpo de prova L1V4R3 apresentaram um incremento no seu valor médio após a execução do lixamento. Como pode ser visto na figura 44 (B), a superfície anterior ao lixamento apresentava uma maior homogeneidade em relação à situação posterior.

Percebeu-se que neste caso o lixamento tornou a superfície mais heterogênea com surgimento de vales profundos que influenciaram no aumento o valor do parâmetro Rz. A remoção de agregados miúdos e camadas fracas de concreto próximos à superfície são as

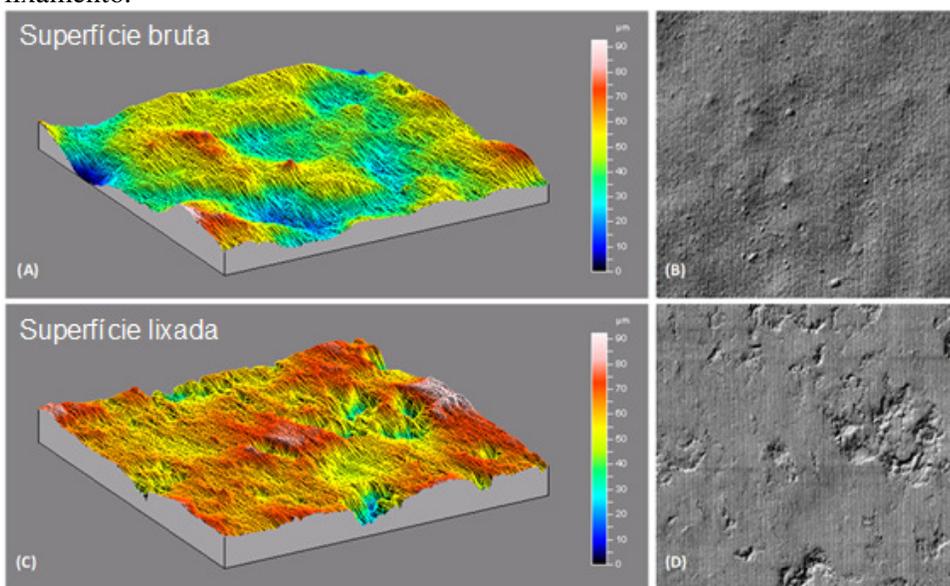
principais evidências desta transformação. Também pode observar-se o aumento dos valores médios dos parâmetros $R\Delta a$ e $R\Delta q$.

Tabela 18 - Parâmetros de rugosidade para o corpo de prova L1V4R3

Situação	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)	$R\Delta a$ (Rad)	$R\Delta q$ (Rad)
Bruto	$1,62 \pm 0,39$	$2,03 \pm 0,48$	$9,07 \pm 2,01$	$0,121 \pm 0,01$	$0,163 \pm 0,03$
Lixado	$2,56 \pm 1,03$	$3,29 \pm 1,28$	$14,80 \pm 5,08$	$0,133 \pm 0,03$	$0,208 \pm 0,05$

Fonte: O autor, 2019.

Figura 44 - Perfis de rugosidade para o corpo de prova L1V4R3 antes e após o lixamento.



Fonte: O autor, 2019.

A partir da tabela 19 para o corpo de prova L2V4R5, percebe-se um decréscimo em relação aos valores médios para os parâmetros Ra, Rq e Rz, mas que não devem ser associados a uma grande influência na rugosidade superficial, devido aos altos desvios observados.

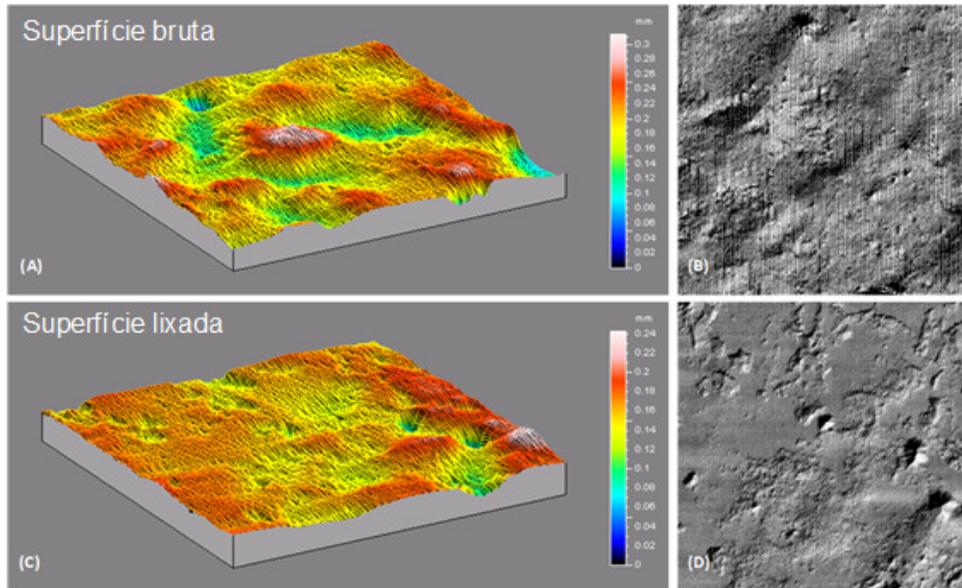
Com uma rápida inspeção das figuras 45 (B) e 45 (D), é possível notar uma maior regularidade superficial na condição lixada, porém há evidências do surgimento de vales profundos devido à remoção de pequenos agregados próximos à superfície. Os parâmetros $R\Delta a$ e $R\Delta q$ sofreram maior influência neste caso. Houve uma redução de aproximadamente 48,13% para $R\Delta a$ e 49,21% para $R\Delta q$.

Tabela 19 - Parâmetros de rugosidade para o corpo de prova L2V4R5

Situação	Ra(μm)	Rq(μm)	Rz(μm)	R Δ a (Rad)	R Δ q (Rad)
Bruto	5,51 \pm 1,62	6,79 \pm 2,07	27,50 \pm 8,67	0,295 \pm 0,04	0,443 \pm 0,09
Lixado	4,10 \pm 1,12	5,34 \pm 1,64	22,60 \pm 7,14	0,153 \pm 0,02	0,225 \pm 0,05

Fonte: O autor, 2019.

Figura 45 - Perfis de rugosidade para o corpo de prova L2V4R5 antes e após o lixamento



Fonte: O autor, 2019.

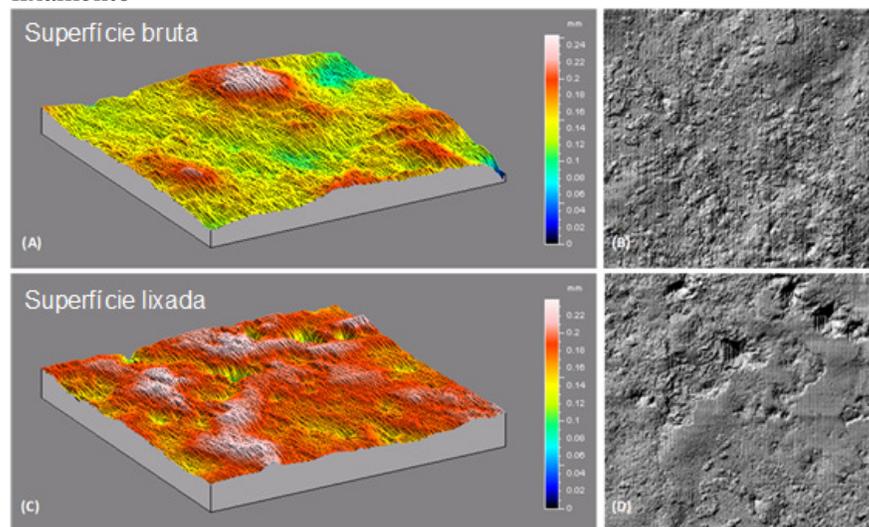
Na tabela 20, para o corpo de prova L2V4R6 um incremento não muito significativo dos valores para os parâmetros Ra, Rq, Rz e R Δ a, porém não houve alteração considerável nos valor do parâmetro R Δ q. O parâmetro Rz foi o que sofreu maior alteração devido à grande variação observada pelo seu elevado desvio padrão. Mais uma vez, o surgimento de vales mais profundos pode ter contribuído para que este valor fosse alterado desta maneira. A figura 46 ilustra melhor as alterações da superfície.

Tabela 20 - Parâmetros de rugosidade para o corpo de prova L2V4R6

Situação	Ra(μm)	Rq(μm)	Rz(μm)	R Δ a (Rad)	R Δ q (Rad)
Bruto	4,48 \pm 0,78	5,54 \pm 0,95	24,00 \pm 3,94	0,257 \pm 0,03	0,354 \pm 0,04
Lixado	4,94 \pm 2,12	6,33 \pm 2,88	26,70 \pm 11,70	0,227 \pm 0,05	0,354 \pm 0,09

Fonte: O autor, 2019.

Figura 46 - Perfis de rugosidade para o corpo de prova L2V4R6 antes e após o lixamento



Fonte: O autor, 2019.

O lixamento realizado nos corpos de prova selecionados demonstram alterações na geometria das superfícies dos mesmos, porém não é possível concluir com precisão a eficácia deste processo no que se diz respeito a rugosidade superficial devido a alternância que ocorre na magnitude dos parâmetros avaliados.

Esse comportamento contrastante é comum para a superfície do concreto, visto que um mesmo método de remoção das irregularidades da camada externa de concreto pode levar a superfícies de acabamento muito diferentes e, portanto, a diferentes níveis de rugosidade. Não só o tipo de tratamento escolhido, mas fatores como a pressão aplicada na superfície, o tempo de operação e a perícia do técnico são importantes (SANTOS; JÚLIO, 2013).

Tabela 21 - Faixa de valores para os parâmetros de rugosidade avaliados

Referência	Ra(μm)	Rq(μm)	Rz(μm)	R Δ a (Rad)	R Δ Q (Rad)
Lote 1 bruto	1,62 – 4,25	2,03 – 5,36	9,07 – 22,50	0,121 – 0,223	0,163 – 0,360
Lote 1 Lixado	1,63 – 4,68	2,08 – 5,86	9,33 – 23,50	0,105 – 0,176	0,157 – 0,257
Lote 2 bruto	4,03 – 6,74	4,93 – 8,73	19,80 – 38,00	0,225 – 0,396	0,319 – 0,604
Lote 2 Lixado	3,97 – 7,67	5,09 – 9,72	21,40 – 38,70	0,153 – 0,325	0,225 – 0,471

Fonte: O autor, 2019.

A partir da tabela 21, verificou-se a que a faixa de resultados dos parâmetros de rugosidade avaliados para o segundo lote apresentam valores maiores que os exibidos pelo primeiro lote.

Com tratamentos superficiais mais abrasivos em suas amostras de concreto, Grigoriadis (2015) obteve valores de R Δ a entre 0,79 e 1,03 e valores de R Δ q entre 0,77 e

1,03. Esses valores são superiores ao observados no presente estudo devido à natureza do tratamento superficial.

A faixa de valores de $R\Delta a$ e $R\Delta q$ para o lote 2 antes e após ao lixamento é superior aos valores observados no lote 1. Isso pode ser uma evidência para um modo de falha ocorrido no primeiro lote que não foi observada no segundo, relacionada ao descolamento prematuro da camada adesiva da superfície de concreto e que será abordado adiante. Apesar do objetivo deste trabalho não estar focado na avaliação dos tratamentos de superfície, acredita-se que novos estudos direcionados a este campo são extremamente necessários. A variação dos tipos de tratamentos assim como outros métodos de avaliação da superfície devem ser utilizados. Um número maior de abordagens quantitativas devem ser realizadas, pois a literatura correlata carece destes dados em um âmbito geral (YIN; FAN, 2018).

3.3 Comportamento mecânico do material de reforço

As tabelas 22 e 23 apresentam as propriedades avaliadas, pelos ensaios mecânicos de tração e flexão, do material compósito laminado utilizado para fabricação do reforço utilizado nos corpos de prova.

Tabela 22 - Propriedades em tração do material compósito laminado – Norma ASTM D 3039.

Módulo de Elasticidade Longitudinal (GPa)	CPs	Resistência à tração (MPa)	Deslocamento longitudinal (mm)	Deformação na ruptura (%)
45,80 ± 2,83	6	799,94 ± 68,72	8,96 ± 0,48	0,18 ± 0,01

Fonte: O autor, 2019.

Tabela 23 - Propriedades em flexão do material compósito laminado – Norma ASTM D 7264.

Módulo de Elasticidade em flexão (GPa)	CPs	Resistência à flexão (MPa)	Carga máxima (N)	Deslocamento (%)
32,81 ± 1,83	8	459,05 ± 28,86	532,66 ± 37,18	1,44 ± 0,10

Fonte: O autor, 2019.

Se comparado com um PRFC comercial, específico para as aplicações em reparos de concreto por meio da colagem externa, as propriedades do laminado utilizado no presente estudo são inferiores. A tabela 24 apresenta algumas propriedades do PRFC pultrudado fabricado pela S&P, denominado C-Laminate®, obtidas no manual do produto disponibilizado pelo fornecedor.

Tabela 24 - Algumas propriedades do PRFC C-Laminate ®

Módulo de Elasticidade Longitudinal (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Conteúdo de fibras (% vol)	Deformação na ruptura (%)
≥ 170	≥ 2800	≥ 68	≥ 1,6

Fonte: O fornecedor, 2019.

O percentual volumétrico de fibras do reforço desenvolvido para o estudo se mostrou coerente com o percentual volumétrico de fibras informado pelo fabricante do reforço comercial, como mostrado na tabela 24. Através do procedimento de digestão ácida, regido pela norma ASTM D 3171, determinou-se que o percentual volumétrico de fibras, que variou entre 73,30% e 75,56%. Além disso, foi possível determinar o módulo de elasticidade na direção longitudinal do compósito de forma teórica.

A partir do modelo da regra das misturas (AGARWAL; BROUTMAN; CHANDRASHEKHARA, 2006), o módulo elástico teórico encontrado é de aproximadamente 49,14 GPa. Este valor é cerca de 7,29% superior ao valor experimental obtido, como mostrado na tabela 22, e mostra que os valores experimentais e teóricos para o módulo de elasticidade longitudinal são próximos. Dessa forma, nota-se a eficácia do procedimento de laminação manual utilizado para a fabricação do material de reforço.

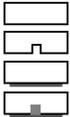
Não há evidências que as propriedades do material utilizado aqui como reforço tenham comprometido os resultados dos testes. O fornecedor do PRFC comercial citado anteriormente garante que quando utilizado segundo suas recomendações, a falha do conjunto ocorrerá a partir do concreto. Nos testes realizados para este estudo não houve a ruptura de nenhum reforço, sendo todas as falhas causadas por ruptura do concreto ou devido ao comprometimento da interface concreto/adensivo, como descrita nas seções subsequentes.

3.4 Comportamento em flexão

3.4.1 Configurações de reforço e reparo

A tabela 25 apresenta os resultados do primeiro lote. Os elementos de concreto que receberam o reforço e o reparo foram colados com o adesivo S&P 220, que é específica para a finalidade de reforços de estruturas de concreto

Tabela 25 - Resultados referentes ao primeiro lote utilizando o adesivo S&P 220.

Grupo	Cps	Força de ruptura (kN)	Tensão nominal (MPa)	Deslocamento (mm)	
L1V1	7	3,01 ± 0,16	7,81 ± 0,42	0,64 ± 0,12	
L1V2	7	1,48 ± 0,08	3,84 ± 0,22	0,32 ± 0,14	
L1V3	5	7,82 ± 0,46	20,30 ± 1,19	1,40 ± 0,12	
L1V4	7	9,54 ± 1,20	24,77 ± 3,11	1,09 ± 0,37	

Fonte: O autor, 2019.

Em relação aos elementos de controle, sem a presença de falhas, houve redução a cerca de 50,83% da resistência à flexão quando introduzido o entalhe. A diminuição da resistência era esperada, visto que a seção transversal dos corpos de prova na zona de processo de fraturamento da configuração V2 é inferior a esta mesma região na configuração V1.

Além disso, o entalhe cria uma descontinuidade que atua localmente como um concentrador de tensões, diminuindo a resistência à flexão dos corpos de prova. É notado também que houve redução na deflexão, ocasionando deslocamentos aproximadamente 50% menores. A questão dos deslocamentos será abordada adiante.

Quando o objetivo da aplicação do reforço foi apenas o aumento da carga resistente, no grupo L1V3, houve um incremento de resistência à flexão considerável de aproximadamente 2,59 vezes em relação ao grupo L1V1. A adição do material compósito laminado ocasiona um aumento de resistência à flexão e um acréscimo notável aos deslocamentos máximos do corpo de prova. Nota-se que houve um aumento na deflexão resultando em deslocamentos de aproximadamente 2,19 vezes em referência às condições de controle.

Baseado em relatos da literatura, esse aumento de carga máxima já era esperado. Conforme verificado por Ferrari, Padaratz e Loriggio (2002), houve um aumento da tensão máxima de aproximadamente 66% quando vigas de concreto armado foram reforçadas com material compósito laminado de fibra de carbono. Sabe-se que no concreto armado, as vigas possuem armaduras metálicas internas que dividem as tensões de tração com o reforço de material compósito laminado. No presente estudo, todo aumento de carga é proporcionado apenas pelo material compósito laminado, visto que não foi inserido qualquer reforço metálico e por isso o aumento aqui alcançado foi superior ao verificado usualmente na literatura.

Com o objetivo de reparo, a aplicação do reforço forneceu resultados interessantes. Em comparação ao grupo L1V2, o grupo L1V4 onde um entalhe foi preenchido com o adesivo e houve a colagem do material compósito laminado na face submetida à tensão de tração, teve sua resistência à flexão elevada cerca de 6,45 vezes. Também foi observado o aumento dos deslocamentos em aproximadamente 3,41 vezes. Se comparados os grupos L1V1 e L1V4, os aumentos de carga são da ordem de aproximadamente 3,17 vezes.

Os valores de resistência à flexão obtidos para o grupo L1V4 são cerca de 22,02% superiores aos verificados no grupo L1V3, porém com deslocamentos cerca de 22,14% inferiores. O reparo funcionou de forma eficiente, pois foi capaz de superar os resultados para a condição de aumento de resistência. O principal indicativo deste comportamento é a presença do entalhe preenchido na configuração L1V4.

Como o concreto é um material que possui baixa resistência à tração, muito inferior à resistência à tração dos adesivos epóxi, o preenchimento do entalhe criou uma região com maior resistência à tração. Além de retardar o processo de iniciação do fissuramento outros dois efeitos são alcançados: maiores valores de resistência à tração são atingidos da mesma maneira que uma maior deflexão máxima é permitida (LAU; ZHOU, 2001).

A introdução de um adesivo em um entalhe também proporciona o aumento da área de interface concreto/adesivo, que conseqüentemente aumenta a área de colagem e possibilita uma redistribuição das tensões de forma mais eficiente (MOSTOFINEJAD; SHAMELI, 2013).

Quando o entalhe de vigas de concreto em escala reduzida foram preenchidas com adesivos epóxi e reforçadas com material compósito laminado de fibra de vidro com 2 camadas, conforme apresentado por Lau e Zhou (2001), houve o aumento da resistência à flexão em aproximadamente 66,39%. Apesar da escala reduzida, essas vigas possuíam maiores dimensões que os corpos de prova utilizados no presente estudo. Efeitos não considerados aqui como o efeito do peso próprio da viga pode ser um dos principais pontos que diferenciam os resultados.

A tabela 26 apresenta os resultados do segundo lote ensaiado. Neste lote, os elementos de concreto que receberam o reforço e o reparo foram colados com o adesivo NVT 201E, que é muito utilizada em colagem de substratos metálicos. Sua utilização em reparo de concretos está sendo explorada pela primeira no presente estudo.

Tabela 26 - Resultados referentes ao segundo lote utilizando o adesivo NVT 201E

Grupo	Cps	Força de ruptura (kN)	Tensão nominal (MPa)	Deslocamento (mm)	
L2V1	7	3,05 ± 0,18	7,91 ± 0,46	0,63 ± 0,20	
L2V2	7	1,60 ± 0,12	4,14 ± 0,30	0,69 ± 0,58	
L2V3	7	9,56 ± 1,17	24,83 ± 3,04	1,01 ± 0,25	
L2V4	7	10,52 ± 0,96	27,32 ± 2,50	1,24 ± 0,26	

Fonte: O autor, 2019.

Quando a resistência dos elementos que possuem falha é comparada com os que não possuem, há perda de aproximadamente 47,66% da resistência à flexão. É visto que há um leve aumento no deslocamento observado de aproximadamente 9,52%.

A comparação dos grupos L2V1 e L2V3 mostrou um incremento de aproximadamente 3,14 vezes a capacidade resistente da situação reforçada em relação à situação inicial. Nota-se que há um aumento no deslocamento cerca de 1,60 vezes.

Na condição de reparo, resultados significativos são observados. Em relação ao grupo L2V2, há um aumento de resistência à flexão de aproximadamente 6,60 vezes no grupo L2V4. Os deslocamentos observados no momento da falha são aproximadamente 1,79 vezes maiores. A eficácia do reparo também é comprovada neste lote, visto que o grupo L2V4 apresentou resultados cerca de 10,21% superiores ao grupo L2V3.

Quando os grupos L2V1 e L2V4 são comparados, percebe-se que há o incremento de resistência à flexão de aproximadamente 3,45 vezes com aumento nos deslocamentos de aproximadamente 1,97 vezes. Resultado este que repete o comportamento de aumento de resistência à flexão junto com o aumento dos deslocamentos observados no primeiro lote.

Independentemente do tipo de adesivo utilizado, percebe-se que as operações de reparo resultaram em aumentos de resistência superiores aos incrementos verificados na situação de reforço. Quanto ao tipo de adesivo utilizado, percebe-se à primeira vista que a utilização do adesivo NVT 201E fornece resultados brevemente superiores a utilização do adesivo S&P 220 em ambos os tipos de operação.

3.4.2 Preenchimento do entalhe

Um terceiro lote de corpos de prova avaliou apenas de uma situação intermediária. Neste caso, os entalhes nos corpos de prova foram preenchidos com os adesivos S&P 220 (L3V5) e NVT 201E (L3V6). A tabela 27 apresenta o resultados obtidos no ensaio do terceiro lote.

Tabela 27 - Resultados referentes ao terceiro lote com utilização de ambos adesivos.

Grupo	Cps	Força de ruptura (kN)	Tensão nominal (MPa)	Deslocamento (mm)	
L3V1	7	2,71 ± 0,09	7,04 ± 0,24	0,71 ± 0,21	
L3V2	7	1,44 ± 0,11	3,74 ± 0,30	0,45 ± 0,12	
L3V5	7	3,35 ± 0,39	8,71 ± 1,03	0,70 ± 0,21	
L3V6	7	4,14 ± 0,18	10,73 ± 0,45	0,64 ± 0,11	

Fonte: O Autor, 2019

Em relação aos corpos de prova sem a presença do entalhe, há perda de aproximadamente 46,88% da resistência à flexão quando introduzido o entalhe. A redução dos deslocamentos observados foi de aproximadamente 36,62%.

A resposta ao preenchimento do entalhe com os dois tipos de adesivo demonstram um resultado positivo. Comparando a configuração de controle, há incrementos da resistência à flexão que variam de aproximadamente 23,72% com o adesivo S&P 220 e 52,41% com o adesivo NVT 201E. A condição alcançada pelo grupo L3V6 é superior cerca de 23,19% à condição representada pelo grupo L3V5, o que mostra certa vantagem na utilização do adesivo NVT 201E para a condição de reparos.

Comparando o grupo L2V2 com o grupo nas quais o entalhe recebeu o adesivo, observa-se que a proporção do reparo é muito mais significativa. Os resultados variam entre um incremento de aproximadamente 2,33 vezes com o adesivo S&P 220 e cerca de 2,87 vezes com o adesivo NVT 201E.

Apesar do comportamento da viga ser restaurado após o preenchimento do entalhe com adesivo epóxi, Lau e Zhou (2001) não observaram grandes mudanças em relação ao aumento da resistência em comparação com o corpo de prova íntegro. A restauração da resistência à flexão foi cerca de 0,6% em relação ao corpo de prova íntegro e de 29,46% em relação ao corpo de prova entalhado. A menor taxa de reforço alcançada pelos pesquisadores em relação aos resultados aqui apresentados pode ser explicada com base em uma variável importante: dimensão das vigas utilizadas nos dois estudos.

Os corpos de prova prismáticos utilizados por Lau e Zhou (2001) possuíam as dimensões de 154 mm na altura e largura por 508 mm de comprimento, frente aos corpos de prova do presente estudo com 38 mm de altura e largura por 101 mm de comprimento. Ambos não possuíam armadura metálica interna, porém o efeito do peso próprio pode ter sido decisivo na taxa de aumento de resistência em ambos tipos de corpos de provas.

3.5 Abordagem estatística

3.5.1 Verificação da normalidade dos lotes

Após a realização dos ensaios de resistência à flexão de todos os corpos de prova ao longo das 6 configurações, conforme introduzidas na seção 2.2.1, foi realizado o teste de *Shapiro-Wilk* referente aos valores das tensões máximas e deslocamentos atingidos. Esse teste tem como objetivo a verificação da normalidade dos dados obtidos, para que possam ser verificadas a presença de *outliers* pelo Test do valor máximo, ou teste de *Gubbs*.

Cada configuração em seu respectivo lote de referência foi considerada como uma amostra de população $k = 8$ e análise foi realizada a um nível de significância $\alpha = 0,05$, esperando-se estatística $W \geq 0,818$, conforme tabela apresentada no anexo C. Além disso, o *valor-p* $\geq \alpha$ para todos os casos.

As tabelas 28 e 29 apresentam os valores da estatística W e o valor p para os resultados referentes às tensões máximas verificadas e a deflexão representada pelos deslocamentos máximos atingidos. Devido à igualdade existente entre os resultados para forças e tensões, por motivo de praticidade, apresenta-se apenas os valores referentes às tensões máximas alcançadas.

Tabela 28 - Resultados da verificação de normalidade para distribuição de tensões máximas alcançadas.

Grupo	W	Valor-p	Grupo	W	Valor-p	Grupo	W	Valor-p
L1V1	0,938	0,592	L2V1	0,892	0,244	L3V1	0,938	0,592
L1V2	0,918	0,421	L2V2	0,863	0,127	L3V2	0,877	0,178
L1V3	0,925	0,474	L2V3	0,863	0,129	L3V5	0,906	0,324
L1V4	0,909	0,352	L2V4	0,952	0,729	L3V6	0,923	0,454

Fonte: O autor, 2019.

Os dados para as forças e tensões são idênticos e apresentam valores da estatística $W \geq 0,818$ e o $valor-p \geq 0,05$ demonstrando que para um nível de significância de 5%, todos os dados obtidos provêm de uma população normalmente distribuída.

Tabela 29 - Resultados da verificação de normalidade para os deslocamentos máximos atingidos

Grupo	W	Valor-p	Grupo	W	Valor-p	Grupo	W	Valor-p
L1V1	0,855	0,108	L2V1	0,951	0,724	L3V1	0,855	0,108
L1V2	0,944	0,655	L2V2	0,735	0,006	L3V2	0,862	0,125
L1V3	0,912	0,371	L2V3	0,927	0,490	L3V5	0,744	0,007
L1V4	0,898	0,275	L2V4	0,776	0,016	L3V6	0,963	0,841

Fonte: O autor, 2019.

O mesmo não ocorre quando estamos analisado os deslocamentos, pois os grupos L2V2, L2V4 e L3V5 falham nos critérios de convergência para hipótese nula H'_0 , sendo os valores da estatística $W < 0,818$ e o $valor-p < \alpha$. Dessa forma, esses grupos não possuem uma população normalmente distribuída e o tratamento dos dados pelo Test de *Grubbs* não é aconselhado.

3.5.2 Coefficiente de variação estatística

Nesta seção, são mostrados a alteração do coeficiente de variação estatística dos ensaios de resistência à flexão quando utilizado o teste de *Grubbs* para a exclusão das observações que de alguma forma estão afastados do valor médio. Neste caso, a significância estatística $\alpha = 0,05$ e $Z \leq 2,032$.

Da mesma forma que ocorreu com o teste de normalidade, a igualdade existente entre os CV_{ef} para forças e tensões acarretou na apresentação apenas dos valores referentes às tensões máximas alcançadas e podem ser vistos na tabela 30.

Tabela 30 - Coeficientes de variação estatística observados antes e após a aplicação do teste de *Grubbs* para as tensões máximas

Grupo	Sem teste	Com teste	Grupo	Sem teste	Com teste	Grupo	Sem teste	Com teste
L1V1	6,91%	5,41%	L2V1	7,39%	5,86%	L3V1	4,29%	3,48%
L1V2	8,71%	5,71%	L2V2	14,83%	7,32%	L3V2	9,84%	8,02%
L1V3	10,19%	5,88%	L2V3	16,97%	12,25%	L3V5	14,33%	11,80%
L1V4	16,12%	12,54%	L2V4	12,92%	9,16%	L3V6	6,69%	4,22%

Fonte: O autor, 2019.

Dentre todos os testes realizados para os resultados de tensão e força máxima alcançada, apenas um valor considerado como *outlier* foi detectado. Quando eliminado este valor, houve diminuição considerável de 50,64% no CV_{ef} para a distribuição de resultados do grupo L2V2.

Nas outras observações, os valores extremos identificados que não são *outliers* a um nível de significância de 5%, mas que também foram desconsiderados na análise final, acarretaram no decréscimo do CV_{ef} que variou entre 42,30% na grupo L1V3 até decréscimos menores como 17,66% verificado na grupo L3V5. Não houve nenhuma ocorrência de $CV_{ef} > 19\%$, conforme estipulado anteriormente, o que demonstra uma boa distribuição do valores de tensão e força máxima em torno da média após o tratamento dos dados. Dessa forma, acredita-se que em relação às tensões e forças máximas verificadas, os ensaios demonstraram uma boa reprodutibilidade.

Tabela 31 - Coeficiente de variação estatística observados antes e após a aplicação do teste de *Grubbs* para os deslocamentos

Grupo	Sem teste	Com teste	Grupo	Sem teste	Com teste	Grupo	Sem teste	Com teste
L1V1	24,76%	19,45%	L2V1	43,42%	31,83%	L3V1	35,17%	29,42%
L1V2	47,93%	44,00%	L2V2	84,43%	-	L3V2	32,80%	25,63%
L1V3	14,26%	8,81%	L2V3	29,19%	24,29%	L3V5	35,33%	-
L1V4	39,89%	33,71%	L2V4	21,42%	-	L3V6	26,05%	16,88%

Fonte: O autor, 2019.

Como os grupos L2V2, L2V4 e L3V5 falharam nos critérios de convergência para hipótese nula H'_0 no teste de normalidade de Shapiro-Wilk, seus valores não foram testados pelo teste de Grubbs.

De um total de 9 grupos testados, 7 apresentaram $CV_{ef} > 19\%$. A não observação de *outliers* pode ser um indicativo de que os resultados estão submetidos apenas à variabilidade intrínseca das propriedades do material considerado assim como suas diferentes configurações, excluindo-se erros de procedimento de ensaios e registro de informações equivocadas. Mesmo que resultados não tenham apresentado uma boa distribuição em torno

das médias verificadas, não considerou-se que houve um comprometimento dos dados analisados neste estudo.

3.5.3 Dispersão na deflexão

Por definição, a deflexão é o deslocamento vertical no mesmo sentido de aplicação da força em qualquer ponto no eixo longitudinal de uma viga submetida a esforços de flexão (GERE, 2003). No ensaio de resistência à flexão de três pontos, um travessão desloca-se à uma taxa constante aplicando carga sobre o corpo de prova. O deslocamento vertical que o corpo de prova experimenta na prática não é necessariamente o mesmo deslocamento que o travessão executa. Por motivos de conveniência, frente às limitações do experimento, considera-se que o deslocamento no vão médio do corpo de prova é o mesmo do travessão.

O tratamento estatístico referente às deflexões dos corpos de prova, identificada pelos valores dos deslocamentos, apresentou distribuição estatística grande variação. A partir da tabela 32, verifica-se que o menor CV_{ef} para a deflexão foi de 8,81% e o maior valor observado foi de 44,00% após aplicação do teste dos valores extremos. A partir das tabelas 26, 27 e 28, nota-se que há uma dispersão apreciável dos resultados em relação aos valores médios.

Há algumas evidências que podem explicar a alta dispersão de valores. A primeira delas remete à regularidade dimensional dos corpos de prova utilizados no estudo. Devido à dimensão limitada, houve dificuldade no adensamento da massa fresca de concreto na cavidade dos moldes, o que gerou por vezes algumas irregularidades nas dimensões dos corpos de prova.

Silva et al. (2018) verificou que em seu estudo sobre a influência da profundidade do entalhe na estabilidade da propagação da trinca em concreto, houve grande dispersão de valores para alguns parâmetros, sendo um deles o deslocamento de flexão corpos de prova. O autor enfatiza que a variação desta medida pode ser profundamente influenciada pelo processo de fabricação dos corpos de prova, visto que durante a moldagem, mais precisamente na etapa de adensamento, vários defeitos podem surgir de forma a influenciar determinados parâmetros.

Inclusive as irregularidades e defeitos podem atrapalhar também no posicionamento do corpo de prova sobre os apoios do ensaio de resistência à flexão de três pontos, como mostrado na figura 47.

Figura 47 - Irregularidade dimensional verificada no momento do ensaio

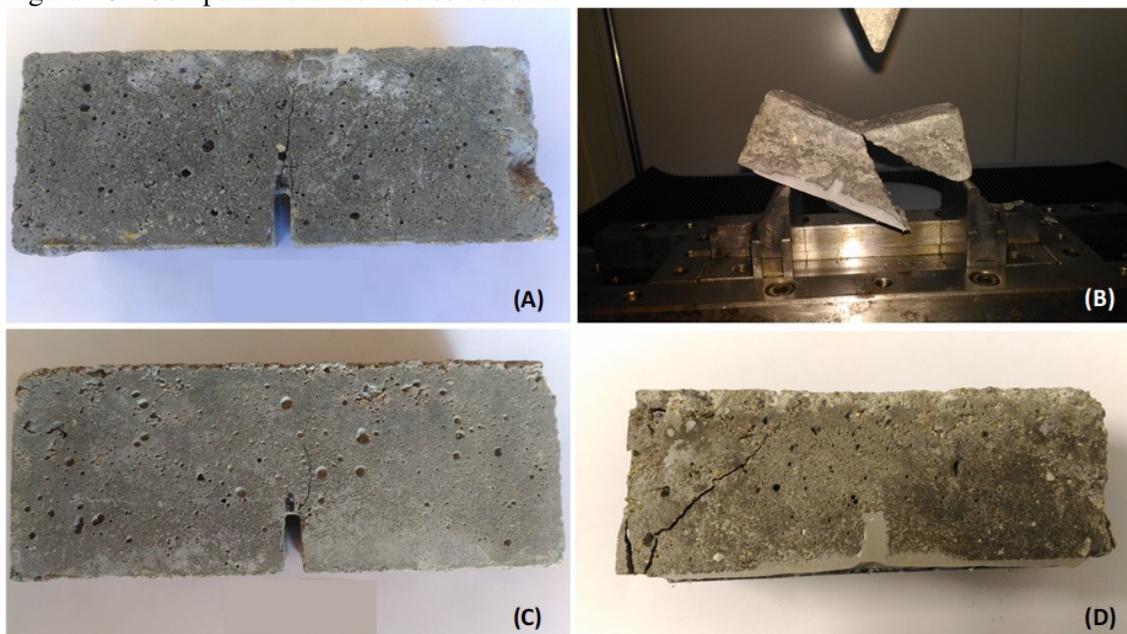


Fonte: O autor, 2019.

Não menos importante, os modos de falha também são responsáveis pela influência da magnitude da deflexão. A partir da figura 49 é possível ter como base para uma rápida análise visual a relação da variabilidade dos deslocamentos verificados.

Na figura 48 (A) um corpo de prova de referência L2V2R1 apresentou na falha um deslocamento de 0,885 mm. Em 48 (B), o corpo de prova de referência L1V4R3 apresentou o deslocamento de 1,958 mm, sendo o maior deslocamento em deflexão registrado, visto que sua falha foi abrupta e causou o rompimento do concreto por cisalhamento. Em 48 (C), percebe-se no corpo de prova de referência L3V2R3 que a abertura da trinca foi ligeiramente menor que em 48 (D), resultando em um deslocamento de 0,542 mm. Por fim, uma falha por cisalhamento em um corpo de prova de referência L1V4R4 ocasionou um deslocamento de 1,091 mm.

Figura 48 - Comparativo entre modos de falha

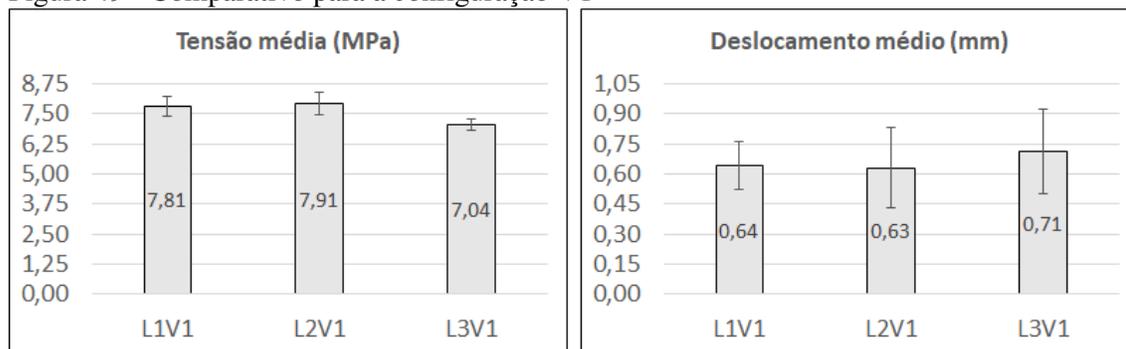


Legenda: (A) CP L2V2R1; (B) CP L1V4R3; (C) CP L3V2R3; (D) CP L1V4R4.
Fonte: O autor, 2019.

3.6 Análise comparativa

Nesta subsecção é feita uma comparação das tensões máximas alcançadas e os deslocamentos máximos verificados para uma mesma configuração ao longo dos três lotes. Devido à similaridade proporcional que há entre as tensões e as cargas máximas alcançadas, esta última não é apresentada a critério de praticidade.

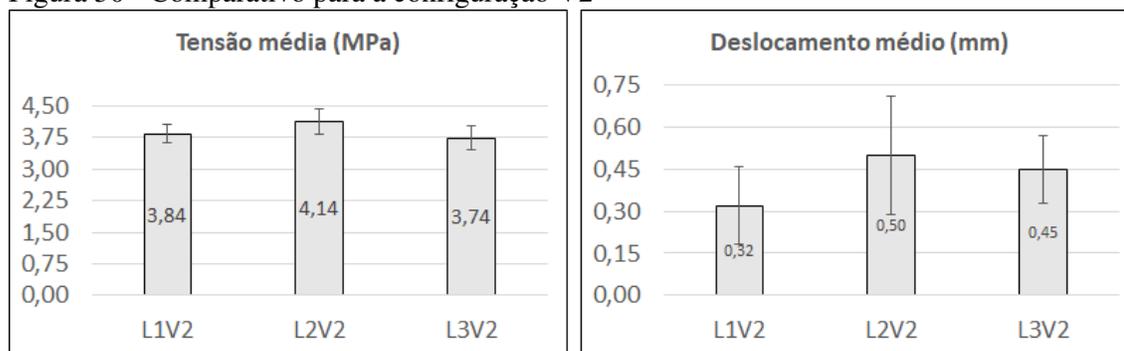
Figura 49 - Comparativo para a configuração V1



Fonte: O autor, 2019.

Conforme apresentado na figura 49, percebe-se que não há grande variabilidade entre as tensões máximas alcançadas ao longo dos três lotes ensaiados, sendo a maior dispersão verificada de 10,99% no lote 3 em relação ao lote 2. Apesar do grande desvio observado em relação aos deslocamentos, percebe-se uma tendência do resultado médio próximo nos 3 casos para uma mesma configuração, onde a maior dispersão ocorre entre o lote 1 e o lote 3. Os deslocamentos foram em média 9,76% maiores no lote 3 em relação ao lote 1.

Figura 50 - Comparativo para a configuração V2



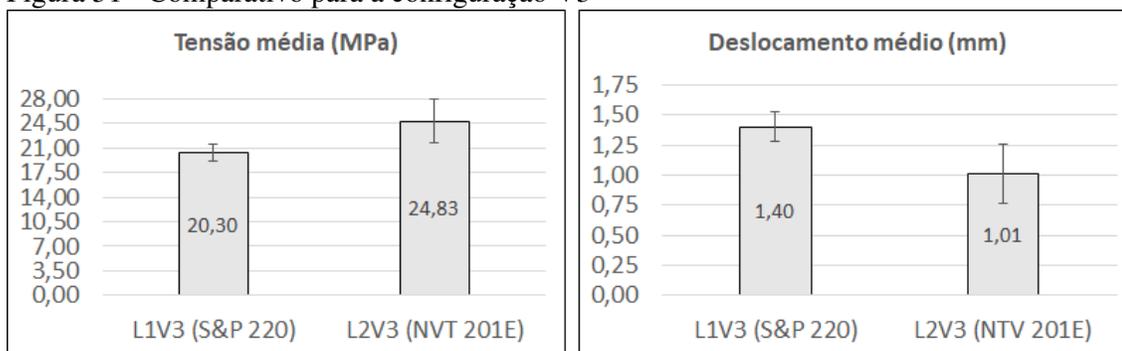
Fonte: O autor, 2019.

Na figura 50 são comparados os resultados referentes à configuração V2 para os diferentes lotes e observa-se um comportamento similar à configuração V1 no que se diz respeito à tensão máxima em flexão. A maior dispersão de resultados ocorre novamente em relação aos lotes 3 e 2, onde o lote 3 apresenta uma resistência à flexão 9,66% menor que o lote L2. Em relação às tensões máximas, existe uma reprodutibilidade maior dos resultados devido a uma dispersão baixa entre os resultados de diferentes lotes.

O mesmo não ocorre com os deslocamentos. Não há uma tendência em relação ao seu comportamento, muitas vezes governado pela uniformidade geométrica dos corpos de prova ou propriedades internas de sua estrutura, como citado anteriormente. Em relação aos deslocamentos, observa-se que há uma grande dispersão nos resultados e seu comportamento não reproduz a mesma situação observada na configuração V1. A maior dispersão no valor médio é 36% superior no lote 2 em comparação ao lote 1.

Na figura 51, percebe-se que quando o reforço é colado com o NVT 201E, no grupo L2V3, o comportamento em flexão dos corpos de prova pode ser em média 22,31% maiores que na situação onde o reforço foi colado com o S&P 220. Isto pode ter sofrido influência do tipo de fratura ao qual cada corpo de prova esteve submetido e será melhor explicado adiante.

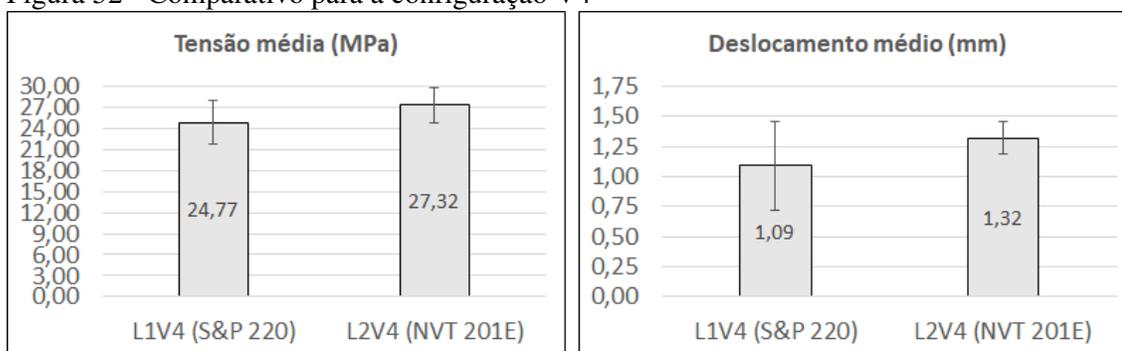
Figura 51 - Comparativo para a configuração V3



Fonte: O autor, 2019.

Na figura 52, quando executou-se o reparo nos corpos de prova que possuem um entalhe característico da configuração V4, observou-se um aumento médio na tensão de ruptura de aproximadamente 10,29% de um lote em relação ao outro. A proporção de incremento na resistência à flexão foi menor do que observado na configuração V3. Isso pode ser explicado pela maior área de colagem disponível neste tipo de corpo de prova, devido ao preenchimento do entalhe com o adesivo. A interface de colagem foi melhor desenvolvida para ambos adesivos, diminuindo as diferenças entre os valores máximos de tensão alcançadas. Além do que certos modos de falhas que ocorreram no grupo L1V3, não foram observados no grupo L2V3.

Figura 52 - Comparativo para a configuração V4

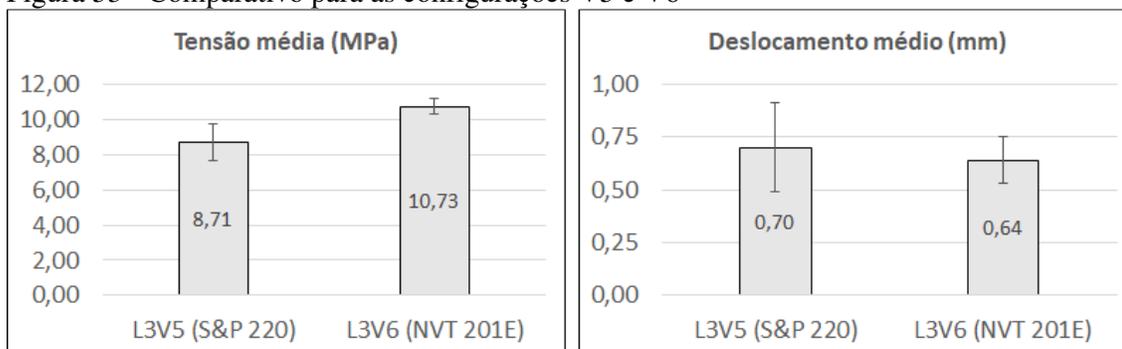


Fonte: O autor, 2019.

Em relação ao preenchimento do entalhe, verifica-se a partir da figura 53 que os dois adesivos demonstram eficiência, porém a utilização do entalhe preenchido com o NVT 201E mostrou-se superior ao caso em que há a utilização do S&P 220. Os valores médios do grupo L3V6 são aproximadamente 23,19% superiores ao grupo L3V5. A dispersão nos

deslocamentos é menor na configuração V6, que pode ser associado ao modo de falha diferente nos dois grupos e será melhor explicado adiante.

Figura 53 - Comparativo para as configurações V5 e V6

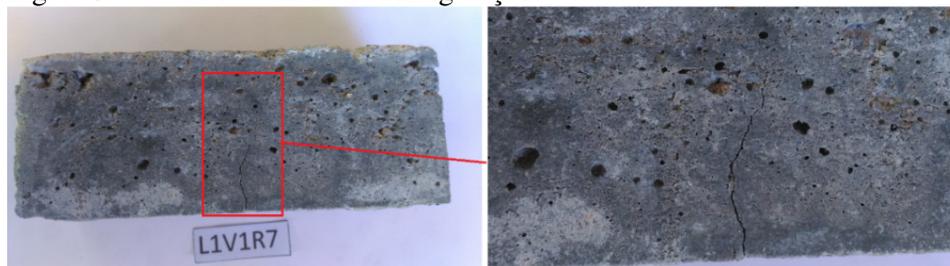


Fonte: O autor, 2019.

3.7 Análise do modo de falha

Um ponto importante a ser destacado neste estudo é o tipo de falha que cada corpo de prova experimentou durante os ensaios. Verificou-se a recorrência da falha por flexão no configuração V1 ao longo dos três lotes fabricados, salvo algumas exceções devido a irregularidades dimensionais.

Figura 54 - Padrão de falha na configuração V1



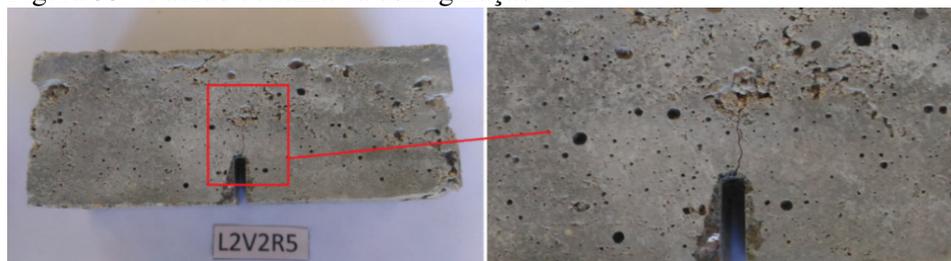
Fonte: O autor, 2019.

Na região inferior do concreto onde a tensão de tração é máxima, como mostrado na figura 54, há o surgimento de uma trinca que se propaga quase que instantaneamente na direção de aplicação da força, porém em sentido contrário. Uma pequena aleatoriedade foi

percebida para a região de iniciação da trinca, porém a forma de propagação e seu sentido foram basicamente os mesmos.

Da mesma forma para os corpos de prova com o entalhe, como apresentado na figura 55, notou-se a reprodução do mesmo padrão ao longo dos três lotes estudados. A iniciação da trinca ocorreu na superfície imediata ao topo do entalhe e prosseguiu próximo à linha de aplicação de força, porém em sentido contrário.

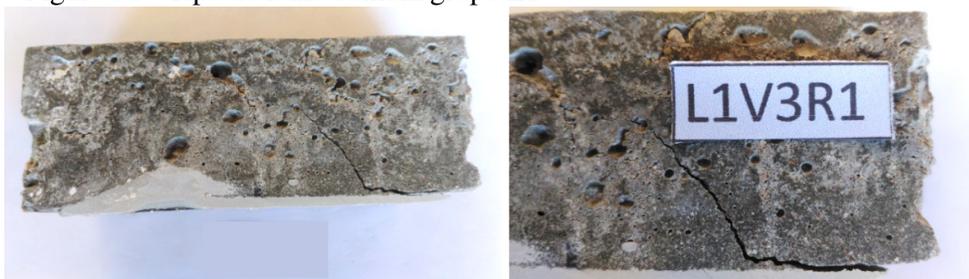
Figura 55 - Padrão de falha na configuração V2



Fonte: O autor, 2019.

Foi observado no grupo L1V3 a alteração no padrão de falhas e propagação das trincas. Esta configuração apresentou de forma preferencial o modo de falha conhecido como *Critical Diagonal Crack* (CDC). Este tipo de falha é induzida pela formação de uma trinca de cisalhamento que intercepta reforço e se propaga na interface adesiva causando o descolamento do material compósito laminado (YAO; TENG, 2007) e pode ser vista na figura 56. Além dessa modo de falha, foi verificado em alguns casos houve o surgimento de trinca na região de máximo momento fletor e esmagamento das extremidades apoiadas no equipamento de ensaio.

Figura 56 - Tipo de falha comum grupo L1V3

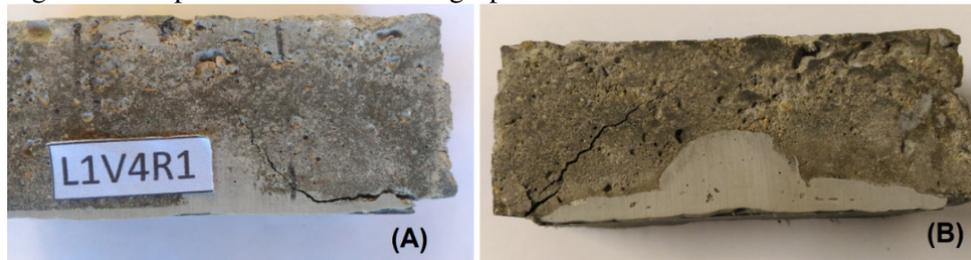


Fonte: O autor, 2019.

Para os corpos do grupo L1V4, as falhas mais frequentemente observadas foram o desprendimento de um pequeno comprimento na extremidade do reforço seguida pela

propagação de uma trinca de cisalhamento a partir deste ponto. Houve também apenas um caso onde ocorreu desprendimento do reforço a partir de sua extremidade, porém com uma fina camada de concreto aderida.

Figura 57 - Tipo de falha comum no grupo L1V4



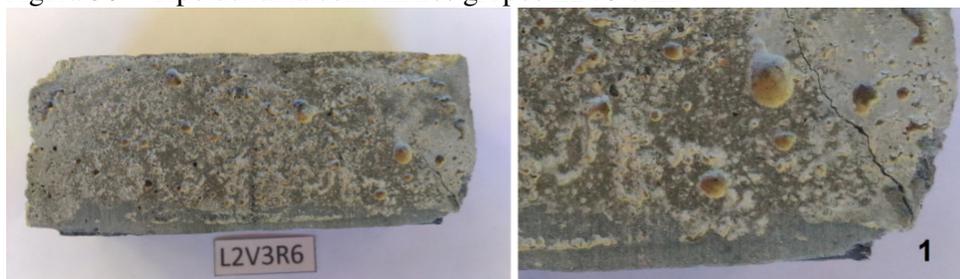
Fonte: O autor, 2019.

Na figura 57 (A) é apresentada uma falha que ocorre graças a uma ruptura coesiva no concreto onde uma fina camada continua aderida ao reforço. Associa-se a ocorrência dessa falha devido ao surgimento de altas tensões interfaciais em uma região adjacente a descontinuidade ocasionada pela extremidade do reforço. Quando a trinca avança horizontalmente, ocorre uma falha coesiva causando a separação das camadas de concreto (SMITH; TENG, 2002).

Na figura 57 (B), a falha ocorreu quando uma trinca se propagou a partir da extremidade do material de reforço, que é uma área associada a maior concentração de tensões cisalhantes nas vigas de concreto reforçado externamente. A extremidade da camada adesiva não resistiu à concentração de tensões nessa região e cedeu, possibilitando que uma trinca de cisalhamento surgisse a partir deste ponto. O caminho de propagação da trinca é dependente das propriedades do concreto, como resistência à compressão, e seu crescimento se dá ao longo da linha diagonal em torno da região de menor resistência (KANG et al., 2012).

Tanto para o grupo L2V3 e L2V4 verificou-se uma ligeira variação entre os tipos de falha. Alguns corpos de prova também experimentaram a propagação da trinca por cisalhamento, porém estas foram iniciadas a partir da região apoiada, assim como a ocorrência de esmagamentos compressivos das extremidades dos corpos de prova. Essa região pode ser identificada na figura 58 pelo número 1. Percebeu-se para este grupo não houve o comprometimento da camada adesiva, sendo todas as falhas dependentes das propriedades do concreto.

Figura 58 – Tipo de falha comum nos grupos L2V3 e L2V4

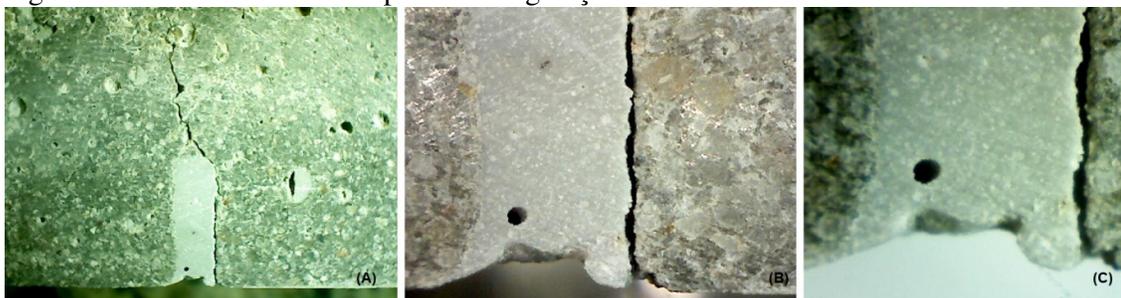


Fonte: O autor, 2019.

A colagem de um material de reforço na superfície submetida à tração dos corpos de prova de concreto foi capaz não só de alterar os valores de resistência mecânica à flexão como mudar completamente o modo como as falhas ocorrem. As duas camadas adesivas resistiram aos esforços cisalhantes, porém o adesivo NVT 201E manteve-se intacto enquanto o adesivo S&P 220 cedeu aos esforços na extremidade do reforço.

No lote 3, para as configurações V5 e V6 com os entalhes preenchidos respectivamente com os adesivos S&P 220 e NVT 201E, foram observados comportamentos interessantes. No caso da configuração V5, o modo de falha mais frequentemente observado ocorreu de forma que o adesivo se descolou em apenas umas das paredes do interior do entalhe.

Figura 59 - Falha característica para a configuração V5 colada com o S&P 220.



Legenda: (A) Aproximação sem ampliação; (B) Ampliação de 30 x; (C) – Ampliação de 50 x.
Fonte: O autor, 2019.

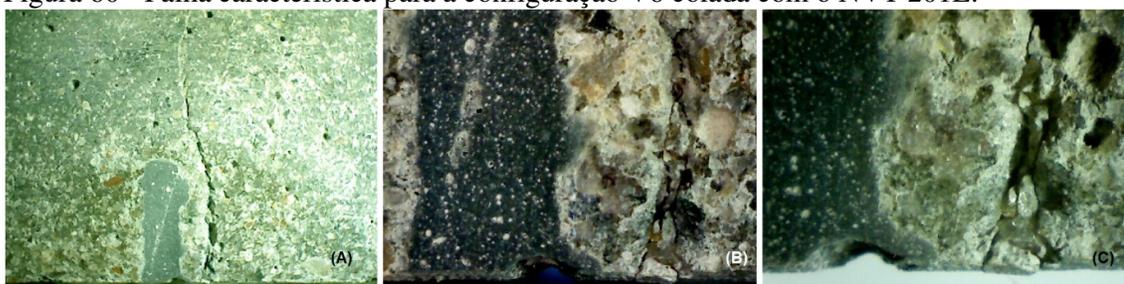
A falha ocorrida no caso ilustrado pela figura 59 é análoga ao modo de falha por descolagem que ocorre em vigas de concreto reforçadas com materiais compósitos. A descolagem se inicia na zona colada entre o concreto e a junção adesiva, posteriormente sendo propagada ao longo da interface de ligação (KOTYNIA, 2006).

Assim que as ligações entre o adesivo e o concreto foram cessadas, houve perda de ação do adesivo e imediata propagação da trinca a partir da região fronteira entre o topo do

entalhe e o concreto. Apesar do ocorrido, sabe-se que o comportamento em flexão deste grupo em particular se mostrou satisfatório em relação ao grupo de controle para o mesmo lote. O menor registro de carga suportada pelo grupo L3V5 foi apenas 0,53% inferior ao maior registro de carga suportada pelo grupo L3V1.

Para a configuração V6, o comportamento examinado foi o rompimento do concreto em uma região adjacente ao entalhe preenchido a partir de uma trinca característica de flexão deslocada da região central. As tensões de aderência entre o concreto e o adesivo foram suficientes para suportar os esforços de flexão até o rompimento coesivo do concreto. Esse comportamento pode ser observado na figura 60.

Figura 60 - Falha característica para a configuração V6 colada com o NVT 201E.



Legenda: (A) Aproximação sem ampliação; (B) Ampliação de 30 x; (C) – Ampliação de 50 x.
Fonte: O autor, 2019.

Em nenhum caso para o grupo V6 foi verificado o descolamento do adesivo em relação à parede da trinca, o que mostra boas propriedades de adesão do NVT 201E. O preenchimento do entalhe não só restaurou a capacidade de resistir aos esforços de flexão, mas foi responsável pelo aumento da resistência em uma proporção superior ao grupo de controle do mesmo lote.

Lau e Zhou (2001) não registraram grande aumento de resistência à flexão quando o entalhe de seu corpo de prova foi preenchido com o adesivo, porém foi exposto que na recuperação da resistência à flexão, houve uma falha iniciada em uma região vizinha ao entalhe sem que ocorresse qualquer descolamento. Do mesmo modo, este comportamento foi reproduzido no presente estudo, porém com significativo ganho de resistência à flexão.

Além disso, é importante salientar que os primeiros grupos ensaiados (L1V1 e L1V2) contavam com o equipamento configurado para finalizar o deslocamento da célula de carga ao primeiro sinal de falha no corpo de prova. Sendo assim, optou-se por realizar os ensaios de todos lotes ao longo das 6 configurações dessa maneira a fim de permitir reprodutibilidade

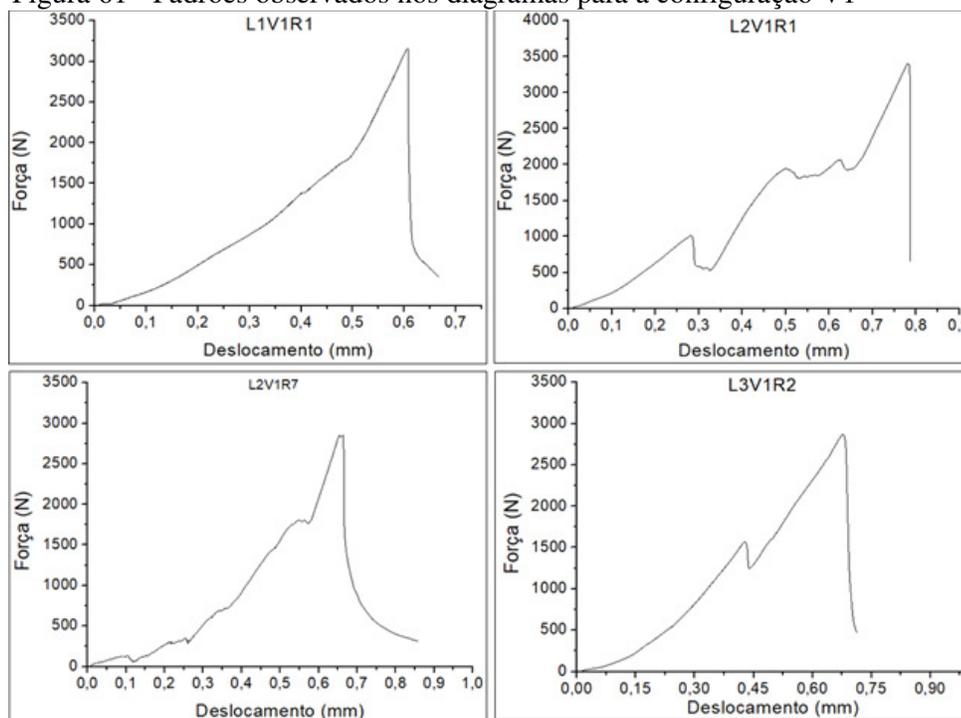
das mesmas condições para todo o estudo. Isso vem a explicar o motivo pelo qual a maioria dos corpos de prova não apresentou rompimento catastrófico.

3.8 Análise dos diagramas força x deslocamento

Esses diagramas relacionam a força aplicada no corpo de prova com o deslocamento do travessão presente no equipamento de ensaio. Não necessariamente este deslocamento é o mesmo que o corpo de prova sofre, porém essa consideração é feita aqui.

Não foi observado um padrão preferencial para o traçado do diagrama, porém uma característica presente em todos é a não linearidade que ocorre na região elástica da curva força x deslocamento. Desde o início do carregamento até a ocorrência da falha onde a carga foi a máxima suportada, percebeu-se a presença de traçados irregulares. Considerando a configuração V1 em todos os três lotes, são comumente observados comportamentos conforme ilustra a figura 61.

Figura 61 - Padrões observados nos diagramas para a configuração V1



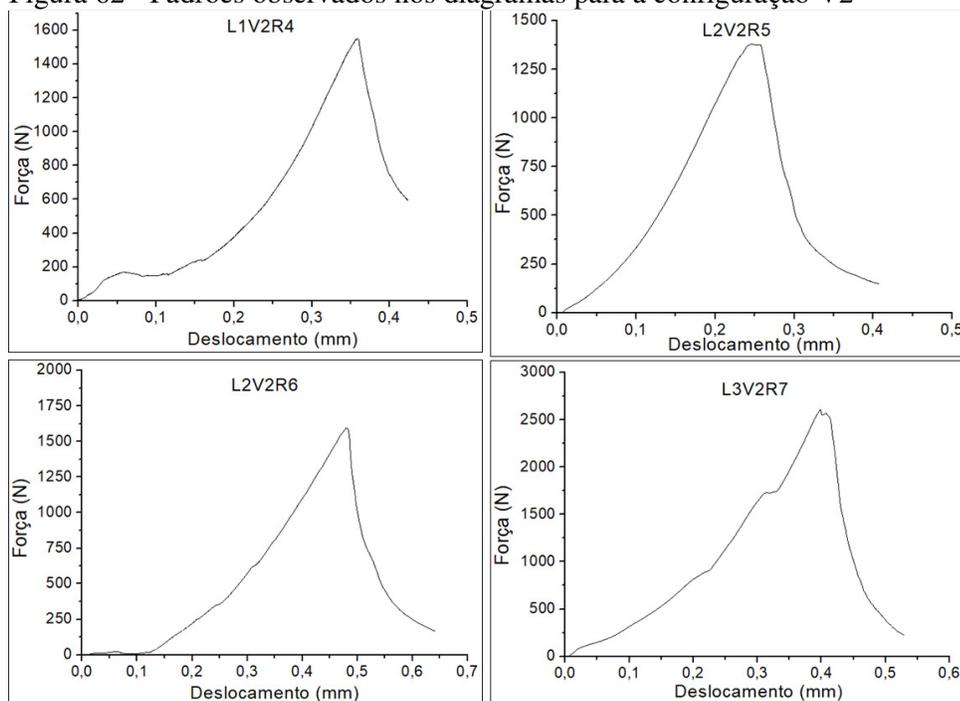
Fonte: O autor, 2019.

O comportamento não linear da região anterior ao pico de carga máxima é comum para o concreto não reforçado, bem como o concreto reforçado por fibras, pois ele está associado ao microfissuramento interno que precede a falha global do prisma (GRAYBEAL, 2006).

Como observado por Pessôa (2007), o comportamento da fase pré-pico apresenta um considerável comprimento que pode estar associado ao ajuste do travessão do equipamento na face superior do prisma. A aplicação de força impõe esmagamentos nessas regiões em diferentes magnitudes que podem também alterar o traçado da curva. Isso pode ser agravado por imperfeições nos próprios corpos de prova.

Na figura 62, para a configuração V2, ainda são notadas algumas perturbações na região elástica em menores proporções, contribuindo para curvas mais uniformes. Após o pico de carga máxima, há o aumento das deformações conforme as cargas vão sendo diminuídas em um fenômeno onde há a suavização das tensões também conhecido como *strain softening* (SHAH, CHOI, JANSEN; 1996). Na região do entalhe, há o coalescimento de microfissuras que formam uma zona de dano que enfraquece o concreto de modo que sua capacidade em resistir ao aumento de carga é diminuída de forma mais lenta.

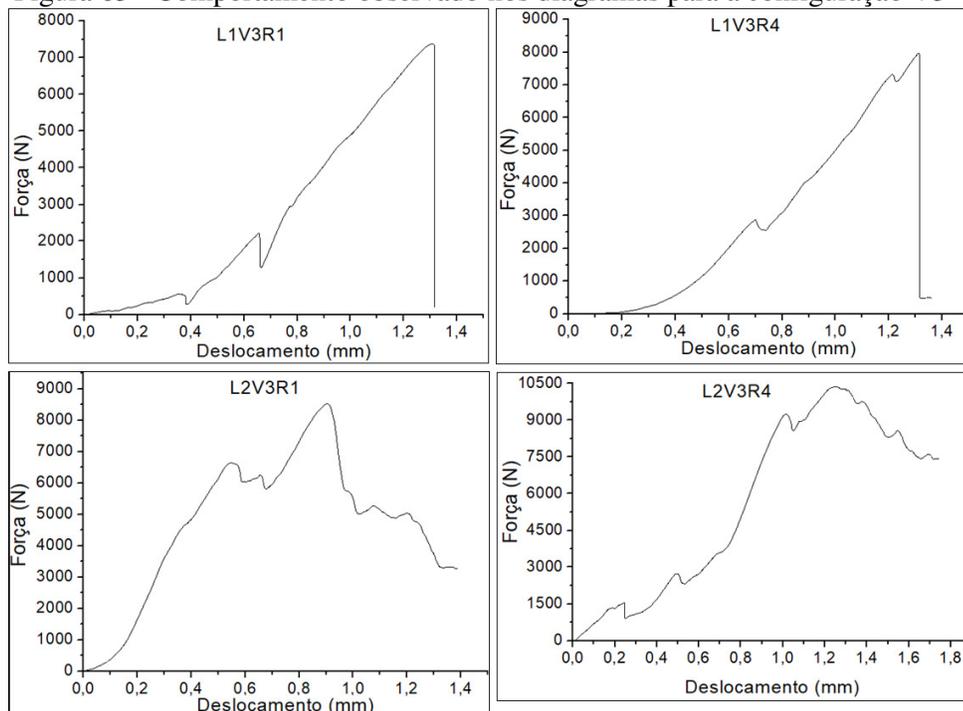
Figura 62 - Padrões observados nos diagramas para a configuração V2



Fonte: O autor, 2019.

Não foi possível observar um comportamento predominante para os corpos de prova pertencentes às configurações V3 e V4 ao longo dos lotes 1 e 2. No grupo L1V3, onde houveram ocorrências de propagação de trincas de cisalhamento, percebeu-se que após o pico de carga máxima houve uma queda abrupta da resistência à flexão. Já no grupo L2V3, onde houve uma predominância de falhas por esmagamento nas extremidades e trincas de cisalhamento iniciadas na região apoiada, não foi possível determinar um padrão mais comum para o comportamento força x deslocamento.

Figura 63 - Comportamento observado nos diagramas para a configuração V3



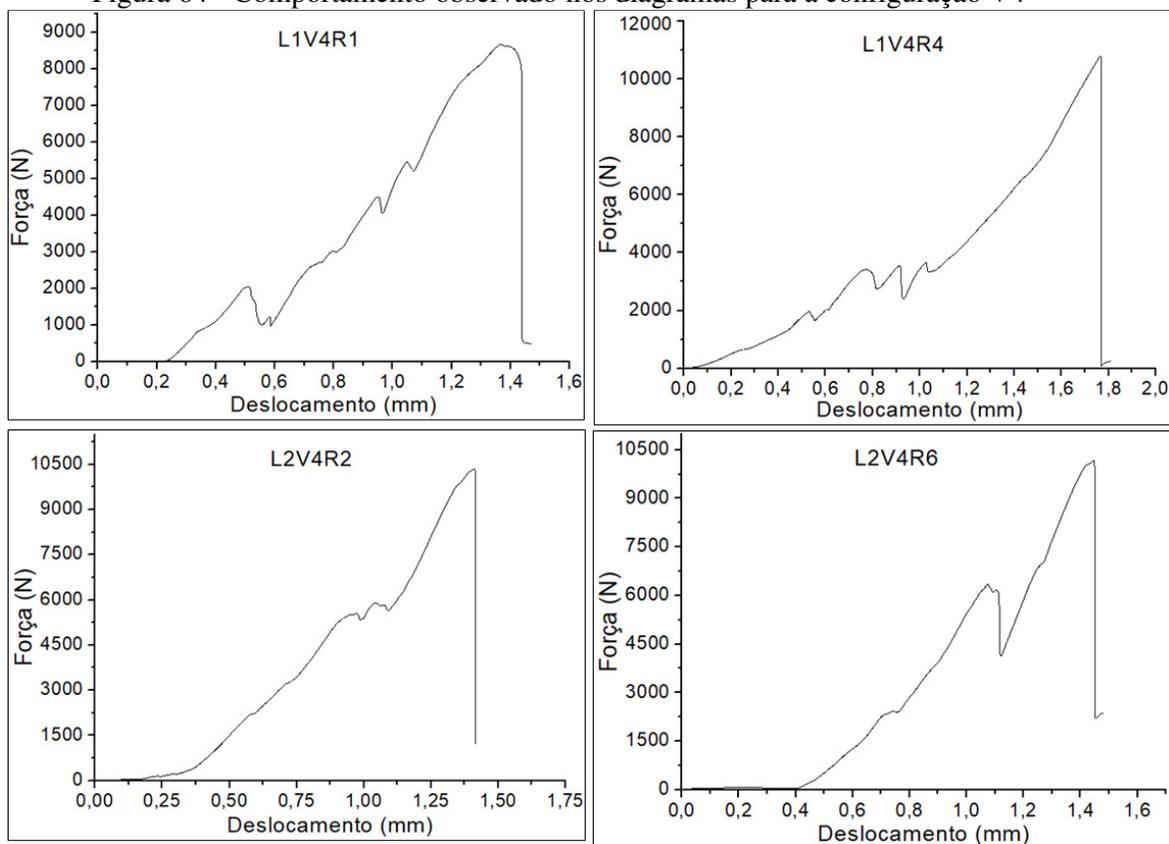
Fonte: O autor, 2019.

Quando foi identificado a falha devido ao esmagamento nos corpos de prova da configuração V4, ao longo dos lotes 1 e 2, verificou-se o mesmo comportamento irregular das curvas força x deslocamento como ocorrido para as configurações V3 tanto no lote 1 como no lote 2. A ilustração destes exemplos é omitida aqui por motivos de praticidade. Quanto os corpos de prova reforçados que experimentaram outros modos de falha como a propagação de trincas a partir da região apoiada, observou-se um comportamento similar ao ocorrido no grupo L1V3, como mostrado na figura 63.

Apesar da reincidência das perturbações ocorridas na região elástica, observou-se que alguns corpos de prova apresentaram uma queda abrupta da força após o pico de carga

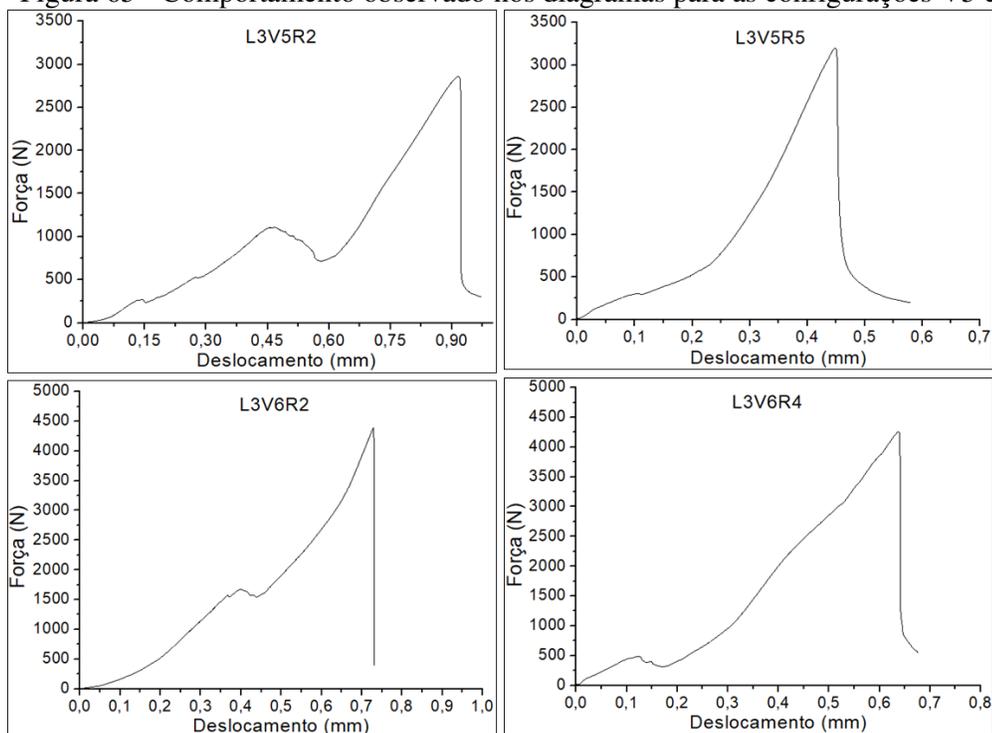
máxima, caracterizando uma falha frágil. Esses comportamentos pode ser vistos na figura 64. Em relação às configurações V5 e V6 do lote 3, percebeu-se também a reprodução de uma região elástica não linear, com algumas perturbações, porém em uma proporção menor do que observada nas configurações V3 e V4 dos lotes 1 e 2. Esses comportamentos pode ser vistos na figura 65.

Figura 64 - Comportamento observado nos diagramas para a configuração V4



Fonte: O autor, 2019.

Figura 65 - Comportamento observado nos diagramas para as configurações V5 e V6



Fonte: O autor, 2019.

Os diagramas obtidos pelos grupos L3V5 e L3V6 possuem certa semelhança com os diagramas obtidos para a configuração V2 na região pré-pico, já que ocorrem perturbações em menores proporções do que em outras configurações. Já o comportamento distinto entre as fases pós-picos de ambos os casos deve-se ao preenchimento do entalhe com o adesivo, pois além de ocorrer o aumento da resistência à flexão e dos deslocamentos, há queda abrupta da força em um tipo de ruptura frágil. Ruptura essa que geralmente não é percebida na configuração V2 ao longo dos 3 lotes testados.

A heterogeneidades dos corpos de prova bem como suas irregularidades dimensionais provenientes do processo de fabricação colaboraram para a ausência de um padrão para o traçado dos diagramas força x deslocamento. Tanto a colagem do reforço como o preenchimento do entalhe com o adesivo alteram não só o padrão de falha em comparação aos corpos de prova de controle como o traçado de seus digramas.

CONCLUSÃO

Os resultados aqui apresentados demonstram a eficiência da técnica EBR em elementos de concreto tanto no que se diz respeito as operações de incremento de carga assim como no reparo de condições sujeitas à falhas. Quando submetidos a um defeito estrutural simulado, são observadas quedas nos valores de resistência à flexão em proporções aproximadas nos diferentes lotes de corpos de prova fabricados.

Tanto a colagem dos reforços de materiais compósitos como a correção da falha simulada por meio de seu preenchimento resultaram em resultados positivos quando comparados com suas respectivas referências. A utilização do adesivo S&P 220 elevou a resistência dos elementos de concreto em até 2,60 vezes em relação à condição de incremento de resistência e cerca de 6,45 vezes à condição de reparo. A resistência à flexão alcançada na condição de reparo foi cerca de 18,05% superior a condição de incremento de carga assim como foi aproximadamente 3,17 vezes superior à condição de controle sem a presença da falha simulada.

Com a aplicação do adesivo NVT 201E, o comportamento se manteve semelhante aos casos em que o reforço foi colado com outro adesivo comercial. Nas operações de incremento de carga, observou-se o aumento da resistência à flexão em aproximadamente 3,14 vezes à situação inicial. Nas operações de reparo em relação sua condição de controle, há um aumento de resistência à flexão de 6,60 vezes. A eficácia do reparo mais uma vez é provada, onde os resultados são aproximadamente 10,21% superiores ao grupo referente à situação de incremento de resistência.

Em uma situação intermediária à situação de reparo, o preenchimento do entalhe com ambos adesivos forneceu uma série de resultados promissores. Quando comparados a sua configuração de controle, sem o entalhe preenchido, foram obtidos aumentos de resistência à flexão de 2,33 e 2,87 vezes com a utilização dos adesivos S&P 220 e NVT 201E respectivamente.

Quando comparados a situação de controle sem a presença do entalhe, há um incremento de resistência à flexão da ordem 23,72% com a utilização do adesivo S&P 220 e até 52,41% com a utilização do NVT 201E. O preenchimento do adesivo funcionou de forma eficaz onde não só o comportamento em flexão dos corpos de prova foram reestabelecidos, como houve um incremento considerável em relação a uma condição de controle sem qualquer tipo de falha.

Apesar da aplicação do NVT 201E ter demonstrado uma performance brevemente superior ao adesivo S&P 220, não pode-se afirmar ainda que este material seja adequado para intervenções em estruturas de concreto. Novos estudos na área devem ser conduzido de forma que sejam investigadas as interações química e física do NVT 201E com o substrato de concreto. Além disso, é necessário avaliar o comportamento deste material em uma série de caracterizações pelas quais outros adesivos estruturais utilizados em reparos de concreto já foram submetidos. Testes de cisalhamento simples ou duplo, fadiga e fluência podem ser conduzidos em futuras abordagens.

Em relação a outros aspectos desse estudo, é necessário buscar outros métodos de preparo da superfície. A alternância dos parâmetros de rugosidade verificados frente ao preparo de superfícies utilizado no presente estudo não gerou nenhum resultado conclusivo. Sabe-se também que a rugosidade da superfície dos corpos de prova de concreto é influenciada pelo processo de fabricação empregado. Neste contexto, surge a necessidade do refinamento dos métodos de adensamento do concreto fresco no interior dos moldes, assim como o correto estudo de dosagem para garantir uma trabalhabilidade adequada à massa fresca.

Na questão do material compósito desenvolvido como reforço, o método empregado na sua fabricação se mostrou eficaz no que se diz respeito a sua performance nos ensaios. Apesar de apresentar resistência à tração e módulo de elasticidade inferiores aos materiais comerciais mais comumente utilizados na área, não há evidências que este fato tenha comprometido nenhum ensaio. Nenhum reforço sofreu qualquer tipo de dano sendo os resultados dependentes de uma combinação de fatores como configuração dos corpos de prova, adesivo utilizado e qualidade do concreto projetado.

SUGESTÕES PARA FUTURAS ABORDAGENS

- Aplicação de outros métodos para o preparo de superfície e avaliação da rugosidade superficial.
- Abordar critérios quantitativos que relacionem a medida da rugosidade com as propriedades mecânicas de ligação.
- Utilização PRF fabricados com materiais com fibras de aramida, basalto e vidro.
- Estudo das interações físicas e químicas do adesivo NVT 201E com a superfície de concreto a longo prazo.
- Avaliação do efeito de escala, levando em consideração a fabricação de corpos de prova com maiores dimensões em comparação aos resultados obtidos no presente estudo.
- Expandir os resultados deste estudo com a avaliação do comportamento em fluência, fadiga e cisalhamento simples ou duplo.
- Aprimorar os ensaios existente com intuito de criar métodos com resultados mais consistentes.
- Desenvolvimento de ensaios não destrutivos para avaliar a integridade da interface adesiva e eficiência das interligações mecânicas.
- Avaliação do comportamento de estruturas reais submetidas a qualquer espécie de reforço ou reparo.

REFERÊNCIAS

AGARWAL, B. D.; BROUTMAN, L. J.; CHANDRASHEKHARA, K.. *Analysis and performance of fiber composites*. 3. ed. New Delhi: Wiley, 2006.

ALERIGI JUNIOR, A. *Associação Brasileira de Cimento Portland*. 2018. Disponível em: <<https://www.abcp.org.br/cms/imprensa/venda-de-cimento-no-brasil-deve-fechar-em-queda-este-ano-setor-espera-reacao-em-2019/>>. Acesso em: 15 jan. 2019.

AMARASINGHE, N. A.; GAMAGE, J. C. P. H.. Experimental study on integrated method of NSM and EBR techniques for flexural strengthening of Concrete Beams using CFRP. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL ENGINEERING AND CONSTRUCTION MANAGEMENT, 6., 2015, Kandy. Proceedings. Kandy: Csecm, 2015. p. 170 - 177.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C 78: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*. 3 ed. West Conshohocken, 2002. 3 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D 3039: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. West Conshohocken, 2000. 13 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D 7264: Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. West Conshohocken, 2007. 11 p.

ARAÚJO, C. J. R. V. et al. Estudo experimental de viga de concreto armado reforçada com laminados de fibra de carbono pela técnica NSM. *Revista Ipt*, São Paulo, v. 1, n. 4, p.20-43, abr. 2017.

ARIYACHANDRA, M. R. E. F. et al. Effects of surface roughness and bond enhancing techniques on flexural performance of CFRP/concrete. *Composite Structures*, [s.l.], v. 178, p.476-482, out. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Guia básico de utilização do cimento Portland (BT-106). 7.ed. São Paulo, 2002. 28p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5738: Concreto - Procedimento para Moldagem e cura de corpos-de-prova*. Rio de Janeiro, 2008. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2007. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11578: Cimento Portland composto* Rio de Janeiro, 1991. 5p.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15900: Água para amassamento de concreto. Parte 1: Requisitos*. Rio de Janeiro, 2009. 15 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR ISO 4287: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade*. Rio de Janeiro, 2002. 18 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. 1 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 1998. 8 p.
- AYEMBA, D. *Construction review online*. Utilizing FRPs for concrete strengthening. 2017. Disponível em: <<https://constructionreviewonline.com/2017/05/utilizing-frps-concrete-strengthening/>>. Acesso em: 26 out. 2018.
- BANEA, M D; SILVA, L F M da. Adhesively bonded joints in composite materials: An overview. *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials*, [s.l.], v. 223, n. 1, p.1-18, jan. 2009.
- BANK, L. C. *Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.
- BEBER, Andriei José. *Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono*. 2003. 317 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- BILOTTA, Antonio et al. Efficiency of CFRP NSM strips and EBR plates for flexural strengthening of RC beams and loading pattern influence. *Composite Structures*, [s.l.], v. 124, p.163-175, jun. 2015.
- BISSONNETTE, B.; COURARD, L.; GARBACZ, Andrzej. *Concrete surface engineering*. Boca Raton: Taylor & Francis, 2016.1
- BLANKSVÄRD, T. *Strengthening of concrete structures by the use of mineral-based composites: System and design models for flexure and shear*. 2009. 302 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Department Of Civil, Mining And Environmental Engineering, Luleå University Of Technology, Luleå, 2009.
- BUDHE, S. et al. An updated review of adhesively bonded joints in composite materials. *International Journal Of Adhesion And Adhesives*, [s.l.], v. 72, p.30-42, jan. 2017.
- BUYUKOZTURK, O.; HEARING, B. Failure Behavior of Precracked Concrete Beams Retrofitted with FRP. *Journal Of Composites For Construction*, [s.l.], v. 2, n. 3, p.138-144, ago. 1998.
- CABRAL-FONSECA, S. et al. Durability of FRP - concrete bonded joints in structural rehabilitation: A review. *International Journal Of Adhesion And Adhesives*, [s.l.], v. 83, p.153-167, jun. 2018.

CALLISTER JUNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CARVALHO, T. S. de. *Reforço à flexão de vigas de betão armado com compósitos de CFRP*. 2010. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.

CHAWLA, K. K. *Composite Materials: Science and Engineering*. 3. ed. Springer, 2012.

CORRÊA, A. C. A. Estudo do desempenho dos aditivos plastificantes e polifuncionais em concretos de cimento portland tipo CPIII-40. 2010. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2010.

CZADERSKI, Christoph; MEIER, Urs. EBR Strengthening Technique for Concrete, Long-Term Behaviour and Historical Survey. *Polymers*, [s.l.], v. 10, n. 1, p.77-94, 17 jan. 2018.

CZARNECKI, L., et al. *Polymer composites for repairing of portland cement concrete: compatibility project*. 84p. No. NIST Interagency/Internal Report (NISTIR)-6394. 1999.

DAMBROT, S. M. *American Chemical Society*. 2016. Disponível em: <<https://www.acs.org/content/acs/en/education/resources/highschool/chemmatters/past-issues/2015-2016/april-2016/salt-facts.html>>. Acesso em: 25 out. 2018.

DANIEL, I. M.; ISHAI, O. *Engineering mechanics of composite materials*. 2. ed. Oxford: Oxford University Press, 2006.

EMMONS, P. H.; VAYSBURD, A. M. System concept in design and construction of durable concrete repairs. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 10, n. 1, p.69-75, fev. 1996.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. Bulletin 14: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Stuttgart: Sprint-digital-druck, 2001. 137 p.

FERRARI, V. J.; PADARATZ, I. J.; LORIGGIO, D. D. Reforço à flexão em vigas de concreto armado com manta de fibra de carbono: mecanismos de incremento de ancoragem. *Acta Scientiarum: Technology*, Maringá, v. 24, n. 6, p.1783-1791, jan. 2002.

FRIGIONE, M.; LETTIERI, M.. Durability Issues and Challenges for Material Advancements in FRP Employed in the Construction Industry. *Polymers*, [s.l.], v. 10, n. 3, p.247-262, Feb. 2018.

FUSCO, Péricles Brasiliense. *Tecnologia do Concreto Estrutural: Tópicos aplicados*. São Paulo: Pini, 2008.

GADELMAWLA, E. S. et al. Roughness parameters. *Journal Of Materials Processing Technology*, [s.l.], v. 123, n. 1, p.133-145, abr. 2002.

GARBACZ, A.; GÓRKA, M.; COURARD, L. Effect of concrete surface treatment on adhesion in repair systems. *Magazine Of Concrete Research*, [s.l.], v. 57, n. 1, p.49-60, fev. 2005.

- GARCIA, Alexandre Miguel de Almeida. Análise do campo de deslocamentos de vigas sandwich à flexão de 3 e 4 pontos Alexandre. 2014. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa, 2014.
- GARDEN, H. N. et al. An experimental study of the anchorage length of carbon fibre composite plates used to strengthen reinforced concrete beams. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 12, n. 4, p.203-219, jun. 1998.
- GERDEEN, J. C.; RORRER, R. A. L. *Engineering Design with Polymers and Composites*. 2. ed. Boca Raton: Crc Press, 2012.
- GERE, J. M. *Mecânica dos Materiais*. 5. ed. São Paulo: Thomson, 2003.
- GRAYBEAL, Benjamin A.. Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete. Fairfax: U.s. Department Of Transportation, 2006.
- GRIGORIADIS, K. Measurement and characterisation of concrete substrate roughness in patch repairs. In: EUROPEAN BRIDGE CONFERENCE, 16., 2015, Edinburgh: Shura, 2015.
- GRUBBS, Frank E.. Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples. *Technometric*, Maryland, v. 11, n. 1, p.1-21, fev. 1969.
- HOLLAWAY, L. C.; LEEMING, M. B. *Strengthening of reinforced concrete structures: Using externally-bonded FRP composites in structural and civil engineering*. Cambridge: Woodhead Publishing, 1999.
- IOVINELLA, I.; PROTA, A.; MAZZOTTI, C. Influence of surface roughness on the bond of FRP laminates to concrete. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 40, p.533-542, mar. 2013.
- JABBAR, A. *Sustainable Jute-Based Composite Materials: Mechanical and Thermomechanical Behaviour*. Warsaw: Springer, 2017.
- JONES, R. M. *Mechanics Of Composite Materials*. 2. ed. Ann Arbor: Taylor & Francis, 1998.
- KANG, T. H. K. et al. A State-of-the-Art Review on Debonding Failures of FRP Laminates Externally Adhered to Concrete. *International Journal Of Concrete Structures And Materials*, [s.l.], v. 6, n. 2, p.123-134, jun. 2012.
- KARZAD, Abdul Saboor et al. Repair of reinforced concrete beams using carbon fiber reinforced polymer. *Matec Web Of Conferences*, [s.l.], v. 120, p.1008-1018, 2017. EDP Sciences.
- KAURA, J. M. Optimisation of thickness of fibre reinforced polymer sheets for strengthening reinforced concrete beams with flexural deficiency. *Nigerian Journal Of Technology*, Nsukka, v. 36, n. 1, p.45-49, jan. 2017.
- KOTYNIA, Renata. Debonding Phenomena in FRP – Strengthened Concrete Members. *Brittle Matrix Composites 8*, [s.l.], p.109-122, 2006.

- LAU, Kin-tak; ZHOU, Li-min. Mechanical performance of composite-strengthened concrete structures. *Composites Part B: Engineering*, [s.l.], v. 32, n. 1, p.21-31, jan. 2001.
- LOPES, M. de M.; BRANCO, V. T. F. C.; SOARES, J. B. Utilização dos testes estatísticos de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk para verificação da normalidade para materiais de pavimentação. *Transportes*, [s.l.], v. 21, n. 1, p.59-66, 30 abr. 2013.
- LOPES, N. *Arquitetura, Engenharia e Construção*. Vendas de cimento caem 6,4% em 2017, mas setor espera alta em 2018. 2018. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/cont/n/vendas-de-cimento-caem-64-em-2017-mas-setor-espera-alta-em-2018_16791>. Acesso em: 15 jan. 2019.
- PETRIE, E. M. *Handbook of Adhesives and Sealants*. London, UK: McGraw-Hill, 2000.
- MAALEJ, M.; LEONG, K. S. Effect of beam size and FRP thickness on interfacial shear stress concentration and failure mode of FRP-strengthened beams. *Composites Science And Technology*, [s.l.], v. 65, n. 7-8, p.1148-1158, jun. 2005.
- MALLICK, P. K.. *Fiber reinforced composites: Materials, Manufacturing, and Design*. 3. ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2008.
- MAYS, G. C.; HUTCHINSON, A. R. *Adhesives in Civil Engineering*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- MARQUES, G. G. *Análise experimental de sistemas de reforço estrutural à flexão com laminados de PRFC aplicados a vigas de concreto armado*. 2017. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2017.
- MCCARTHY, N. *China Produces More Cement Than The Rest Of The World Combined*. 2018. Disponível em: <<https://www.forbes.com/sites/niallmccarthy/2018/07/06/china-produces-more-cement-than-the-rest-of-the-world-combined-infographic/#7a0d9e1f6881>>. Acesso em: 15 jan. 2019.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concrete: Microstructure, properties, and materials*. 3. ed. Berkeley: McGraw-hill Companies, 2005.
- MELLO, G. *Reuters*. 2019. Disponível em: <<https://br.reuters.com/article/businessNews/idBRKCN1P222U-OBRBS>>. Acesso em: 15 jan. 2019.
- MICHELS, J. et al. Mechanical performance of cold-curing epoxy adhesives after different mixing and curing procedures. *Composites Part B: Engineering*, [s.l.], v. 98, p.434-443, ago. 2016.
- MORGAN, D.R.. Compatibility of concrete repair materials and systems. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 10, n. 1, p.57-67, fev. 1996.

- MORGAN, R. J. *Epoxy Resins and Composites I*. Heidelberg: Springer, 1986.
- MOSTOFINEJAD, D.; SHAMELI, S. M. Externally bonded reinforcement in grooves (EBRIG) technique to postpone debonding of FRP sheets in strengthened concrete beams. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 38, p.751-758, jan. 2013.
- MUKHTAR, F. M.; FAYSAL, R. M. A review of test methods for studying the FRP-concrete interfacial bond behavior. *Construction And Building Materials*, v. 169, p.877-887, Apr. 2018.
- NEVILLE, A. M. *Properties of concrete*. 5. ed. Harlow: Pearson Prentice Hall, 2012.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. *Concrete Technology*. 2. ed. Harlow: Pearson, 2010.
- PEDROSO, Fábio Luís. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. *Concreto & Construções*, São Paulo, n. 53, p.14-19, jan. 2009.
- PESSÔA, José Renato de Castro. Análise numérico-experimental de estruturas de concreto com utilização da energia de fraturamento. 2007. 118 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) - Departamento de Modelagem Computacional, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2007.
- POPOVICS, Sandor; UJHELYI, Janos. Contribution to the Concrete Strength versus Water-Cement Ratio Relationship. *Journal Of Materials In Civil Engineering*, [s.l.], v. 20, n. 7, p.459-463, jul. 2008.
- PRITCHARD, Geoffrey. *Reinforced plastics durability*. Abington: Woodhead Publishing, 1999.
- RECENA, F. A. P. *Dosagem e controle da qualidade de concretos convencionais de cimento portland*. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2015.
- REDDY, J. N.; MIRAVETE, A. *Composite laminates*. Boca Raton: Taylor & Francis, 1995.
- RILEM TC89-FMT. *Size effect method for determining fracture energy and process zone size of concrete, materials and structures*, 23 – 1990.
- RILEM TECHNICAL COMMITTEE 50 – FRACTURE MECHANICS OF CONCRETE. *Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of threepoint load tests on notched beams*. RILEM Draft Recommendation, v18, n106, - 1985.
- ROHEM, N. R. F. *Desenvolvimento de sistema de reparo de dutos e tubulações industriais utilizando materiais compósitos de matriz polimérica*. 2010. 101 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) - Departamento de Materiais, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2010.
- SANTOS, P. M. D.; JÚLIO, E. N. B. S. A state-of-the-art review on roughness quantification methods for concrete surfaces. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 38, p.912-923, jan. 2013.

SEN, R. Developments in the durability of FRP-concrete bond. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 78, p.112-125, mar. 2015.

SHAH, S. P.; CHOI, S.; JANSEN, D. C. Strain softening of concrete in compression. *Proceedings of Fracture Mechanics of Concrete Structures* (ed. FH Wittmann). AEDIFICATIO Publishers, Freiburg, v. 3, p. 1827-1841, 1996.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B.. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika*, [s.l.], v. 52, n. 3/4, p.591-611, dez. 1965.

SILVA, L. F. M. da; MAGALHÃES, A. G. de; MOURA, M. F. S. F. de. *Juntas Adesivas Estruturais*. Porto: Publindústria, 2007.

SILVA, L. S. et al. Análise da influência da profundidade do entalhe na estabilidade da propagação da trinca em concreto. *Revista de Ciência e Tecnologia*, Boa Vista, v. 4, n. 6, p.1-14, jan. 2018.

SMITH, S. T; TENG, J. G. FRP-strengthened RC beams. I: review of debonding strength models. *Engineering Structures*, [s.l.], v. 24, n. 4, p.385-395, abr. 2002.

STRONG, A. B. *Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods, and Applications*. Dearborn: Society Of Manufacturing Engineers, 2008.

TARIGAN, J.; PATRA, F. M.; SITORUS, T. Flexural strength using Steel Plate, Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) and Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) on reinforced concrete beam in building technology. *Iop Conference Series: Earth and Environmental Science*, [s.l.], v. 126, p.12025-12040, mar. 2018.

VAN OSS, H. G. *Mineral Commodity Summaries 2017*. 2018. Disponível em: <<https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/mcs-2018-cemen.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2019.

WAN, B.; JIANG, C.; WU, Y. Effect of defects in externally bonded FRP reinforced concrete. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 172, p.63-76, maio 2018.

YALIM, Baris; KALAYCI, Ahmet Serhat; MIRMIRAN, Amir. Performance of FRP-Strengthened RC Beams with Different Concrete Surface Profiles. *Journal Of Composites For Construction*, [s.l.], v. 12, n. 6, p.626-634, dez. 2008.

YAO, J.; TENG, J.g.. Plate end debonding in FRP-plated RC beams—I: Experiments. *Engineering Structures*, [s.l.], v. 29, n. 10, p.2457-2471, out. 2007.

YIN, Y.; FAN, Y. Influence of Roughness on Shear Bonding Performance of CFRP-Concrete Interface. *Materials*, [s.l.], v. 11, n. 10, p.1875-1890, out. 2018.

ZHANG, S. S.; YU, T.; CHEN, G. M. Reinforced concrete beams strengthened in flexure with near-surface mounted (NSM) CFRP strips: Current status and research needs. *Composites Part B: Engineering*, [s.l.], v. 131, p.30-42, dez. 2017.

ANEXO A – Valores Críticos para Z

n	Nível de 5,0% de significância	Nível de 2,5% de significância	Nível de 1,0% de significância
3	1,15	1,15	1,15
4	1,46	1,48	1,49
5	1,67	1,71	1,75
6	1,82	1,89	1,94
7	1,94	2,02	2,1
8	2,03	2,13	2,22
9	2,11	2,21	2,32
10	2,18	2,29	2,41

Fonte: GRUBBS, 1969.

ANEXO B - Valores para os coeficientes a_{n-i+1}

$i \backslash n$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,707	0,707	0,687	0,664	0,643	0,623	0,606	0,588	0,573
2			0,167	0,241	0,280	0,303	0,316	0,324	0,329
3					0,087	0,140	0,174	0,197	0,214
4							0,056	0,094	0,122
5									0,039

Fonte: SHAPIRO; WILK, 1965.

ANEXO C - Valores para estatística w pelo nível de significância

N	1%	2%	5%	10%	50%
3	0,753	0,756	0,767	0,789	0,959
4	0,687	0,707	0,748	0,792	0,935
5	0,686	0,715	0,762	0,806	0,927
6	0,713	0,743	0,788	0,826	0,927
7	0,73	0,76	0,803	0,838	0,928
8	0,749	0,778	0,818	0,851	0,932
9	0,764	0,791	0,829	0,859	0,935
10	0,781	0,806	0,842	0,869	0,938

Fonte: SHAPIRO; WILK, 1965.