

**COMPORTAMENTO DE COLUNAS CURTAS REFORÇADAS COM
COMPÓSITOS DE RESINA GEOPOLIMÉRICA E FIBRAS DE
CARBONO**

KÍSSILA BOTELHO GOLIATH

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
FEVEREIRO - 2017**

**COMPORTAMENTO DE COLUNAS CURTAS REFORÇADAS COM
COMPÓSITOS DE RESINA GEOPOLIMÉRICA E FIBRAS DE
CARBONO**

KÍSSILA BOTELHO GOLIATH

"Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção de título de Mestre em Engenharia Civil".

Orientador: Prof. Dylmar Penteado Dias
Coorientador: Sergio Luis González Garcia

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

FEVEREIRO - 2017

COMPORTAMENTO DE COLUNAS CURTAS REFORÇADAS COM COMPÓSITOS DE RESINA GEOPOLIMÉRICA E FIBRAS DE CARBONO

KÍSSILA BOTELHO GOLIATH

"Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção de título de Mestre em Engenharia Civil".

Aprovada em 22 de fevereiro de 2017

Comissão Examinadora:

Prof. Luiz Antonio Vieira Carneiro, D. Sc – IME

Prof. Jonas Alexandre, D. Sc – LECIV - UENF

Prof. Sergio Luis González Garcia, D. Sc. - LECIV-UENF

Coorientador

Prof. Dylmar Penteado Dias, D. Sc. - LECIV-UENF

Orientador

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à minha mãe, Wilma, sem ela eu nunca pensaria em fazer o mestrado e não teria condições para o mesmo. Foi ela que, apesar de todas as minhas ausências, soube entender as minhas aflições, meus medos e compartilhar as minhas alegrias e vitórias. Sinto orgulho em dizer que me espelho nela, sigo seus exemplos e que graças a ela estou concluindo mais uma etapa de minha vida.

Hoje, terminando o mestrado e almejando alcançar sonhos maiores, agradeço ao meu namorado, amigo e companheiro, Igor, que ao longo dessa trajetória me apoiou em todos os momentos e compartilha dos meus sonhos. Obrigada por me compreender, cuidar de mim e por me dar força para que eu nunca desista.

Agradeço ao meu pai por aceitar minhas escolhas e apoiá-las. Aos meus avós, por sempre estarem ao meu lado e entenderem minha ausência.

Aos professores, orientadores e amigos, Dylmar e Sergio, por todo conhecimento transmitido, pela paciência e dedicação comigo, fazendo o possível para o desenvolvimento da pesquisa.

No decorrer do mestrado tive a oportunidade de fazer amigos para a vida e não poderia deixar de agradecer ao Fernando e à Thaís, minha panelinha amada, por toda ajuda na pesquisa. Vocês foram fundamentais em todos os sentidos, compartilhamos angústias e alegrias. Obrigada por tudo!

Nesses seis anos de UENF, quatro de graduação e dois de mestrado, fiz amigos que levarei para vida toda e que tornaram essa trajetória mais fácil. Não seria possível listar todos, são muitos, mas em especial aos meus fofos, Ju, Lut, João, Valber, Thaís, Tonim e Erick.

De modo geral gostaria de agradecer a todos os professores, técnicos e servidores da UENF por tornar desta universidade um ambiente acolhedor e familiar para mim e todos os estudantes.

“Você não pode mudar o vento, mas você pode ajustar as velas do barco para chegar onde quer (Confúcio).”

Sumário

Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	xi
Lista de Símbolos	xiii
Resumo	xv
Abstract	xvi
Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 - Considerações iniciais	1
1.2 – Objetivos	4
1.2.2 – Objetivos específicos	5
Capítulo 2 - Compósitos de matriz geopolimérica e fibra de carbono	6
2.1- Geopolímeros.....	6
2.2- Terminologia	7
2.3- Ativação alcalina	9
2.4- Aplicações.....	11
2.5 - Compósitos reforçados com fibra de carbono.....	14
2.5.1- Matriz	14
2.5.2- Fibra.....	16
2.5.3- Compósitos	19
2.5.4- Aderência.....	23
2.5.5- Compósitos de matriz geopolimérica e fibra de carbono	27
Capítulo 3 - Reforço estrutural em pilares de concreto	30
3.1- Introdução	30
3.2- Reforço estrutural.....	31
3.3- Reforço de pilares de concreto armado	33

3.4- Pilares reforçados com compósitos de fibra de carbono.....	35
3.4.1- Execução do reforço de pilares com compósitos de fibra	37
3.4.2- Pesquisas sobre o reforço de pilares encamisados e o uso de CRF	39
3.4.3 – Modelos de Cálculos Propostos Por Diferentes Pesquisadores.....	41
3.4.3.1 - MIYAUCHI <i>et al.</i> (1997)	41
3.4.3.2 - TOUTANJI (1999)	42
3.4.3.3 - XIAO e WU (2000)	45
3.4.3.4 – CAMPIONE e MIRAGLIA (2003).....	46
Capítulo 4 - Programa Experimental	48
4.1 – Materiais.....	49
4.1.1- Concreto	49
4.1.2 – Resina geopolimérica	51
4.1.3 - Sistema de reforço	53
4.2 – Metodologia.....	56
4.2.1 - Concreto	56
4.2.2 – Resina geopolimérica	58
4.2.3 – Sistema de reforço	62
4.3 - Descrição dos ensaios	67
Capítulo 5 - Resultados e discussão.....	74
5.1- Resistência à compressão do concreto confinado	74
5.2- Deformação última	79
5.3- Curvas tensão <i>versus</i> deformação.....	83
5.4- Modo de ruptura.....	92
Capítulo 6 - Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.....	100
Referências Bibliográficas	102
Anexo I	

Lista de Figuras

Figura 1.1- Mapa da evolução dos laboratórios que investigam os materiais geopoliméricos (Fonte: www.geopolymer.org.br).....	4
Figura 2.1 – Estrutura proposta para o polímero Na-polissialato (DAVIDOVITS, 1994).	7
Figura 2.2 - Estrutura do geopolímero em forma de cadeia (DAVIDOVITS, 1988).	8
Figura 2.3 - Três diferentes tipos de polissialatos de acordo com o valor de z.	8
Figura 2.4- Estrutura da caulinita (SOUZA, 2009).....	10
Figura 2.5 -Quadro geral das aplicações (PINTO, 2006).	13
Figura 2.6- Ampliação em microscópio eletrônico de varredura de um sistema compósito estruturado com fibra de carbono e resina (MACHADO, 2011).	15
Figura 2.7- Diagrama tensão versus deformação de fibras e metais (BEBER, 2003).	18
Figura 2.8- Diagrama tensão-deformação para materiais compósitos (MACHADO, 2011, modificado).....	19
Figura 2.9- Esquema do ensaio tração - compressão (PACHECO, 2006).....	24
Figura 2.10- (a) Detalhe do entalhe da viga; (b) Reparo/Reforço da viga com geopolímero (MAZZA, 2010).....	25
Figura 2.11- Tipos de ruptura que ocorreram no ensaio da AFNOR NF P-18-851:1992 (MAZZA, 2010).....	26
Figura 2.12- Sistema de reforço com compósitos de fibra de carbono e geopolímero (BALAGURU et al., 1999c, modificado).	28
Figura 2.13- Extensão da cura e viscosidade da resina geopolimérica versus tempo de cura a 80°C (BALAGURU et al., 1999c, modificado).....	29
Figura 3.1 - Gráfico hipotético de um pilar reforçado com CAR e CRFC (TAKEUTI, 2003).	33
Figura 3.2 - Comportamento do concreto confinado (TAKEUTI, 2003).....	34
Figura 3.3 - Representação esquemática de coluna confinada por CRFC (MACHADO, 2011).	35
Figura 3.4 - Tensões e deformações de sistemas não confinados e confinados (MACHADO, 2011, modificado).	36
Figura 3.5 - Fases de aplicação do reforço com manta de CRF (PEREIRA, 2012). .	38
Figura 4.1 - Manta de fibra de carbono da Viapol, Carbon CFW 300.....	54

Figura 4.2 - Viapol Carbon Primer.....	55
Figura 4.3 - Viapol Carbon saturante (resina de impregnação).....	56
Figura 4.4 - Dimensões do pilar.	56
Figura 4.5 - Ensaio do abatimento do tronco do cone.....	57
Figura 4.6 - Mistura dos ativadores alcalinos.	59
Figura 4.7 - Mistura da resina geopolimérica em argamasadeira.....	60
Figura 4.8 - Corpos de prova da resina geopolimérica.....	61
Figura 4.9 - Instrumentação do corpo de prova de resina geopolimérica ensaiada aos 28 dias.....	62
Figura 4.10 - Fluxograma da metodologia do reforço realizado.	63
Figura 4.11 - Superposição da manta de fibras de carbono.....	64
Figura 4.12 - Realização do sistema com uma camada de reforço com compósito de fibra de carbono e resina epóxi.	65
Figura 4.13 - Realização do sistema com uma camada de reforço com compósito de fibra de carbono e resina geopolimérica (continua).....	66
Figura 4.13 - Realização do sistema com uma camada de reforço com compósito de fibra de carbono e resina geopolimérica (continuação).....	67
Figura 4.14 - Ensaio de resistência à compressão axial da resina geopolimérica. ...	67
Figura 4.15 - Ensaio de resistência à tração indireta da resina geopolimérica.	68
Figura 4.16 - Resistência à compressão axial em função do tempo.	68
Figura 4.17 - Curva tensão-deformação da resina geopolimérica aos 28 dias.	69
Figura 4.18 - Corpo de prova do compósito de resina epóxi e uma camada de fibra de carbono para o ensaio de tração direta.....	70
Figura 4.19 - Corpo de prova do compósito de resina geopolimérica e uma camada de fibra de carbono para o ensaio de tração direta.....	71
Figura 4.20 - Ensaio de resistência à tração direta do compósito.....	71
Figura 4.21 - Corpos de prova de concreto instrumentados (a) reforçado com resina geopolimérica; (b) reforçado com resina epóxi; (c) concreto de referência (continua).	72
Figura 4.21 - Corpos de prova de concreto instrumentados (a) reforçado com resina geopolimérica; (b) reforçado com resina epóxi; (c) concreto de referência (continuação).....	73
Figura 5.1 – Evolução da resistência à compressão do concreto versus número de camadas.....	75

Figura 5.2 - Curva de resistência mecânica relativa do núcleo de concreto versus tensão relativa máxima lateral de confinamento.	77
Figura 5.3 – Resistência à compressão do concreto calculadas para resina epóxi segundo pesquisadores e resultados experimentais.....	78
Figura 5.4 - Resistências à compressão do concreto calculadas para resina geopolimérica segundo pesquisadores e ensaios experimentais.....	78
Figura 5.5 – Deformações longitudinais últimas calculadas para resina epóxi segundo a literatura.	81
Figura 5.6 – Deformações longitudinais últimas calculadas para resina geopolimérica segundo a literatura.....	81
Figura 5.7 – Curva tensão versus deformação do concreto de referência.	83
Figura 5.8 – Curvas tensão <i>versus</i> deformação dos concretos reforçados com compósito de resina epóxi e fibra de carbono: (a) uma camada; (b) duas camadas; (c) comparação com o concreto de referência.	84
Figura 5.9 – Curvas tensão <i>versus</i> deformação dos concretos reforçados com compósito de resina geopolimérica e fibra de carbono: (a) uma camada; (b) duas camadas; (c) comparação com o concreto de referência.....	86
Figura 5.10 – Curvas tensão <i>versus</i> deformação do núcleo do concreto confinado com uma camada de reforço.	87
Figura 5.11 – Curvas tensão <i>versus</i> deformação do núcleo do concreto confinado com duas camadas de reforço.....	87
Figura 5.12 – Curvas tensão <i>versus</i> deformação comparando os resultados calculados segundo a literatura e os experimentais para resina epóxi com: (a) uma camada; (b) duas camadas.....	88
Figura 5.13 – Curvas tensão <i>versus</i> deformação comparando os resultados calculados segundo a literatura e os experimentais para resina geopolimérica com: (a) uma camada; (b) duas camadas.....	89
Figura 5.14 – Curvas tensão <i>versus</i> deformação ampliada, comparando os resultados calculados segundo a literatura e os experimentais para resina epóxi com: (a) uma camada; (b) duas camadas.....	90
Figura 5.15 – Curvas tensão <i>versus</i> deformação ampliada, comparando os resultados calculados segundo a literatura e os experimentais para resina geopolimérica com: (a) uma camada; (b) duas camadas.....	91
Figura 5.16 – Aspecto pós ruptura do concreto de referência.....	92

Figura 5.17 – Aspecto pós ruptura do concreto confinado com resina epóxi e fibra de carbono: (a) uma camada; (b) duas camadas.....	92
Figura 5.18 – Aspecto pós ruptura do concreto confinado com resina geopolimérica e fibra de carbono: (a) uma camada; (b) duas camadas.....	92
Figura 5.19 – Detalhe da ruptura do (a) RRE1C e (b) RRE2C.....	93
Figura 5.20 - Detalhe da ruptura do (a) RRG1C e (b) RRG2C.....	93
Figura 5.21 – Passos da execução da nova metodologia.....	96
Figura 5.22 – Aspecto pós ruptura do RRG1C e RRG1C-1.2A.....	98
Figura 5.23 – Aspecto pós ruptura do concreto confinado com resina geopolimérica e uma camada fibra de carbono: (a) RRG1C-1.2N; (b) RRG1C-1.0A; (c) RRG1C-1.0N.	98

Lista de Tabelas

Tabela 2.1- Propriedades típicas de algumas fibras (BEBER, 2003).....	17
Tabela 2.2- Características dos sistemas pré-fabricados e in situ (BEBER, 2003)...	23
Tabela 3.1 - Possíveis causas do surgimento das manifestações patológicas (BEBER, 2003).....	31
Tabela 3.2 - Pesquisadores e conclusões relevantes para o presente estudo.	39
Tabela 4.1 – Consumo de material para um 1m ³ de concreto.	50
Tabela 4.2 - Propriedades físicas do metacaulim.....	51
Tabela 4.3 - Composição química do metacaulim obtida por fluorescência de raio x.	52
Tabela 4.4 - Composição química do cimento CP II E-32 obtida por fluorescência de raio x.	52
Tabela 4.5 - Propriedades físicas e químicas do Silicato de sódio alcalino comercial.	53
Tabela 4.6 - Características técnicas da manta de fibra de carbono.....	54
Tabela 4.7 - Características técnicas <i>primer</i>	55
Tabela 4.8 - Características técnicas da resina saturante.....	55
Tabela 4.9 - Razões molares das matérias primas.	59
Tabela 4.10 - Produção da resina geopolimérica.	60
Tabela 4.11 - Composição e consumo dos materiais para produção da resina geopolimérica para moldagem de 3 corpos de prova.....	61
Tabela 4.12 - Nomenclatura adotada para os pilares e parâmetros avaliados.	63
Tabela 4.13 - Ordem de execução do sistema compósito de fibra de carbono e resina epóxi.....	64
Tabela 4.14 - Resultados dos ensaios de compressão axial e tração indireta da resina geopolimérica.	69
Tabela 4.15 - Resultados dos ensaios de compressão axial e tração indireta da resina epóxi Viapol Carbon Saturante.....	70
Tabela 4.16 - Resultados do ensaio de tração direta dos compósitos.	72
Tabela 4.17 - Valores médios de resistência à compressão axial e deformação últimas dos corpos de prova ensaiados.....	73
Tabela 5.1 - Valores médios de resistência à compressão axial do núcleo de concreto dos corpos de prova ensaiados.....	74

Tabela 5.2 – Tensão total de confinamento.	76
Tabela 5.3 – Resultados da resistência à compressão do concreto confinado experimental e calculada segundo pesquisadores.	79
Tabela 5.4 - Valores médios das deformações longitudinal e transversal dos corpos de prova ensaiados.	80
Tabela 5.5 – Resultados de deformação longitudinal última do concreto confinado experimental e calculadas segundo a literatura.	82
Tabela 5.6 – Razões molares das matérias primas da resina geopolimérica.	95
Tabela 5.7 – Resultados dos ensaios realizados para a nova composição da resina geopolimérica.	95
Tabela 5.8 - Valores médios de resistência à compressão axial do núcleo de concreto dos novos corpos de prova ensaiados.	97

Lista de Símbolos

A_f – área da seção da armadura do compósito

b – largura da seção

b_f – largura do compósito

C_f – módulo de confinamento XIAO e WU (2000)

D – diâmetro do núcleo do concreto confinado

E_1 – tangente ao primeiro ramo da curva na origem

E_2 – tangente à curva no ponto de interseção dos dois ramos da curva

E_a – módulo de elasticidade da cola

E_{cs} – módulo de elasticidade do concreto

E_{ct} – módulo de elasticidade tangente do concreto

E_f – módulo de elasticidade do compósito

E_l – tangente ao primeiro ramo da curva tensão – deformação transversal do concreto confinado

f_c – resistência do concreto à compressão

f_{cc} – resistência do concreto confinado à compressão

f_{co} – resistência do concreto não confinado à compressão

f_{cu} – tensão última do concreto confinado à compressão

f_f – resistência do compósito à tração experimental

f_l – tensão lateral máximo de confinamento

f_{le} – tensão lateral máxima efeito de confinamento

k_e – coeficiente que leva em conta as características geométricas da seção

k_l – coeficiente que leva em considerações as características do material confinante

n_f – número de camadas do reforço

P_m – carga de ruptura do compósito

t_a – espessura da camada de cola

t_f – espessura do compósito

ε_a – deformação no ponto de interseção dos dois ramos da curva tensão – deformação longitudinal

ε_c – deformação do concreto

ε_{cc} – deformação última do concreto confinado

ε_{co} – deformação correspondente ao pico da curva tensão – deformação longitudinal do concreto não confinado

ε_{ct} – deformação transversal do concreto

ε_{cu} – deformação última do concreto

ε_f – deformação do compósito

ε_{fu} – deformação última do compósito

ε_m – deformação da matriz

λ – coeficiente definido por MIYAUCHI *et al.* (1997)

ν – coeficiente de Poisson do concreto não confinado

ν' – coeficiente de Poisson do concreto confinado

ρ_f – taxa de armadura volumétrica longitudinal do compósito

σ – tensão normal

σ_a – tensão no ponto de interseção dos dois ramos da curva tensão – deformação longitudinal

σ_c – tensão longitudinal de compressão do concreto

σ_f – tensão no material de reforço

σ_l – tensão no lateral de confinamento

σ_m – tensão de ruptura da matriz

Resumo

Os materiais compósitos reforçados com fibras, pelas suas características e propriedades, têm potencial para impulsionar o mercado do reparo e reforço de estruturas de concreto, sendo essencial pesquisas para fornecer dados sobre o comportamento a curto e longo prazo desses sistemas. Os geopolímeros possuem propriedades físicas, químicas e mecânicas que revelam grande potencial de utilização como adesivo. Com isso, este trabalho visou o reforço de pilares de concreto simples com auxílio de compósitos de fibras de carbono colados com resinas geopoliméricas. Foi estudada a eficácia do conjunto para o reforço da estrutura ao se variar o número de camadas de reforço e compará-la com a de um reforço com o uso de uma resina epóxi comercial. A pesquisa investigou o melhor traço para a composição da resina geopolimérica, tendo em vista a viscosidade para adequada aplicação em pilares de concreto, assim como sua resistência à compressão em diferentes idades. Ante o exposto, foram confeccionados 18 pilares de concreto simples, sendo 6 de referência e realizado o reforço com manta de fibra de carbono com 1 e 2 camadas, sendo 6 corpos de prova colados com resina geopolimérica e 6 com resina epóxi comercial. Verificou-se por meio dos resultados, que o reforço de 1 e 2 camadas com fibra de carbono e resina geopolimérica aumentou a resistência do pilar em 37% e 103%, enquanto o reforço com a resina epóxi levou a ganhos médios de 101% e 191%, respectivamente. Foi também comprovada a eficácia da resina geopolimérica no reforço de pilares de concreto, em função da boa aderência da resina entre o substrato de concreto e o compósito reforçado com fibras de carbono, tornando viável a substituição da resina comercial pela geopolimérica.

Palavras-chave: fibra de carbono, reforço, resina geopolimérica.

Abstract

Composite materials reinforced with fibers, by their characteristics and properties, have potential to increase the repair and strengthening market of concrete structures, meanwhile researches are essential to provide data about the behavior of these systems on short and long term. Geopolymers have presented physical, chemical and mechanical characteristics that have revealed great potential to be used as adhesive. Thus, this work aimed to study plain concrete columns strengthened with carbon fiber bonded with geopolymeric resins. It was studied and analysed the effectiveness of this set for the system of the structure when varying the number of reinforcement layers, comparing it to that of a strengthening with the use of a commercial epoxy resin. This research investigated the best feature for the composition of the geopolymeric resin, taking into account its viscosity to the appropriated application in concrete columns, as well as its compressive strength at different ages. It was made 18 plain concrete columns, being 6 for reference reinforcement with carbon fiber with 1 and 2 layers, being 6 samples bonded with geopolymeric resin and 6 ones bonded with comercial epoxy resin. Through the results it was verified that with 1 and 2 layers of strengthening with carbon fiber and geopolymeric resin increased the concrete system in 37% to 103%, while the epoxy resin obtained gains from 101% to 191%, respectively. It was proved through the evidence of the good adherence of the resin between the concrete substract and the reinforced composite with carbon fibers, the effectiveness of geopolymeric resin for the strengthening of concrete columns, making viable the replacement of the commercial resin with the geopolymeric one.

Keywords: carbon fiber, reinforcement, geopolymeric resin.

Capítulo 1 - Introdução

1.1 - Considerações iniciais

Ao longo da história da construção civil, desde que o homem dominou as técnicas de incorporação do aço no concreto, mais conhecida como concreto armado, na segunda metade do século IX, a fim de se obter um produto final mais resistente, é perceptível a disseminação e o desenvolvimento do uso de tal técnica em edificações. Segundo METHA e MONTEIRO (1994), esse foi o material de construção mais utilizado no século XX e ainda é um dos materiais mais importantes na Engenharia Civil, assumindo um papel de destaque nessa área. BEBER (2003) reafirma que o século XX foi marcado pela consolidação do concreto armado como um dos materiais mais importantes da engenharia estrutural. Porém, de acordo com JUVANDES (1999), só após a segunda Guerra Mundial se passou a construir estruturas mais esbeltas e arrojadas.

Nos dias de hoje é compreendido que o sistema construtivo não se limitar à sua entrega. Ao se projetar um edifício, por exemplo, têm-se o objetivo que ele possa satisfazer o uso no qual foi projetado ao longo dos anos, e durante esse período deve apresentar condições pertinentes para o qual foi designado. De acordo com a Revisão de Perspectivas de Urbanização do Mundo, publicado pela ONU em 2014, é previsto que a proporção da população do mundo que vive em áreas urbanas deve aumentar para 66% até 2050 e, acompanhando este incremento, há o crescimento das áreas edificadas. Portanto, as construções devem ser resistentes às suas condições de uso e aos fatores ambientais que podem vir a modificar seus parâmetros iniciais, evitando assim que sua vida útil seja ameaçada.

Outro fator que deve ser levado em conta e dada importância é que, proporcional ao crescimento das construções e o uso do concreto, aumenta-se o consumo de cimento. Esse último material, vastamente usado na construção civil, é motivo de pesquisas na área de Ciências dos Materiais e Engenharia Civil e preocupa profissionais da área devido à grande liberação de CO₂ para sua produção.

Para que se possa garantir a vida útil de uma construção, a durabilidade do concreto é de extrema importância, bem como a do edifício como um todo, que está diretamente ligada tanto aos materiais utilizados para a sua construção quanto à

interação entre cada elemento que o constitui, ocasionando, assim, a boa aplicabilidade do produto final. Tais aspectos da estrutura, de serem resistentes às influências do meio, calculados e estipulados anteriormente em projeto, certifica a edificação à sua durabilidade, como predeterminado na norma ABNT NBR 6118 (2014).

Como é possível observar, estruturas em concreto armado são resistentes e seguras; porém, é necessário que a obra seja executada criteriosamente, de acordo com as orientações das normas existentes e do projeto. Contudo, falhas na execução do projeto, agentes biológicos e ambientais, incompatibilidade de materiais, forças superiores às previstas em projeto, variações térmicas e de umidade, entre outras, tornam propícia a ocorrência de manifestações patológicas, ou seja, surgimento de problemas patológicos como reflexos dos processos construtivos.

Para solucionar algumas manifestações patológicas, por diversas vezes, são essenciais interferências ao longo da vida útil de uma edificação com o intuito de resgatar o componente estrutural deteriorado ou de adequá-la às novas necessidades dos usuários, como, por exemplo, o aumento ou regeneração da capacidade resistente. O aumento desta capacidade é conhecido na Engenharia Civil como reforço, assim como a regeneração do mesmo, recuperação.

Muitas vezes a compreensão entre reforço e recuperação é erroneamente confundida, pois estão diretamente ligados. A definição de reforço se refere à ampliação da capacidade resistente de uma estrutura, como dito anteriormente. Já o conceito de recuperação se relaciona à recuperação desta capacidade.

Dentre as várias técnicas de se reforçar um pilar, observou-se na literatura benefícios daquelas que investigam o confinamento externo do concreto com uso de compósito de resina e fibra. Por meio de tal procedimento é possível realizar o reforço, atribuindo pequenos acréscimos nas dimensões e peso do elemento estrutural. Segundo CAZARREDO (2002), o efeito do confinamento se desenvolve devido à incorporação de pressões laterais ao eixo longitudinal do pilar, possibilitando, então, o aumento da capacidade resistente e da ductilidade. O aumento da capacidade se desenvolve por meio da impossibilidade da deformação transversal, impedida pelo confinamento.

Os materiais utilizados nos procedimentos de recuperação ou reforço de uma estrutura são tão importantes quanto sua correta técnica de aplicação, em função de determinada manifestação patológica. Em virtude disso, atualmente, têm-se verificado

grande demanda por pesquisas na área de materiais de construção e uma constante evolução no desenvolvimento de novos materiais, associados a antigas ou novas técnicas de reforço. Logo, é possível dar soluções mais eficientes e econômicas a problemas de engenharia, pois cada problema enfrentado tem suas próprias peculiaridades e necessita de materiais e técnicas específicas.

Um dos materiais compósitos que vem ganhando destaque entre pesquisadores são os compósitos reforçados com fibra de carbono (CRFC). Os compósitos CRFC, pelas suas características e propriedades, têm potencial para impulsionar o mercado de recuperação e reforço. Com isso, é essencial um conhecimento mais aprofundado de suas propriedades e eficiência em reforços estruturais, tanto para o fabricante das fibras quanto para os profissionais que as utilizam.

No mercado da construção civil, os compósitos reforçados com fibra de carbono mais adequados são os na forma pré-fabricada (laminados) ou os curados *in situ* (tecidos). Esses são colados na superfície do pilar com o auxílio de um adesivo/resina saturante de elevada viscosidade. Inúmeros estudos apresentam adesivos à base de resina epóxi (JUVANDES, 1999; ARAÚJO, 2002; BEBER, 2003; CARNEIRO, 2004; MARQUES, 2008; DIOGO, 2010; SARAIVA, 2011; SANTOS, 2013).

Os geopolímeros ou polissialatos demonstram propriedades físicas, químicas e mecânicas que revelam grande potencial de utilização como adesivo. Segundo o *Geopolymer Institute* (2014), o aumento das pesquisas sobre geopolímeros só ganhou força nos últimos 10 anos. A Figura 1.1 aponta a evolução do número de laboratórios envolvidos na investigação desse material, de 1999 a 2010.

Contudo, esse material vem ganhando cada vez mais destaque em pesquisas no Brasil e no mundo (HARDIJITO *et al.*, 2004; PALOMO *et al.*, 2007; SKAF, 2008; MAZZA, 2010; MELO, 2011; CHENG *et al.*, 2012; SALEM *et al.*, 2015; NATH *et al.*, 2016; RAJARAJESWARI *et al.*, 2016; GUADES, 2016; entre outros).

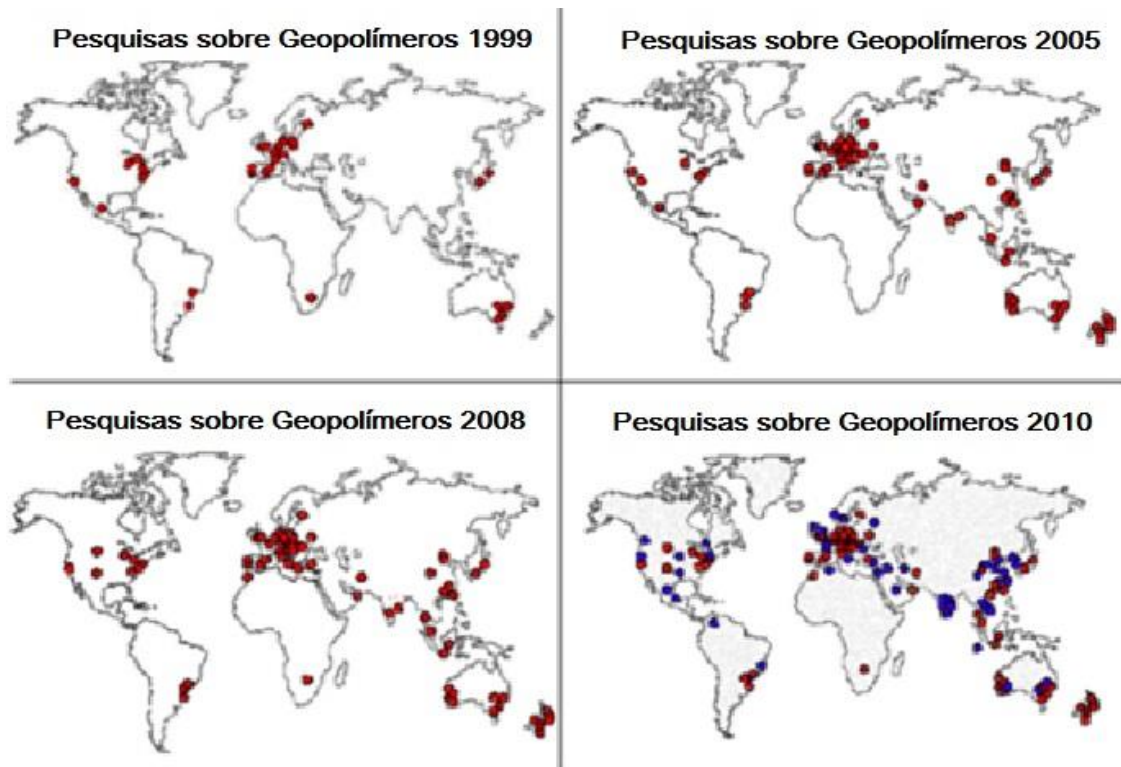


Figura 1.1- Mapa da evolução dos laboratórios que investigam os materiais geopoliméricos (Fonte: www.geopolymer.org.br).

O desenvolvimento e estudo de novas tecnologias e novos materiais oferece uma alternativa para a Construção Civil. Logo, a necessidade de um estudo do comportamento dessa tecnologia como material de reparo e reforço de estruturas é essencial para que sua futura aplicação e comercialização seja conhecida e confiável.

Ante o exposto, o presente trabalho investiga a eficiência e as propriedades mecânicas de uma resina geopolimérica como adesivo/resina na colagem de mantas de fibra de carbono na superfície de pilares de concreto, por meio do confinamento externo.

1.2 – Objetivos

A seguir são mostrados os objetivos pertinentes a este trabalho de pesquisa.

1.2.1- Objetivo Geral

O reforço de pilares de concreto é o tema abordado no presente trabalho, com enfoque na utilização de um novo material, uma resina geopolimérica. O reforço será realizado por meio do confinamento externo de pilares de concreto simples com compósito de fibra de carbono, com o auxílio de uma resina geopolimérica, sendo esta, a inovação tecnológica desta pesquisa. Possuindo, como objetivo geral, a avaliação do comportamento mecânico e a aderência entre substrato de concreto - reforço, na busca de um melhor conhecimento teórico e experimental a respeito da aderência entre esses materiais e sua aplicação.

1.2.2 – Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- estudo da dosagem da resina geopolimérica de reforço;
- avaliação mecânica da resina geopolimérica;
- avaliação da aderência da resina frente ao substrato de concreto;
- estudo comparativo entre a resina geopolimérica e uma resina epóxi, comercial.

Tais objetivos são buscados por meio de um programa experimental para avaliar a eficácia do conjunto compósito de fibra de carbono/resina geopolimérica/concreto.

Capítulo 2 - Compósitos de matriz geopolimérica e fibra de carbono

2.1- Geopolímeros

Entre 1970 e 1973, devido a vários incêndios devastadores ocorridos na França, foi conveniente que se levasse à frente investigações para o desenvolvimento de novos materiais que pudessem ser resistentes ao calor, sob a forma de materiais plásticos não inflamáveis e não combustíveis (DAVIDOVITS, 1988).

De acordo com a literatura, os geopolímeros são o resultado de pesquisas realizadas desde 1939. Porém, apenas em 1978 o termo geopolímero foi criado e aplicado por Joseph Davidovits, e descritos pela primeira vez em 1981, em sua patente. Nesta foram apresentados vários exemplos de misturas de reagentes e processos de obtenção (SILVA, 2000). A ideia de usar este mineral químico para o desenvolvimento de uma nova família de ligantes minerais e polímeros minerais teria sido totalmente negligenciada até então.

Para que esse material possa ser estudado, é necessário que se entenda que os geopolímeros não são um único produto. É um conceito, ou seja, uma tecnologia que nos permite confeccionar diferentes materiais, entre eles os aglomerantes geopoliméricos para a confecção de argamassas, concretos, grautes, resinas, entre outros. De acordo com DAVIDOVITS (2008), os geopolímeros também podem ser considerados um novo material para compósitos com fibras e um novo cimento para concretos. Possuem características de dureza, durabilidade e estabilidade térmica de materiais cerâmicos, combinado com as principais vantagens de um material polimérico, como por exemplo, a ruptura dúctil e baixo custo.

Estes materiais diferem substancialmente de cimentos convencionais, pois os geopolímeros não apresentam a formação de hidratos, tais como C-S-H para formação da matriz e obtenção da resistência. Na verdade, os geopolímeros utilizam a policondensação de sílica, precursores de alumina e certa quantia de álcali para atingir resistência mecânica (SILVA, 2000).

2.2- Terminologia

Os geopolímeros são polímeros que se submetidos à policondensação se formam rapidamente à baixa temperatura, no espaço de poucos minutos. Além disso, conforme a literatura, eles ainda são ‘geo’, ou seja, inorgânicos, são estáveis à temperatura de até 1250°C e não inflamáveis. BARROS *et al.* (2012) ainda definem geopolímeros como polímeros inorgânicos, alcalinamente ativados de elevado desempenho térmico e mecânico, sendo um material estrutural alternativo.

De acordo com SKAF (2008), a ausência de uma cadeia de carbono diferencia os polímeros minerais e os orgânicos. Os polímeros minerais recorrem à química de polimerização, utilizando silicoaluminatos de Na⁺ ou K⁺. Uma vez evitada a operação de cristalização, é possível obter não somente uma resina, como também um ligante e um cimento geopolimérico.

A obtenção desses materiais é realizada por meio da policondensação de matérias primas naturais de origem geológica contendo aluminossilicatos. Logo, o termo geopolímeros, baseados em sílico-aluminatos, referem-se aos poli(sialatos), -Si-O-Al-O. Sialato é uma abreviatura de silício-oxo-aluminato. A rede consiste em tetraedros, SiO₄ e AlO₄, ligados alternadamente por meio da partilha de todos os oxigênios. Os íons positivos devem estar presentes nas cavidades para equilibrar as cargas negativas de Al³⁻ e Si⁴⁻ (em coordenação IV) com o oxigênio. Na Figura 2.1 é mostrada a estrutura proposta para o polímero Na-polissialato (DAVIDOVITS, 1994).

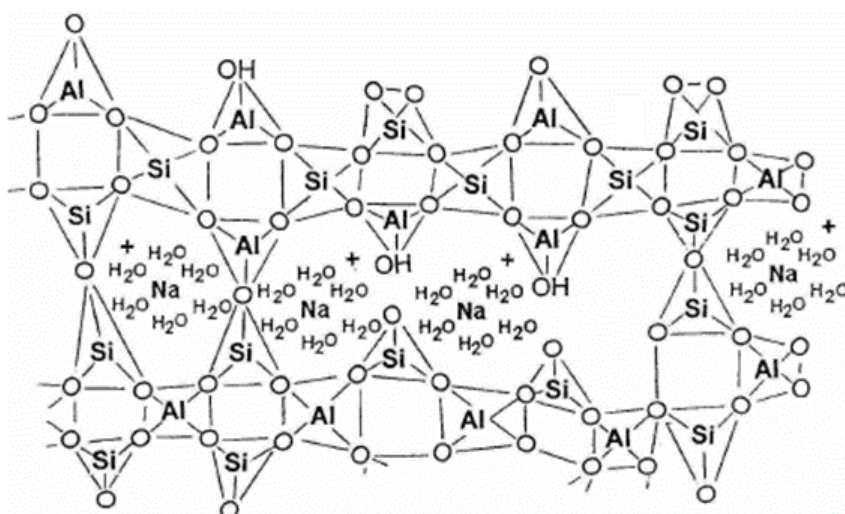


Figura 2.1 – Estrutura proposta para o polímero Na-polissialato (DAVIDOVITS, 1994).

O processo de policondensação envolve a reação química em condições ambientais alcalinas dos minerais Al-Si, produzindo a ligação polimérica Si-O-Al-O, que possui a fórmula empírica:



onde, M é um íon positivo (Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^+ , Ba^+ , NH_4^+ , H_3O^+), como mostrado na Figura 2.2. A letra n significa o grau de policondensação, w possui um valor em torno de 7 e “-” indica a presença de uma ligação (DAVIDOVITS, 1994).

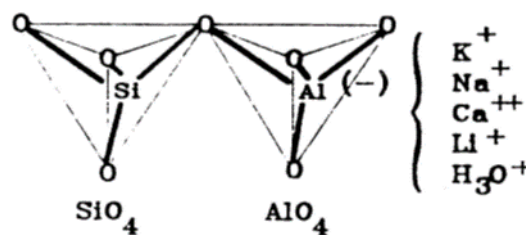


Figura 2.2 - Estrutura do geopolímero em forma de cadeia (DAVIDOVITS, 1988).

O valor de z distingue os três tipos de polissialatos, podendo ser (DUXSON *et al.*, 2005):

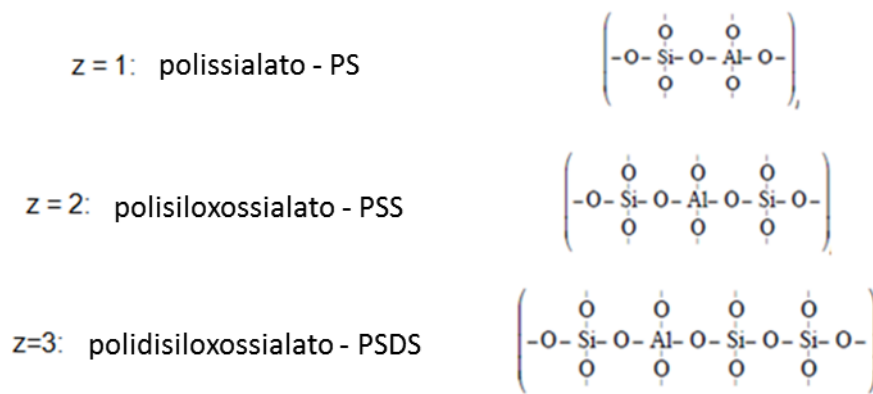


Figura 2.3 - Três diferentes tipos de polissialatos de acordo com o valor de z.

O produto formado é considerado uma rocha sintética cuja estrutura contém uma rede tridimensional amorfa de átomos de Si e Al. Contudo, a composição química dos materiais do geopolímero é similar a das zeólitas cristalinas; porém, revelam uma estrutura atômica amorfa.

As zeólitas são um grupo de aluminossilicatos cristalinos hidratados de metais alcalinos ou alcalino-terrosos (principalmente sódio, potássio, magnésio ou cálcio), caracterizados por uma considerável superfície interna de contato e grande capacidade de permuta de íons positivos. Possui estrutura cristalina, tridimensional, constituída por tetraedros de SiO_2 e AlO_4 , compartilhando todos os oxigênios (PINTO, 2006). A estrutura do aluminossilicato tem carga negativa e para a sua compensação atrai cátions, como, por exemplo, Na^+ ou K^+ , com os quais se liga facilmente.

Os materiais zeolíticos são conhecidos por suas habilidades para absorver resíduos de produtos químicos tóxicos. Eles bloqueiam resíduos perigosos no interior da matriz, além de atuarem como ligante para converter resíduos semi sólidos em um adesivo sólido. Concretos e argamassas antigas demonstram a incrível durabilidade dos cimentos zeolíticos, análogos aos geopolímeros sintéticos, de elevada resistência à erosão (DAVIDOVITS e DAVIDOVICS, 1988).

2.3- Ativação alcalina

A ativação alcalina se deve à reação de aluminossilicatos com substâncias alcalinas, que sofrem primeiramente um tratamento térmico, que envolve a perda de água e alteração da coordenação do íon alumínio com o oxigênio.

Os aluminossilicatos, como as escórias de alto forno, as cinzas volantes e as cinzas vulcânicas, por exemplo, são potenciais materiais de partida para a ativação alcalina. Porém, a ativação alcalina, de acordo com diferentes referências bibliográficas (DUXSON *et al.*, 2005; SOARES, 2006; MAZZA, 2010), pode ser efetuada em outros aluminossilicatos isentos de cálcio.

O caulim é um aluminossilicato natural que dá origem ao metacaulim, que pode ser ativado alcalinamente (DAVIDOVITS, 1991). O termo caulim é utilizado tanto para denominar a rocha que contém o mineral caulinita, quanto o produto resultante do beneficiamento da mesma. O caulim é o nome comercial dado a um tipo de argila, que possui coloração branca e é composta principalmente do mineral caulinita, como mostra a Figura 2.4.

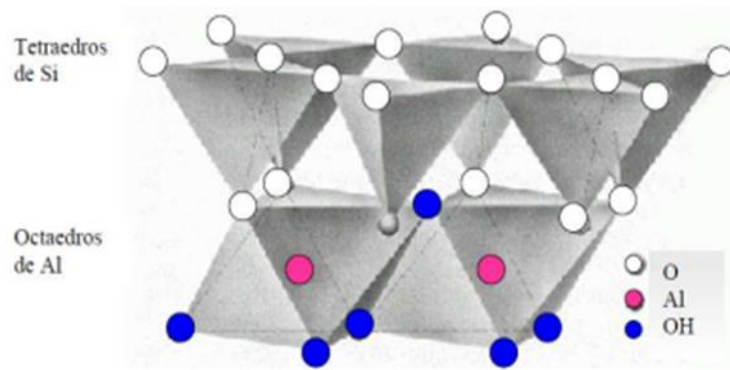


Figura 2.4- Estrutura da caulinita (SOUZA, 2009).

Já o metacaulim é produzido por meio do tratamento térmico do caulim a temperaturas entre 600 e 850°C. De acordo com SILVA (2000), o processo tem como objetivo remover os grupos de hidroxila e criar uma instabilidade química por meio da mudança do número de coordenação do Al, de VI para IV. O metacaulim, na forma de um produto industrializado e com qualidade controlada, teve início de fabricação no começo da década dos anos de 1990 nos Estados Unidos e Europa, e vem sendo fabricado no Brasil desde o início dos anos 2000 (ROCHA, 2005).

De acordo com SOUZA (2009), o metacaulim é considerado uma das melhores matérias primas para a síntese dos geopolímeros. Além disso, o metacaulim é uma importante fonte de silício e alumínio, sendo, por isso, considerado um bom precursor para a geopolimerização (CUIABANO, 2002).

A ativação alcalina do metacaulim provoca o aumento do teor de álcalis (cátions do tipo Na⁺ ou K⁺, por exemplo), e a partir da transformação da coordenação do alumínio, como já dito, é possível reorganizar a estrutura espacial do corpo sólido, estável e resistente (PINTO, 2006).

De uma forma simplificada, é possível afirmar que a reação de ativação alcalina se resume no processo de policondensação, em que tetraedros de SiO₄ e AlO₄ se ligam alternadamente entre si, compartilhando todos os oxigênios. Os cátions K⁺ e Na⁺ atuam como agentes formadores da estrutura, compensando o excesso de cargas negativas devido à alteração da coordenação do alumínio com o oxigênio, sendo os componentes que determinam as propriedades ligantes.

Diversos estudos na literatura (YADOLLAHI, 2013; DUXSON *et al.*, 2005; DIAS, 2001; DAVIDOVITS e SAWYER, 1985) mostram parâmetros que foram observados e são fundamentais para a obtenção dos polissialatos, a saber:

- natureza dos reagentes, incluindo composição mineral e química, por exemplo Si/Al ou Na/Si;
- relação molar entre os reagentes deve estar dentro de limites estabelecidos;
- condições de cura;
- ordem de mistura dos reagentes pode interferir nas propriedades do produto, assim como na velocidade das reações.

Problemas como porosidade excessiva, eflorescência e fissuração múltipla podem ocorrer caso não sejam estabelecidas as características adequadas para os reagentes, diminuindo, assim, a resistência mecânica do produto final.

2.4- Aplicações

Muitas das vantagens do uso dos geopolímeros na construção civil podem ser citadas, de acordo com diversos estudos (DAVIDOVITS, 1988b; BALAGURU, 1999a, SILVA, 2000; SOARES, 2006; FERREIRA, 2007; ZHAO *et al.*, 2007; MURTA, 2008):

- liberação rápida para uso da obra;
- elevada resistência mecânica inicial;
- excelente resistência ao fogo;
- resistência a ácido, sulfatos e à corrosão;
- baixa porosidade (comparada aos concretos com cimento Portland);
- durabilidade;
- resistência ao gelo e degelo;
- imobilização de resíduos tóxicos (devido à estrutura similar das zeólitas), entre outras.

Os materiais geopoliméricos possuem custo relativamente baixo para a sua produção, pois podem ser feitos com resíduos agroindustriais, e baixo consumo energético, quando comparados aos cimentos convencionais existentes no mercado. Do ponto de vista econômico, tecnológico e ecológico, materiais que venham a substituir os aglomerantes convencionais possuem papel inquestionável para a Construção Civil.

Diversos pesquisadores (BALAGURU, 1999; DIAS, 2001; SKAF, 2008; MAZZA, 2010; MELO, 2011; HUNG *et al.*, 2011; JUNAID *et al.*, 2016) têm proposto amplos campos de aplicação para os materiais geopoliméricos, como fabricação de concretos de elevado desempenho, compósitos para revestimentos antifogo em aeronaves, restauração de monumentos e construções históricas, melhoramento de solos, proteção de estruturas degradadas, balística, fabricação de moldes e outros, como mostra a Figura 2.5 (PINTO, 2006). O tipo de aplicação dos materiais geopoliméricos é determinado em função da estrutura química, ou seja, pela razão atômica Si:Al (SOARES, 2006).

De acordo com a Figura 2.5, a relação Si:Al = 3:1, refere-se a compósitos resistentes ao fogo, sendo esta, a aplicação do geopolímero mais relevante para o presente trabalho. O reforço de estruturas de concreto armado com compósito de matriz geopolimérica e fibra de carbono, realizado por BALAGURU (1999a), assim como o estudo realizado por HUNG *et al.* (2011), que são detalhados mais à frente. Ambos comprovaram que os compósitos geopoliméricos podem substituir os compósitos de fibra e matrizes cerâmicas ou orgânicas. Logo, o próximo item apresenta uma abordagem sobre os materiais compósitos de resina e fibra para que se conheçam as propriedades, vantagens e desvantagens destes materiais, podendo assim realizar um melhor entendimento de tais estudos.

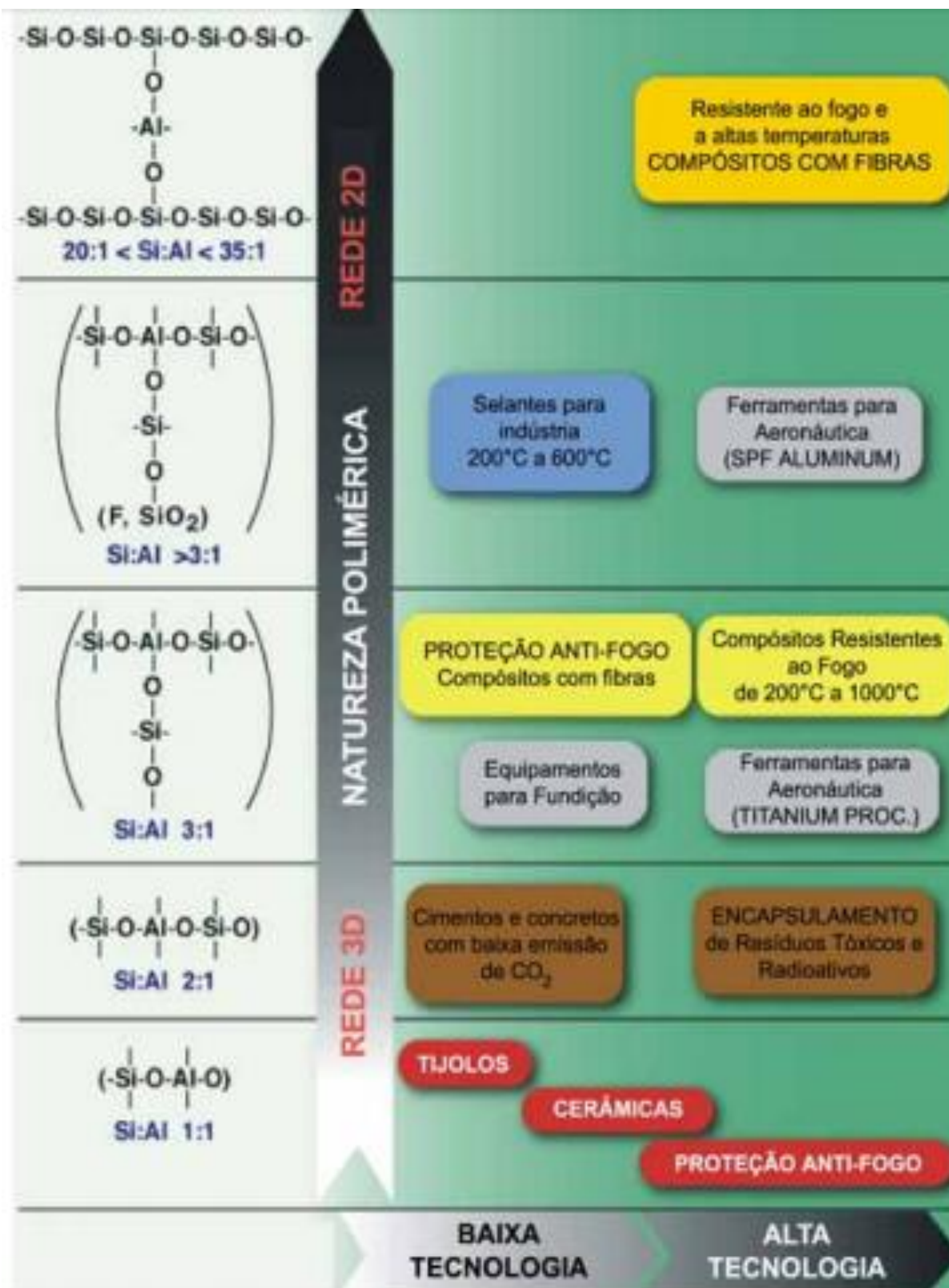


Figura 2.5 -Quadro geral das aplicações (PINTO, 2006).

2.5 - Compósitos reforçados com fibra de carbono

O uso de materiais compósitos é observado desde 1940, no campo da engenharia militar, aeroespacial, náutica e automobilística (JUVANDES *et al.*, 1996). CAZARREDO (2002) afirma que a primeira aplicação desse material foi por um compósito reforçado com fibra de vidro pela indústria aeronáutica em 1944.

Visto seu elevado desempenho, essa ‘família’ de materiais ganhou espaço no reforço e recuperação de estruturas na construção civil no Japão, no início dos anos de 1990 (CARNEIRO, 2004), onde, devido a abalos sísmicos, houve a necessidade de recuperação e reforço de pilares em um curto espaço de tempo (MACHADO, 2004). De acordo com SOUZA e RIPPER (1998), a utilização dos compósitos reforçados com fibra (CRF), como substituição aos materiais metálicos, data de 1954 com Rubinsky e Rubinsky. Entretanto, essa técnica de reforço só ganhou impulso no Japão devido aos abalos sísmicos, como dito anteriormente.

Os compósitos na forma de manta e tecidos de fibra de carbono foram produzidos no início dos anos de 1990. No Brasil, no final desta década (1998), ocorreu o reforço do viaduto de Santa Tereza, em Belo Horizonte, com mantas flexíveis de fibra de carbono (BEBER, 2003). A escolha do uso dos compósitos verificou-se por ser uma construção tombada pelo patrimônio histórico e ter por finalidade fins estéticos.

2.5.1- Matriz

A matriz polimérica no compósito reforçado com fibras tem a principal função de unir as fibras (Figura 2.6) que o constitui e atuar como transmissora das tensões externas para as fibras. A matriz absorve apenas uma parcela pequena das solicitações (BEBER, 2003). A estabilização mecânica de matrizes pela adição de cargas (neste caso, fibras) é uma ação comum na indústria química (SILVA, 2000). As matrizes envolvem as fibras, fornecem proteção mecânica contra agentes agressivos (ARAÚJO, 2002) e são relativamente dúcteis (JUVANDES *et al.*, 1996).

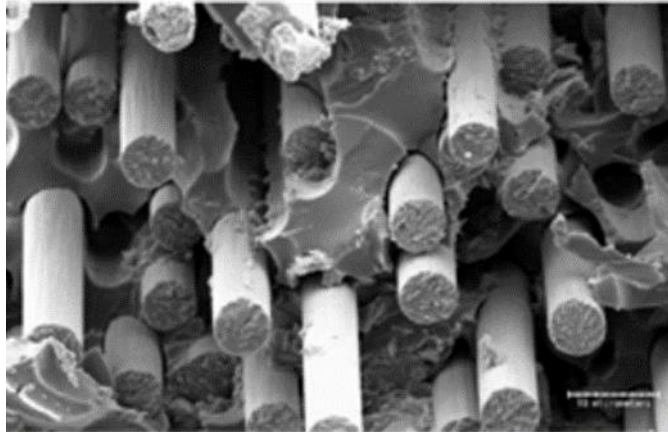


Figura 2.6- Ampliação em microscópio eletrônico de varredura de um sistema compósito estruturado com fibra de carbono e resina (MACHADO, 2011).

A seleção da matriz influencia a fabricação e o custo final do compósito reforçado com fibras. Geralmente, apresentam-se na forma de resinas, na qual existe uma grande variedade quanto à sua origem. As mais comuns são epóxi, fenol, poliéster, vinil éster, poliuretano e silicone, conhecidas como termorrígidas; e as constituídas à base de polietileno, poliestireno ou metacrilato de polimetila, designadas como termoplásticas (CARNEIRO, 2004).

As resinas termorrígidas desenvolvem uma estrutura de ligações fortes após a cura, que não se fundem a elevadas temperaturas, ou seja, após o seu processo de cura, já endurecidas, não voltam ao seu estado normal. Diferentemente, as termoplásticas amolecem e se fundem a altas temperaturas. Por essas características, as mais usadas no reforço estrutural são as termorrígidas, em especial, a resina epóxi.

CARNEIRO (2004) aponta como principal vantagem da resina epóxi sua relativa resistência e baixa viscosidade, permitindo que as fibras não apresentem desalinhamento em seus fios. Também é usada como um ligante para unir as fibras (SILVA, 2000). Por outro lado, o preço, o longo período de cura e a incompatibilidade a elevadas temperaturas são inconvenientes que levam estudiosos da área a estar sempre em busca de materiais alternativos.

O volume de resina usado para impregnação e colagem das fibras deve ser considerado, sendo importante para preservar as características do compósito, pois quanto mais resina, maior o peso das estruturas e menor a resistência mecânica (SALABERRY, 2005).

A matriz tem como principal finalidade atuar como ponte de aderência entre dois elementos, no caso do reforço com CRF, entre a superfície de concreto e o compósito (ARQUEZ, 2010). Logo, devem ser compatíveis tanto com o concreto quanto com a fibra utilizada (BARBOSA, 2007), garantindo a aderência entre eles.

ARAÚJO (2002) fez observações importantes ao período de utilização e de endurecimento das resinas, explicando que o período em que a resina mantém seu caráter adesivo e pode ser trabalhada sem esforço é denominado de tempo de utilização (*pot time*). Elevadas temperaturas e grande quantidade de material a ser preparado diminuem o tempo de utilização devido à aceleração das reações. Já o tempo em que a resina demora a endurecer é chamado como tempo de endurecimento (*open time*) e se refere ao intervalo em que o compósito deve ser colado no substrato, preservando suas características. Pode ser influenciado pela temperatura do ambiente, do compósito e do concreto.

É relevante destacar também a temperatura na qual a resina leva para passar de um estado vítreo para um elástico e dúctil, conhecido como temperatura vítrea, pois ao se aproximar desta, a resistência e a rigidez da resina podem diminuir significativamente.

Abaixo são apresentadas algumas das propriedades físicas e químicas de uma resina epóxi (MACHADO, 2004):

- resistência à tração: 55 MPa a 130 MPa;
- resistência à compressão: 120 MPa a 210 MPa;
- módulo de elasticidade: 2,5 GPa a 4,1 GPa;
- deformação específica na ruptura: 1 % a 9%;
- peso específico: 10,8 kN/m³ a 12,7 kN/m³;
- resistência à flexão: 131 MPa;
- intervalo de tempo para adquirir resistência: 30 minutos a 10 horas (atingindo resistência máxima apenas aos 7 dias);
- retração inferior à do concreto.

2.5.2- Fibra

As fibras são definidas como o 'reforço' do compósito, e as tradicionalmente usadas na Engenharia Civil são as de vidro, carbono e aramida. Conforme

CAZARREDO (2002), os materiais na forma de fibra apresentam elevada resistência, porém sua aplicação direta na estrutura é impraticável por não resistirem isoladamente à compressão longitudinal e aos esforços transversais. Cada fibra possui peculiaridades e processo de fabricação distinto, sendo as fibras de carbono as mais indicadas em técnicas de reforço estrutural.

As fibras se constituem no alinhamento das moléculas do material (BEBER, 2003) e devem ser escolhidas em função da resistência, rigidez e durabilidade requeridas no projeto de reforço (CARNEIRO, 2004).

Como dito, as fibras possuem relação direta com a eficiência dos compósitos e deve-se atentar para sua orientação, comprimento, forma e material utilizado. As fibras que apresentam maior módulo de elasticidade atribuem maior resistência para o reforço. O peso específico das fibras também é observado, sendo em média de três a seis vezes menor do que o do aço. As fibras com pequeno diâmetro e longas são apontadas como as mais apropriadas para o reforço, por possuírem ótima capacidade de transferência de carga (ARAÚJO, 2002). A Tabela 2.1 mostra as propriedades típicas de algumas fibras e a Figura 2.7 mostra o diagrama tensão *versus* deformação de algumas dessas fibras.

Tabela 2.1- Propriedades típicas de algumas fibras (BEBER, 2003).

Propriedade	Vidro - E	Aramida (A) Kevlar 49™	Carbono de elevada resistência (HS)	Carbono de elevado módulo (HM)	Aço CA-50
Resistência à tração (MPa)	2400	3600	3300 - 5000	1500 - 4700	500(escoamento) 550 (ruptura)
Módulo de elasticidade (GPa)	70	130	230 - 300	345 - 590	210
Deformação na ruptura (%)	3,5	2,5	1,5 - 2,2	0,6 - 1,4	0,2 (escoamento) 6,0 (ruptura)
Peso específico (kN/m³)	25,6	14,4	18	19	78,5
Coefficiente de dilatação térmica (10⁻⁶/°C)	5,0	-2 (longitudinal) +59 (transversal)	-1 (longitudinal) +17 (transversal)	-1 (longitudinal)	12,0 (longitudinal)
Custo da fibra (US\$/kg)	2,0	22,0	-	-	-

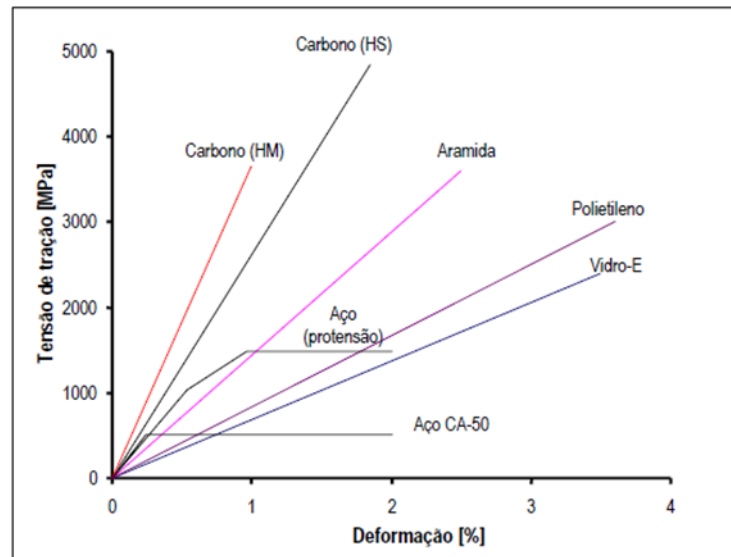


Figura 2.7- Diagrama tensão versus deformação de fibras e metais (BEBER, 2003).

2.5.2.1- Fibra de carbono

As fibras de carbono desempenham papel de destaque na área estrutural, possuindo elevado módulo de elasticidade, em que, para qualquer variação de deformação, suporta tensões maiores do que as demais fibras comercializadas (BARBOSA, 2007). Em contrapartida, quanto maior o módulo de elasticidade, maior o custo do material (MACHADO, 2011).

Tais fibras apresentam elevada rigidez e resistência aos ataques químicos, à variação térmica, entre outras propriedades que a fazem ter destaque entre as demais (CARNEIRO, 2004). Para que se elimine a hipótese do sistema compósito entrar em colapso pela ruptura frágil da matriz, os compósitos reforçados com fibra de carbono (CRFC) devem atuar de acordo com o critério fibra com ruptura frágil e matriz com ruptura dúctil (MACHADO, 2011), como mostra na Figura 2.8.

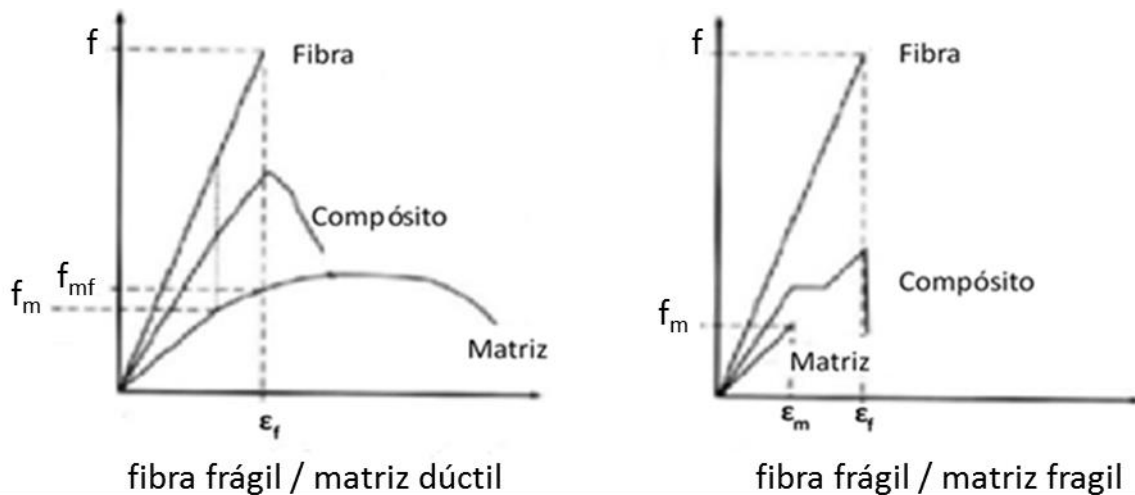


Figura 2.8- Diagrama tensão-deformação para materiais compósitos (MACHADO, 2011, modificado).

Onde, na figura:

f é a resistência máxima da fibra;

f_m é a resistência máxima da matriz;

f_{mf} é a resistência máxima do compósito;

ϵ_f é a deformação da fibra;

ϵ_m é a deformação da matriz.

Os CRFC garantem a integridade do concreto e ausência de corrosão nas armaduras, limitam a abertura de fissuras, reduzem as flechas e aumentam a resistência à flexão do elemento estrutural (MACHADO, 2004), dependendo de sua taxa e detalhamento.

2.5.3- Compósitos

Os materiais estruturais podem ser abrangidos em quatro grupos distintos: os metais, os polímeros, as cerâmicas e os compósitos (GIBSON, 1994 *apud* CAZARREDO, 2002). Segundo CAZARREDO (2002), os materiais compósitos são a junção dos anteriores, em duas ou mais fases, em um arranjo estrutural macroscópico.

Para BEBER (2003), um compósito é considerado como um material multifásico que exhibe propriedades de ambas as fases que o constituem, havendo um melhoramento na combinação das propriedades.

CARNEIRO (2004) define compósito como materiais cuja estrutura é constituída por meio da combinação de dois ou mais produtos não solúveis entre si, sendo uma fase o reforço e outra a matriz. São materiais não homogêneos, anisotrópicos e de comportamento elástico até a ruína (CARNEIRO, 2004; JUVANDES *et al.*, 1996).

Os compósitos reforçados com fibras apresentam-se como os mais eficientes (CALLISTER JR., 1997). A madeira é um exemplo de material compósito, formado pela matriz de lignina com reforço de fibras de celulose. Observa-se que, conforme as propriedades dos materiais utilizados no compósito, o seu comportamento é influenciado (BEBER, 2003; JUVANDES, 1999; SARAIVA, 2011; MELO, 2015).

Atualmente, no Brasil, já se observam inúmeras aplicações de materiais compósitos na Construção Civil, como em reforço de lajes, vigas, pilares, paredes de concreto, silos, túneis (MACHADO, 2004), muros de arrimo, tanques e torres de transmissão de sinais (CARNEIRO, 2004; MACHADO, 2011). MACHADO (2004) ressalta que o sistema de reforço serve para todos os elementos estruturais submetidos à deterioração e/ou também para o aumento de sua capacidade resistente ou para amenizar flechas.

As condições nas quais tais materiais estão submetidos também podem afetar a eficiência, tais como: umidade e temperatura, compressão de fluência e relaxação, comportamento ao fogo e resistência aos raios ultravioletas (ARQUEZ, 2010; BALAGURU *et al.*, 1999a; BEBER, 2003; HOLLAWAY, 2010).

Juntamente com tais condições, existem parâmetros que influenciam o comportamento do concreto confinado, que são (MELO, 2015):

- tipo de resina - estudos mostram que uma boa aderência entre o substrato de concreto e o compósito, conferida pela resina, não aumenta substancialmente a resistência à compressão da estrutura, mas tem ampla influência na rigidez do elemento reforçado, assim como o tipo de fibra utilizado no compósito, sendo quanto maior seu módulo de elasticidade, maior a sua resistência mecânica;
- taxa e orientação das fibras – o aumento da taxa de reforço leva a maiores ganhos médios de resistência e ductilidade para os pilares reforçados. A

orientação das fibras depende do tipo de reforço requerido e qualquer desalinhamento no mesmo afeta a resistência do sistema;

- forma dos pilares – as seções mais eficientes, que possibilitam maiores ganhos de resistência, são os pilares de seção circular;
- raio das arestas arredondadas dos pilares – quanto maior o raio das arestas de arredondamento das seções transversais quadradas ou retangulares, maior a eficiência do reforço;
- resistência do concreto à compressão – para uma mesma taxa de reforço, é observado uma resistência à compressão relativa do concreto (relação entre as resistências do concreto confinado e não confinado) menor para concretos com maior resistência do que para concretos com menor resistência;
- taxa de armadura interna – o aumento da armadura transversal não exerce uma influência significativa na resistência à compressão do concreto, aumentando apenas a ductilidade no comportamento dos pilares;
- carregamento antes do reforço – o confinamento externo efetuado após o carregamento da estrutura é capaz de restaurar a resistência do concreto;
- curvas tensão-deformação – pilares de concreto de seção transversal circular encamisados com compósitos com resina e fibra de carbono, na maioria dos casos, não possuem o ramo descendente da curva tensão-deformação como os pilares de concreto não confinado.

A prática crescente do uso dos materiais compósitos com fibra de carbono adquiriu interesse dos projetistas e pesquisadores em consequência de suas consideráveis vantagens, e vêm aumentando do ano de 1990 para cá. Em relação aos materiais tradicionalmente usados na Construção Civil para o reforço de estruturas, a principal característica dos materiais compósitos que chama a atenção é a sua resistência (BALAGURU *et al.*, 1999a). JUVANDES (1999) salienta que a resistência à tração e o módulo de elasticidade atingem valores máximos na direção principal das fibras e reduzem de maneira significativa quando o ângulo da fibra se afasta daquela orientação.

Estudos consagrados (CAZARREDO, 2002; ARAÚJO, 2002; BEBER, 2003; MACHADO, 2004; CARNEIRO, 2004) destacam as seguintes vantagens dos compósitos:

- elevada resistência à tração;

- elevada resistência à corrosão;
- baixo peso próprio (proporcionando estruturas mais leves e cerca de quatro vezes menor que o do aço);
- resistência a ataques químicos;
- adaptabilidade à geometria dos elementos;
- facilidade e agilidade em sua execução;
- boa capacidade de deformação.

Todavia, esse sistema não apresenta apenas vantagens e não está totalmente isento de problemas. Suas desvantagens devem ser levadas em consideração na escolha da resina a ser utilizada nos CRF. Entre os inconvenientes que chamam mais atenção é o comportamento ineficiente a temperaturas acima da temperatura de transição vítrea, custo inicial elevado, perigo no manuseio da resina (devido a produtos tóxicos) e incompatibilidade da resina com o material do substrato (MACHADO, 2004; CARNEIRO, 2004; SUDANO, 2010).

MACHADO (2004) observa que esses inconvenientes também são pertinentes nos sistemas de reforços pela colagem de chapa de aço com epóxi. É sugerida a substituição das resinas, comumente usadas, por argamassa à base de cimento; porém, existe menor aderência e dificuldade de penetração e impregnação das fibras (SUDANO, 2010).

Logo, ao se ajustar as propriedades dos compósitos às estruturas de concreto, por meio da relação apropriada entre o substrato e o sistema de reforço, é possível obter estruturas mais resistentes e leves (JUVANDES *et al.*, 1996). Existem dois principais sistemas de reforço estrutural com CRF comercializados, que são os sistemas pré-fabricados (laminados) e os sistemas curados *in situ* (tecidos).

Nos sistemas pré-fabricados as fibras são unidirecionais que passam por um processo automatizado de pultrusão, sendo combinado com uma resina termofixa para formar o sistema. De forma geral, possuem espessura de uma folha, variando de 1,0 mm a 1,5 mm, com 40 a 70% de teor de fibras em volume. Possuem forma, tamanho e rigidez definidos e são prontas para ser coladas no elemento a ser reforçado.

Já os sistemas curados *in situ* podem ser formados por mantas (fibras contínuas), sendo unidirecionais (folhas) ou bidirecionais (tecidos), em estado seco ou pré-impregnado, coladas no substrato a ser reforçado com auxílio de uma resina epóxi, geralmente. A resina serve tanto para colar quanto para impregnar o compósito.

Esses sistemas possuem a vantagem de serem mais resistentes em relação aos outros; porém, possuem menor controle de qualidade (JUVANDES, 1999; ARAÚJO, 2002), resultando em menor espessura final, entre 0,1 mm a 0,5 mm, com 25 a 40% de teor de fibras em volume. Ao utilizar esse sistema de reforço, o projetista ainda tem a possibilidade de variar o número de camadas e a orientação das fibras, com o intuito de se obter um produto final que atenda as suas necessidades (BEBER, 2003). As principais características atribuídas aos dois tipos de sistema são mostradas na Tabela 2.2 (BEBER, 2003).

Tabela 2.2- Características dos sistemas pré-fabricados e in situ (BEBER, 2003).

Características	Sistemas pré-fabricados	Sistemas curados <i>in situ</i>
Forma	Tiras ou laminados	Mantas ou tecidos
Espessura	1,0 a 1,5 mm	0,1 a 0,5 mm
Utilização	Colagem dos elementos pré-fabricados com adesivo	Colagem e impregnação das mantas e tecidos com resina (moldado e curado no local)
Aspectos típicos de instalação	Salvo condições especiais, aplicável somente em superfícies planas	Independentemente da forma da superfície, necessita de arredondamento dos cantos
	Adesivo tixotrópico para colagem	Resina de baixa viscosidade para colagem e impregnação
	Geralmente uma única camada	Frequentemente várias camadas
	Rigidez do compósito e tixotropia do adesivo permitem a tolerância de algumas imperfeições na superfície reforçada	Aplicação do regulador de superfície é necessária para prevenir o deslocamento por imperfeição da superfície
	Aplicação simplificada, mais garantia de qualidade	Versatilidade de aplicação, necessita de rigoroso controle de qualidade
	Controle de qualidade (má aplicação e mão-de-obra de baixa qualidade = perda da ação compósita entre o reforço e a estrutura e/ou problemas na integridade do reforço a longo prazo)	

2.5.4- Aderência

Nos sistemas compósitos reforçados com fibras, os adesivos apresentam o papel de impregná-las, proporcionando a polimerização do conjunto e desenvolvendo

propriedades de aderência entre o compósito e o substrato a ser aplicado (JUVANDES *et al.*, 1996). Nos sistemas curados *in situ* a resina é o próprio agente adesivo.

Atualmente, apesar do desenvolvimento e inúmeras pesquisas sobre o uso de CRFC, alguns aspectos ainda são relevantes. A resistência da combinação entre concreto-adesivo-compósito é fundamental para definir o comportamento estrutural do elemento a ser reforçado, devendo este ser o alvo de maior atenção entre os pesquisadores. A compatibilidade de deformações entre os materiais também deve ser levada em consideração.

Segundo JUVANDES *et al.* (1996), embora não disponham de propriedades adesivas, os *primers* e reguladores de superfície usados na aplicação do sistema se destacam por possuírem a capacidade de completar e melhorar o desempenho das resinas, em que a garantia de uma boa ligação de aderência entre concreto e compósito é possível pela compatibilidade de deformações e pela perfeita conjugação química entre os dois materiais.

Outro aspecto importante que deve ser enfatizado é o reforço com CRF com mais de uma camada de fibra, onde a aderência proporcionada pela resina epóxi entre as camadas é um parâmetro relevante para a resistência final, levando-se em consideração o tempo de colagem entre uma camada de fibra e outra.

PACHECO (2006) estudou a aderência entre o CFC – concreto por meio de ensaios de tração - compressão de corpos de prova compostos por dois cubos de concreto (sendo um móvel e outro fixo), ligados por tiras de CFC coladas nas laterais opostas (Figura 2.9). Seu estudo variou a resistência à compressão do concreto, o tipo de carregamento e a superfície do substrato de concreto. Foi verificado que o tipo de carregamento (monôtonico ou ciclos de carga e descarga) e a superfície do substrato (lisa ou rugosa) não têm grande influência na resistência última de aderência.

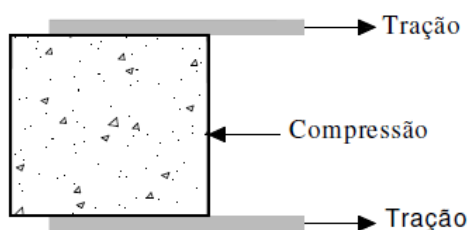


Figura 2.9- Esquema do ensaio tração - compressão (PACHECO, 2006).

Genericamente é possível afirmar que o modo de ruptura está vinculado às condições de colagem dos compósitos. Portanto, o estudo de materiais que apresentem propriedades adesivas como substituição às onerosas resinas epóxis e que apresentem vantagens sobre as mesmas já está sendo alvo de muitas pesquisas. São exemplos os trabalhos de MAZZA (2010) e FRANÇA (2015), este último ainda em andamento no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.

Conforme MAZZA (2010), a utilização de concretos com alto desempenho (por exemplo, o concreto geopolimérico) vem se tornando uma boa técnica de recuperação e reforço em relação aos materiais à base de resina, pois sobre uma superfície do elemento a ser reforçado, rugosa e úmida, consegue-se uma aderência até 100% superior ao sistema convencional. O autor analisou o comportamento mecânico e de aderência das argamassas geopoliméricas no reparo/reforço, em entalhe (Figura 2.10) executado no banzo tracionado de vigas de concreto, e buscou um melhor conhecimento entre o geopolímero e da aderência entre ele e o substrato de concreto.



Figura 2.10- (a) Detalhe do entalhe da viga; (b) Reparo/Reforço da viga com geopolímero (MAZZA, 2010).

Além da caracterização da matéria-prima para a confecção do geopolímero, MAZZA (2010) produziu argamassas de reparo e verificou o comportamento da aderência do reparo ao substrato de concreto por meio dos ensaios de resistência à tração na flexão a quatro pontos (ABNT NBR 12.142:1994) e de aderência ao cisalhamento na flexão (AFNOR NF P 18-851:1992).

Concluiu-se que o reforço de entalhe do banzo tracionado das vigas reparadas com argamassas geopoliméricas são eficazes em termos de capacidade de carga,

pelo aumento de resistência ao sistema, como também em termos de rigidez e de aderência. A argamassa geopolimérica melhorou o desempenho da peça reparada/reforçada nos entalhes e proporcionou o aumento da carga de ruptura das vigas em relação à de referência, podendo ser indicada como um material para a técnica de reforço das estruturas de concreto.

Pelo modo de ruptura, verificou-se que o graute de referência foi o único que rompeu diferentemente dos demais, pois o material de reparo desprende-se do substrato na parte inclinada. A viga monolítica e as reparadas com argamassas geopoliméricas A100 e A150 (os números 100 e 150 correspondem, respectivamente, às relações 1,75 e 1,50 entre a quantidade de areia e a quantidade de sólidos da mistura geopolimérica) se romperam no terço médio, e a fissura se propagou da base para o topo, classificada, segundo a AFNOR NF P 18-851 (1992), como do Tipo M – Monolítica (Figura 2.11). Assim, foi comprovado o desempenho das argamassas geopoliméricas foi satisfatório em relação à aderência.

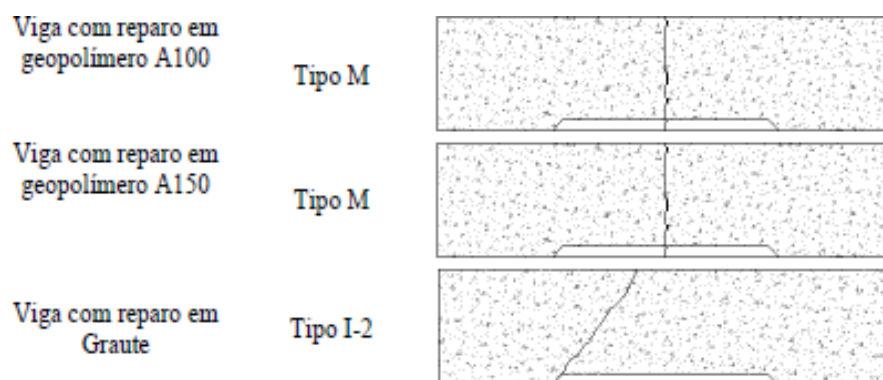


Figura 2.11- Tipos de ruptura que ocorreram no ensaio da AFNOR NF P-18-851:1992 (MAZZA, 2010).

O estudo é importante para o presente trabalho para a compreensão do comportamento de novos materiais para reparo/reforço e recuperação de estruturas em concreto, assim como o melhor entendimento do comportamento mecânico dos materiais geopolimérico.

2.5.5- Compósitos de matriz geopolimérica e fibra de carbono

HUNG *et al.* (2011) investigaram uma nova geração de compósitos geopolimérico com fibras resistentes ao fogo. No seu trabalho, foram estudadas duas matrizes geopoliméricas, M1 e M2, à base de finas partículas de sílica térmica, soluções de KOH e aditivos. A razão molar Si/Al era cerca de 10. A diferença entre as matrizes é a natureza dos aditivos, sendo M1 adição de borato alcalino, e, M2 adição de fosfato alcalino.

Os compósitos com fibra de carbono, basalto ou vidro e resina geopolimérica foram submetidos a elevadas temperaturas, até 1000°C por uma hora. Foram realizados ensaios de tração na flexão em três pontos e a microestrutura M1/Carbono e M2/Carbono, analisadas por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

As fibras foram impregnadas com a resina através de uma máquina e confeccionados moldes com dimensões de 3 mm x 9 mm x 15 mm. Os espécimes ensacados à vácuo tiveram três estágios de cura: primeiro, curados à temperatura ambiente, depois, durante uma hora sob ensacamento à vácuo e, por último, uma hora no forno à temperatura de 80°C para M1 e 85°C para M2.

Em geral, as propriedades mecânicas dos geocompósitos reforçados com fibras permaneceram aproximadamente em torno de 90% após exposição até 400°C por uma hora. Quase todos os compósitos permaneceram acima de 50% da resistência após calcinação a 600°C, sendo para os compósitos reforçados com fibra de carbono a temperatura pode ser superior à 1000°C. Afirmaram, ainda, que os geocompósitos reforçados com fibra de carbono tem uma grande expectativa para aplicação em altas tecnologias. É também ressaltado no estudo que os geocompósitos possuem propriedades cerâmicas e podem ser produzidos com procedimentos mais simples e a baixa temperatura.

BALAGURU *et al.* (1999c) relataram em seu estudo os resultados da investigação do uso de geopolímeros, como resina, em vigas de concreto armado. Quatro vigas de concreto armado foram reforçadas com tecidos de fibra de carbono e resinas orgânicos. As vigas possuíam reforço com 0, 2, 3 e 5 camadas de tecidos de fibra de carbono unidirecional e curadas por 28 dias. Após a cura, três delas foram reforçadas com o compósito. Todas as quatro vigas foram ensaiadas como vigas simplesmente apoiadas em quatro pontos, como mostrado na Figura 2.12.

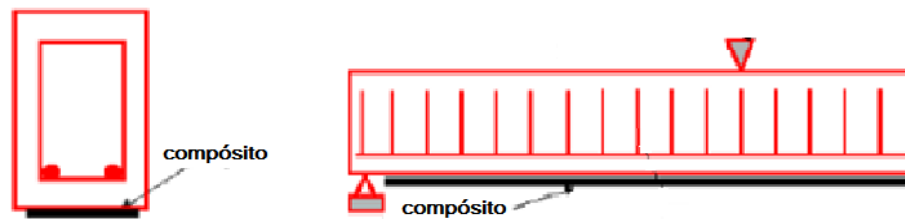


Figura 2.12- Sistema de reforço com compósitos de fibra de carbono e geopolímero (BALAGURU et al., 1999c, modificado).

A viga reforçada com duas camadas, após a impregnação da primeira, foi deixada curar durante 24 horas e aqueceu-se a 80 °C para cura do geopolímero. Para as vigas com 3 e 5 camadas, após a colocação dos tecidos, elas foram cobertas com pano e colocados no vácuo. Estas vigas também foram aquecidas a 80 °C para facilitar a cura.

Ficou evidenciado que o compósito com matriz geopolimérica possui ótima adesão à superfície do concreto e, além disso, é quimicamente compatível com o concreto de cimento Portland. Todas as vigas ensaiadas foram rompidas por arrancamento do tecido de fibra de carbono, sendo este modo de ruptura incomum entre os elementos reforçados com esse sistema, o que mostrou a boa aderência entre o substrato de concreto e o material geopolimérico. O compósito também se mostrou trabalhável durante cerca de quatro a cinco horas à temperatura ambiente após sua preparação. Por isso, pode-se afirmar que a resina geopolimérica pode ser tão boa ou um melhor material estrutural em comparação com polímeros orgânicos.

Além disso, o geopolímero mostrou ter resistência ao fogo e aos raios ultravioleta, permanecendo com a matriz intacta até 1000°C, enquanto o concreto começou a degradar-se em aproximadamente 300°C.

Com base nos resultados experimentais dos trabalhos apresentados, pode-se inferir que o geopolímero pode ser usado para colagem de tecidos de fibras de carbono em substratos de concreto. Porém, deve-se alertar para cuidados especiais do uso da resina geopolimérica pelos operários que irão manuseá-la, com riscos de queimadura devido à elevada alcalinidade da mistura.

BALAGURU *et al.* (1999a) avaliaram uma resina de matriz geopolimérica para cabines de aeronaves, materiais compósitos estruturais e aplicações de infra-

estrutura. Um poli (sialato-siloxo) de densidade real 2,14 e razão molar $\text{SiO}_2/\text{AlO}_2$ igual a 27. No estudo foram analisados:

- índice de propagação de chama (ASTM E-162-83);
- resistência residual à flexão (ASTM D-790);
- propriedades de cisalhamento no plano (ASTM D3518-76);
- propriedades de cisalhamento interlaminar (ASTM D3846);
- inflamabilidade, taxa de liberação de calor e fumaça (ASTM E-1354);
- propriedades de tração (ASTM D3039-76).

Outro parâmetro importante do compósito, a viscosidade do geopolímero, também foi relatado. A Figura 2.13 mostra um gráfico da viscosidade da resina *versus* tempo de cura a 80°C do estudo realizado por BALAGURU *et al.* (1999c). De acordo com o gráfico, 70% são reagidos em cerca de dez minutos, mostrando que o geopolímero possui uma grande reatividade nos primeiros minutos. O inverso ocorre com sua viscosidade, adquirindo maior viscosidade após os dez minutos de reação, onde maior parte do material já reagiu.

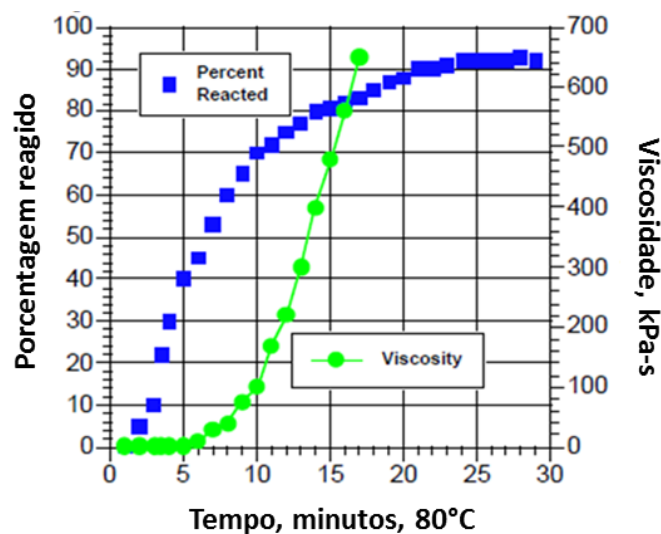


Figura 2.13- Extensão da cura e viscosidade da resina geopolimérica versus tempo de cura a 80°C (BALAGURU *et al.*, 1999c, modificado).

Capítulo 3 - Reforço estrutural em pilares de concreto

3.1- Introdução

Estruturas de concreto armado têm que, entre outros, ser duráveis, atender às necessidades de seus usuários e, acima de tudo, ser seguras. A capacidade de atender a um determinado propósito, ao longo de sua vida útil, sem comprometer a segurança, determina a durabilidade de uma estrutura. Segundo DIAS (2001), a durabilidade do concreto não significa vida indefinida e não suportar todo tipo de ação.

Além da concepção da estrutura, o próprio processo de fabricação do concreto permite variações em sua composição, que conduzem a concretos relativamente duráveis ou extremamente vulneráveis (BEBER, 2003), sendo um material excepcionalmente versátil e ao mesmo tempo sujeito à ocorrência de inúmeras falhas, como, por exemplo, a dificuldade de reajustes, especialmente de sua capacidade de carga, uma vez consolidada a estrutura (JUVANDES, 1999).

A contar da fase de projeto, concepção e mesmo durante a vida útil, as estruturas em concreto armado estão expostas a diversos agentes, que podem comprometer sua durabilidade e até mesmo a sua estabilidade. O conjunto de diversos agentes de deterioração pode gerar uma consequência maior do que a soma dos efeitos destes agentes operando individualmente, sendo indispensável e notável o conhecimento das origens de tais agentes e mecanismos de deterioração (BEBER, 2003).

A norma ABNT NBR 6118 (2014) salienta a exigência de durabilidade, em que as estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de maneira que, sob as condições ambientais previstas e quando colocadas em serviço, preservem sua segurança e estabilidade ao longo da vida útil idealizada para a mesmas.

Segundo SOUZA e RIPPER (1998), o campo da engenharia que se preocupa com o estado das origens, formas de manifestações, consequências e mecanismos das falhas e dos sistemas de degradação das estruturas denomina-se Patologia. BEBER (2003) enfatiza que patologia é o estudo das causas responsáveis pelo surgimento do processo de deterioração em uma estrutura e ainda ressalta a diversidade de deteriorações que a estrutura pode sofrer, existindo uma solução para

a maioria de tais quadros patológicos. A Tabela 3.1 expõe as possíveis causas do surgimento das manifestações patológicas (BEBER, 2003).

Tabela 3.1 - Possíveis causas do surgimento das manifestações patológicas (BEBER, 2003).

Etapa	Possíveis causas
Concepção da estrutura (projeto)	<ul style="list-style-type: none"> • Elementos de projeto inadequados, má definição das ações atuantes, modelo analítico não apropriado, deficiência no cálculo, etc;
	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de compatibilidade entre a estrutura e a arquitetura, assim como com os demais projetos;
	<ul style="list-style-type: none"> • Especificação inadequada dos materiais;
	<ul style="list-style-type: none"> • Detalhamento insuficiente ou errado;
	<ul style="list-style-type: none"> • Detalhes construtivos inexistentes;
	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de padronização das representações (convenções);
	<ul style="list-style-type: none"> • Erros de dimensionamento.
Execução da estrutura (construção)	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa capacitação e falta de experiência dos profissionais;
	<ul style="list-style-type: none"> • Instalação inadequada do canteiro de obra;
	<ul style="list-style-type: none"> • Deficiências na confecção de fôrmas, escoramentos;
	<ul style="list-style-type: none"> • Deficiências no posicionamento e quantidade de armadura;
	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa qualidade dos materiais e componentes;
Utilização da estrutura (manutenção)	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa qualidade do concreto, desde sua fabricação até a cura.
	<ul style="list-style-type: none"> • Utilização inadequada;
	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de um programa de manutenção.

A degradação da estrutura, seja por meio de deficiências ocorridas no processo construtivo, seja pelo envelhecimento das estruturas, algo natural e inevitável, ou ainda pela a ação conjunta de tais ações, mostra a necessidade de técnicas de intervenção. A capacidade de satisfazer a uma determinada finalidade é que define a natureza de intervenção a ser adotada. Existem inúmeras formas de se intervir em elementos estruturais de concreto armado. O presente trabalho tem como foco a técnica de reforço por encamisamento de pilares com o uso de CRFC.

3.2- Reforço estrutural

O reforço de estruturas se caracteriza por proporcionar o aumento de seu desempenho. Segundo BEBER (2003), inicialmente as técnicas de reforço limitavam-se à adição de novos elementos, apoios ou no aumento das seções resistentes. Para JUVANDES *et al.* (1996), o reforço é o melhoramento da estrutura já existente ou de projeto. A necessidade do uso desta técnica se deve por alterações na função principal

de utilização, a erros ou acidentes na concepção da obra, ao aumento da capacidade portante (JUVANDES, 1999) ou para resgatar tal capacidade.

Um projeto de reforço estrutural irá identificar-se pela especificidade que cada situação pode apresentar. Para a escolha do projeto, alguns aspectos devem ser levados em consideração (SOUZA e RIPPER, 1998; GRACIANO, 2005), como custo, desempenho, facilidade de execução e durabilidade do reforço.

Os métodos mais convencionais para um projeto de reforço estrutural envolvem: aumento da seção transversal do elemento estrutural, protensão externa e colagem de chapas de aço (BEBER, 2003; SILVA, 2006; PEREIRA 2012).

Não menos importante, ressaltam-se o conhecimento e a seleção dos materiais a serem utilizados na técnica do reforço, que devem possuir propriedades adequadas, relativas a aspectos mecânicos, aplicabilidade e durabilidade (CARNEIRO, 2004). A eficácia do processo é dependente das propriedades dos materiais utilizados. TAKEUTI (2003) observa que a combinação de concreto de alta resistência (CAR) e CRFC é a forma mais eficiente de aproveitar o que cada tipo de material pode oferecer de melhor. A Figura 3.1 apresenta um gráfico hipotético de um reforço com a junção desses dois materiais.

De acordo com VALLE (1983) *apud* TAKEUTI (1999), também deve ser realizada uma análise preliminar das variáveis que condicionam a mobilização de esforços resistentes no reforço, como, por exemplo: deformabilidade da estrutura; características mecânicas dos materiais do elemento a ser reforçado e aderência entre os materiais originais e de reforço. Contudo, é ressaltada a importância de se aliar, antes da intervenção, conhecimento e metodologia para a obtenção da prática correta de intervenção e reforço.

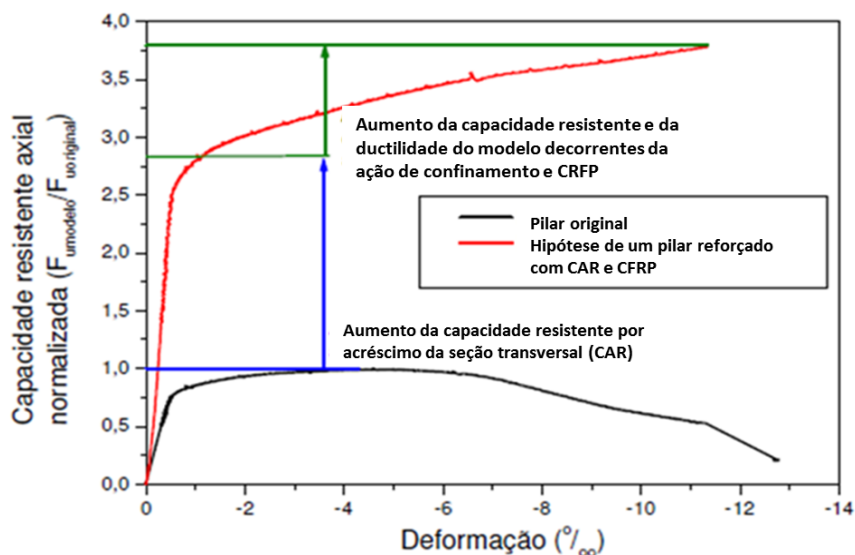


Figura 3.1 - Gráfico hipotético de um pilar reforçado com CAR e CRFC (TAKEUTI, 2003).

3.3- Reforço de pilares de concreto armado

Os pilares são conhecidos por transferirem as ações da estrutura para as fundações. De um modo geral, tal elemento estrutural é o responsável por suportar a estrutura, podendo levá-la ao colapso com o surgimento de algum problema patológico. Falhas no seu funcionamento afetam substancialmente o desempenho da estrutura como um todo (PÁDUA *et al.*, 2002). Mediante o exposto, observa-se a importância de técnicas de recuperação e/ou reforço de pilares de concreto armado.

Existem no mercado técnicas consolidadas para o reforço de pilares de concreto armado. RIGAZZO (2010) apontou as técnicas mais utilizadas no Brasil por meio da utilização de armaduras de reposição ou aumento da seção transversal dos pilares pela adição de um novo concreto e pelo confinamento do elemento utilizando-se chapas e/ou perfis metálicos.

SUDANO (2010) afirma que a forma mais habitual de se reforçar pilares é por meio do confinamento do pilar preexistente, que relaciona o confinamento à restrição da expansão lateral do pilar original e explica que esse efeito é que proporciona o aumento da capacidade resistente do pilar.

De acordo com TAKEUTI (1999), ORTIZ e DIAS (1975) elaboraram um dos mais antigos estudos sobre a técnica de reforço de pilares, em que compararam o desempenho dos reforços por encamisamento com concreto armado e por perfis e chapas metálicas. Porém, SUDANO (2010) alega que o estudo de KING (1946) foi um

dos primeiros pesquisadores a demonstrar a ocorrência de um aumento na capacidade resistente axial de peças comprimidas ao confiná-las com estribos e armadura longitudinal. A Figura 3.2 mostra como se comporta um concreto confinado (TAKEUTI, 2003).

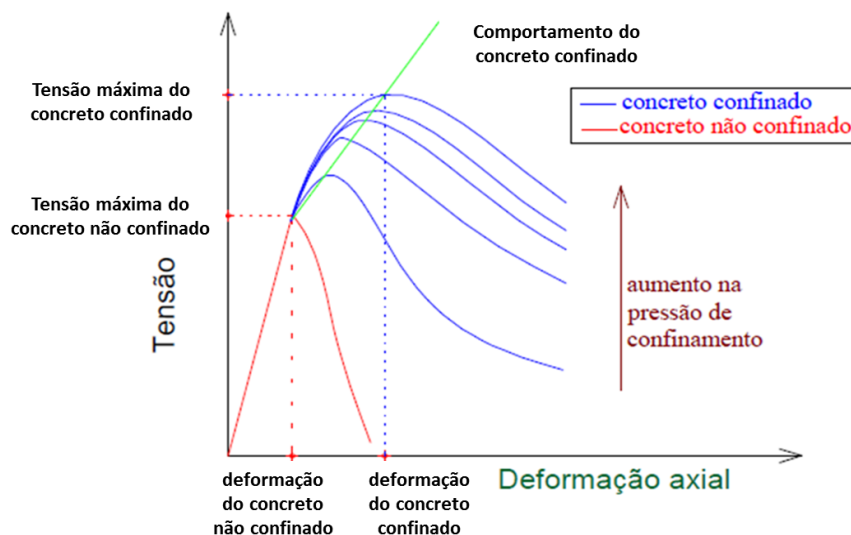


Figura 3.2 - Comportamento do concreto confinado (TAKEUTI, 2003).

CARNEIRO (2004) afirma que o confinamento é dado por meio de uma armadura interna ou externa, só sendo evidenciado quando há dilatação transversal do concreto comprimido.

Segundo RIBEIRO (2010), desde a revisão de 1978, a norma NBR 6118 abordava a modalidade de cintamento de pilares, sendo esta cessada na revisão de 2003.

Dentre as técnicas para o confinamento externo de pilares, a aplicação de materiais compósitos, em especial os poliméricos reforçados com fibras, como alternativa às chapas e perfis metálicos, vêm apresentando notável notoriedade nos últimos anos (BEBER, 1999; WANG *et al.*, 2007; MACHADO, 2011; MELO, 2015).

O próximo item aborda as características e as principais vantagens do reforço do confinamento externo em pilares de concreto com compósitos de resina e fibra de carbono, assim como a execução de tal técnica.

3.4- Pilares reforçados com compósitos de fibra de carbono

O reforço de pilares com compósitos reforçados com fibras (CRF) surgiu como uma alternativa para situações em que o uso de materiais tradicionais, como aço e concreto, não são satisfatórios (SALABERRY, 2005). Além disso, os materiais CRF apresentam diversas características fundamentais para serem utilizados em reforços estruturais, principalmente no encamisamento de pilares (Figura 3.3). Também é ressaltado que o método de execução apresenta rapidez e facilidade, além de ser um método limpo.

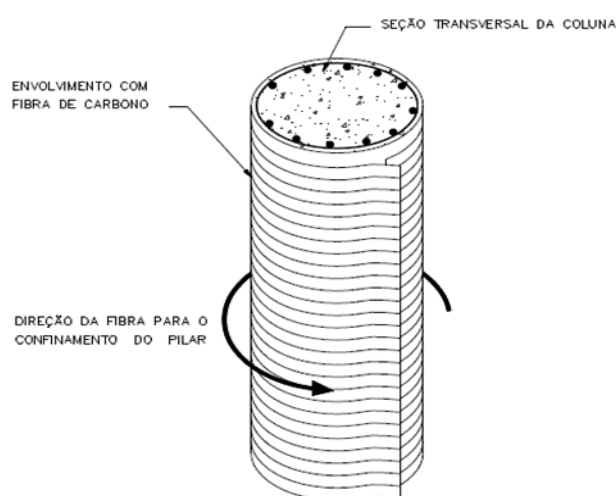


Figura 3.3 - Representação esquemática de coluna confinada por CRFC (MACHADO, 2011).

Diversos pesquisadores (TAKEUTI, 1999; MATTHYS, 2000; CARRAZEDO, 2002; CARNEIRO, 2004; RIGAZZO, 2010; PEREIRA, 2012) investigaram modelos analíticos para previsão da capacidade de carga de pilares de concreto armado confinados com CRFC.

Logo, é possível destacar alguns dos aspectos relevantes do uso dos compósitos para reforço de pilares encamisados:

- elevada resistência mecânica;
- resistência a ataques químicos;
- resistência à corrosão;
- elevada rigidez;
- estabilidade térmica e reológica;
- bom comportamento à fadiga e à atuação de cargas cíclicas;
- peso específico baixo, cerca de quatro vezes menor do que o do aço.

Ressalta-se também a versatilidade de projetos com uso de compósitos reforçados com fibras, como o menor tempo de interdição da obra, a facilidade de transporte do material e facilidade de aplicação e resistência à ação do fogo (BEBER, 2003).

Salienta-se que o estabelecimento da pressão de confinamento lateral possui duas contribuições para o reforço com sistemas de CRF: a componente da pressão de confinamento devido aos estribos na seção, normalmente existente em pilares de concreto armado e, a componente da pressão de confinamento devido ao sistema CRF, como observado na Figura 3.4 (MACHADO, 2011).

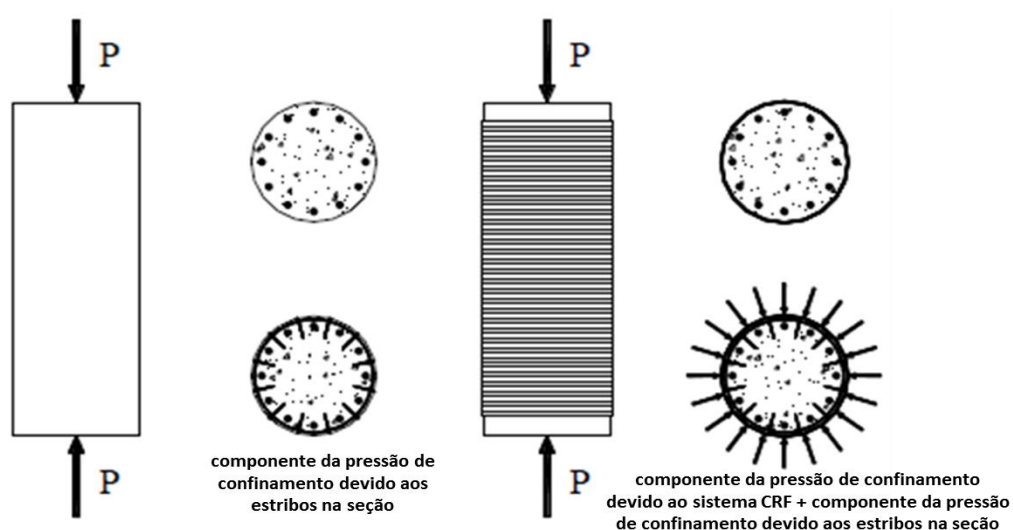


Figura 3.4 - Tensões e deformações de sistemas não confinados e confinados (MACHADO, 2011, modificado).

A deficiência de normas e ausência de regulamentos para o uso de novos materiais em técnicas de reforço é uma enorme dificuldade para os profissionais que utilizam tal técnica. Segundo JUVANDES *et al.* (1996), as técnicas devem ser interpretadas conforme filosofia geral de dimensionamento e, genericamente, os projetistas podem basear o dimensionamento destes sistemas por meio de:

1. métodos analíticos (procedimento iterativo);
2. métodos numéricos (tendo como principal exemplo a formulação por elementos finitos);
3. análise experimental (obtendo-se os resultados mais precisos).

Sobretudo, outro aspecto que deve ser considerado durante o dimensionamento é o modo de ruptura. De acordo com NOGUEIRA (2001), o

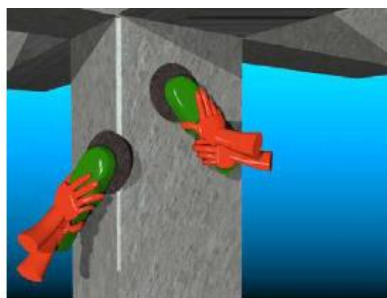
dimensionamento de elementos com CRF tem como base os estados limites, nos quais os níveis de segurança são aceitáveis tanto em relação ao estado limite de utilização (deformação e fissuração) quanto ao estado limite último (ruptura e fadiga). O projetista deve se atentar para níveis de utilização próximos do limite último e aos danos que podem ocorrer no concreto devido à fissuração excessivo que ocorre na direção radial (MACHADO, 2011).

3.4.1- Execução do reforço de pilares com compósitos de fibra

Para que se garanta a eficiência do reforço com CRF, alguns procedimentos devem ser seguidos. A implantação desta técnica no elemento de concreto armado será descrita e ilustrada conforme dados apresentados na literatura (SOUZA e RIPPER, 1998; MACHADO, 2011; PEREIRA, 2012), a saber:

- recuperação do substrato de concreto (caso este esteja com algum problema patológico);
- preparação da superfície para a colagem do compósito:
 - ✓ arredondamento das arestas do elemento a reforçar, caso não seja de seção transversal circular;
 - ✓ limpeza do substrato, retirando-se as impurezas eventualmente existentes;
- aplicação do *primer*, com o objetivo de penetrar nos poros de concreto e promover uma ponte de aderência eficiente;
- aplicação do regularizador de superfície, quando houver a necessidade de se obter uma superfície mais uniforme, tornando mais eficiente a transferência de tensões entre o reforço e o concreto;
- espalhamento da resina no substrato após a secagem do *primer*;
- corte e imprimação das fibras de carbono;
- impregnação da superfície da manta com uma nova camada de resina epóxi para garantir total impregnação da manta.
- aplicação sobre a camada final do reforço de uma resina protetora para proteger o sistema (contra fogo e raios UV, por exemplo) e ocasionar melhor acabamento estético no elemento.

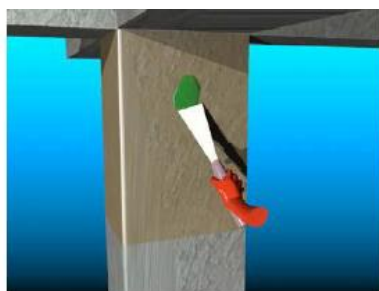
A Figura 3.5 (PEREIRA, 2012) ilustra as etapas de execução do sistema.



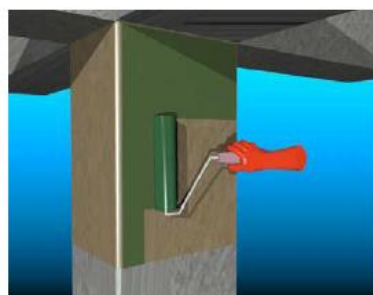
1ª fase – Esmerilamento das superfícies e arredondamento das arestas



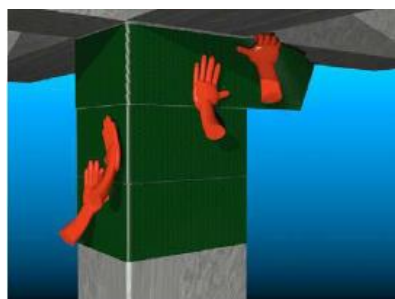
2ª fase- Aplicação do primário



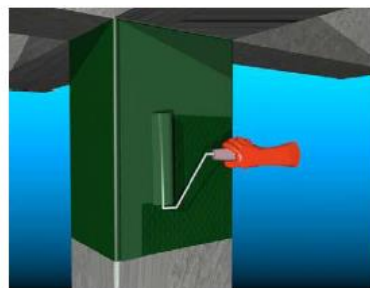
3ª fase - Reparação do substrato com argamassa epóxi



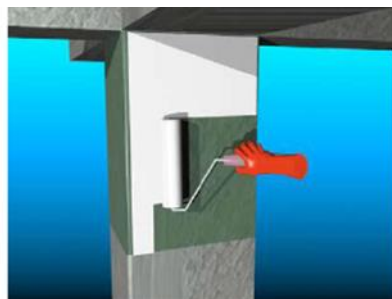
4ª fase – Aplicação da primeira camada de resina (undercoating) para colagem



5ª fase - Aplicação do tecido



6ª fase – Aplicação da resina de impregnação (overcoating)



7ª fase - Aplicação do revestimento final de proteção (fogo e UV)

Figura 3.5 - Fases de aplicação do reforço com manta de CRF (PEREIRA, 2012).

Uma observação importante feita por SILVA (2006) ressalta que as superfícies ásperas possuem condições ideais para execução da recuperação e reforço de elementos de concreto; porém, no sistema de reforço com CRF deseja-se uma superfície lisa que garanta uma perfeita aderência entre os materiais usados.

3.4.2- Pesquisas sobre o reforço de pilares encamisados e o uso de CRF

Diversos trabalhos que enfatizam o bom desempenho de técnicas de reforço por encamisamento com concreto armado, os benefícios da utilização de compósitos reforçados com fibras de elementos estruturais, bem como o uso de CRF no reforço de pilares por meio de encamisamento e sua excelente aderência com o concreto, são encontrados na literatura.

Na Tabela 3.2 são apresentados, de maneira cronológica, os principais trabalhos de interesse para o presente estudo, apontando apenas as conclusões mais relevantes (reforço de pilares de seção transversal circular encamisada por mantas de fibras de carbono).

Tabela 3.2 - Pesquisadores e conclusões relevantes para o presente estudo.

Pesquisador	Conclusões obtidas
<p>SAADATMANESH, EHSANI e LI (1994) <i>apud</i> RIGAZZO (2010)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • aumento da resistência do concreto confinado descreve a eficiência do reforço; • aumento do espaçamento entre as cintas proporcionou perda substancial na eficiência do confinamento; • aumento na espessura da cinta acarretou um ganho de eficiência no confinamento de pilares; • os sistemas CRF aumentaram a resistência e a ductilidade dos pilares, sendo a fibra de carbono a mais eficiente.
<p>TOUTANJI (1999) <i>apud</i> RIGAZZO (2010)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • o confinamento com CRFC aumentou a resistência significativamente em relação aos concretos não-confinados e confinados com fibra de vidro; • aumento da deformação última do concreto confinado; • ruptura dos corpos de prova de concreto ocorreu com a ruptura do CRF.

<p>CAZARREDO (2002)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • o aumento na taxa de armadura transversal mostrou ter pouca influência no ganho da capacidade resistente com o reforço por CRF; • o diagrama tensão-deformação do concreto confinado com CRFC é diferente do confinado com aço, sendo praticamente bilinear para os CRFC.
<p>CARNEIRO (2004)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • a seção transversal circular têm melhor desempenho do que a seção retangular; • o aumento da taxa de reforço com CRF leva a maiores ganhos de resistência e ductilidade; • a resistência do concreto confinado tendeu a aumentar quando se utiliza fibras de maior resistência, como as fibras de carbono.
<p>FERREIRA (2007)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • a porcentagem volumétrica de CRF deve ser superior a 0,4% para que exista aumento na capacidade de carga do corpo de prova de referência; • acima de cinco camadas de CRFC por faixa o benefício das mesmas é diminuído; • o confinamento dos corpos de prova com faixas de largura inferior a 30 mm é ineficaz; • verificou-se maior aumento na tensão máxima nas séries que dispunham de menor espaço livre entre as faixas de CRFC; • o confinamento foi mais efetivo nos corpos de prova de concreto de menor resistência; • a capacidade resistente e a ductilidade aumentaram com a porcentagem de CRFC.
<p>SUDANO (2010)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • verificou a influência da seção transversal no desempenho de pilares encamisados com CRFC, sendo a circular a mais propícia.
<p>SARAIVA (2011)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • concluiu que a geometria, as propriedades do concreto e do material compósito, o raio de arredondamento das arestas e a taxa de armadura interna são os parâmetros mais influentes no comportamento dos pilares confinados; • os pilares de seção circular com duas camadas de manta de fibra de carbono com taxa de armadura menor apresentou maior ganho de resistência média do núcleo de concreto em comparação ao sem reforço; • quanto o menor espaçamento entre estribos em pilares de concreto sem ou com reforço de compósitos de resina e fibras, maior o aumento de resistência.

3.4.3 – Modelos de Cálculos Propostos Por Diferentes Pesquisadores

Diversos pesquisadores realizaram estudos sobre modelos de confinamento de pilares de concreto simples e seção circular, reforçados com materiais compósito de resina e fibra de carbono colado externamente. A seguir serão apresentados alguns deles.

3.4.3.1 - MIYAUCHI *et al.* (1997)

A tensão do concreto confinado em função da deformação do concreto é dada pelas Equações 3.1 a 3.7.

$$0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_a$$
$$\sigma_c = f_{co} \left[2 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right] \quad (\text{Eq. 3.1})$$

$$\varepsilon_a \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cc}$$
$$\sigma_c = f_{cc} - \lambda(\varepsilon_{cc} - \varepsilon_c) \quad (\text{Eq. 3.2})$$

onde:

ε_{co} é a deformação longitudinal correspondente ao pico da curva tensão longitudinal-deformação longitudinal do concreto não confinado, admitida igual a 2‰;

f_{cc} é a resistência do concreto confinado;

ε_{cc} é a deformação longitudinal correspondente ao pico da curva tensão longitudinal-deformação longitudinal do concreto confinado;

ε_a é a deformação longitudinal correspondente ao ponto de interseção dos trechos parabólico-linear, para uma tensão σ_a , sendo ε_a e σ_a dadas pelas Equações 3.3 a 3.5.

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{co} - \lambda \frac{\varepsilon_{co}^2}{2f_{co}} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

$$\lambda = \frac{-2f_{co}(\varepsilon_{cc} - \varepsilon_{co}) + \sqrt{4f_{co}(f_{co}\varepsilon_{cc}^2 - 2f_{co}\varepsilon_{co}\varepsilon_{cc} + f_{cc}\varepsilon_{co}^2)}}{\varepsilon_{co}^2} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

$$\sigma_a = f_{co} \left[2 \left(\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_{co}} \right) - \left(\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right] \quad (\text{Eq. 3.5})$$

A resistência última do concreto confinado à compressão é dada pela Equação 3.6, enquanto a deformação última do concreto confinado pela Equação 3.7.

$$f_{cc} = f_{co} \left[1 + 3,5 \left(\frac{f_l}{f_{co}} \right) \right] \quad (\text{Eq. 3.6})$$

$$\varepsilon_{cc} = 0,002 \left[1 + 10,6 \left(\frac{2t_f f_f}{D f_{co}} \right) \right] \quad (\text{Eq. 3.7})$$

3.4.3.2 - TOUTANJI (1999)

A tensão do concreto confinado no primeiro ramo da curva $\sigma \times \varepsilon$ é dada pela Equação 3.8.

$$\sigma_c = \frac{A\varepsilon_c}{1 + B\varepsilon_c + C\varepsilon_c^2} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

onde:

$$A = E_1 \quad (\text{Eq. 3.9})$$

$$B = \frac{E_1}{\sigma_a} - \frac{2}{\varepsilon_a} + \frac{E_1 E_2 \varepsilon_a}{\sigma_a^2} \quad (\text{Eq. 3.10})$$

$$C = \frac{1}{\varepsilon_a^2} - \frac{E_1 E_2}{\sigma_a^2} \quad (\text{Eq. 3.11})$$

sendo:

E_1 é a tangente ao primeiro ramo da curva na origem;

E_2 é a tangente à curva no ponto de interseção dos dois ramos da curva;
 σ_a e ε_a são a tensão e a deformação longitudinais no ponto de interseção dos dois ramos da curva, dadas por:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{co} \left[1 + 0,0448 \left(\frac{2E_f t_f}{D f_{co}} \right)^{0,85} \right] \quad (\text{Eq. 3.12})$$

$$\sigma_a = f_{co} \left[1 + 0,0178 \left(\frac{2E_f t_f}{D f_{co}} \right)^{0,85} \right] \quad (\text{Eq. 3.13})$$

A deformação transversal (ε_{at}) é igual a:

$$\varepsilon_{at} = 2\text{‰} \quad (\text{Eq. 3.14})$$

A tangente ao primeiro ramo da curva tensão – deformação na direção longitudinal na origem é:

$$E_1 = 10200(f_{co})^{1/3} \quad (\text{Eq. 3.15})$$

com E_1 e f_{co} em MPa;

e à curva tensão longitudinal – deformação transversal dado por:

$$E_{1t} = 51000(f_{co})^{1/3} \quad (\text{Eq. 3.16})$$

com E_{1t} e f_{co} em MPa;

A tangente à curva no ponto de interseção dos dois ramos da curva tensão – deformação na direção longitudinal é igual a:

$$E_2 = 0,3075 \frac{f_{co}}{\varepsilon_{co}} \quad (\text{Eq. 3.17})$$

com E_2 e f_{co} em MPa;

e à curva tensão longitudinal – deformação transversal dado por:

$$E_{2t} = 7,557f_{co} \left(\frac{2E_f t_f}{D f_{co}} \right)^{0,85} \quad (\text{Eq. 3.18})$$

A deformação última no segundo ramo da curva $\sigma \times \varepsilon$ e a tensão do concreto confinado são dadas pelas Equações 3.19 e 3.20, respectivamente.

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{co} \left[1 + (310,57\varepsilon_{ct} + 1,90) \left(\frac{\sigma_c}{f_{co}} - 1 \right) \right] \quad (\text{Eq. 3.19})$$

onde:

$$\sigma_c = f_{co} \left[1 + 3,5 \left(\frac{\sigma_l}{f} \right)^{0,85} \right] \quad (\text{Eq. 3.20})$$

$$\sigma_1 = \frac{2E_f t_f \varepsilon_{ct}}{D} \quad (\text{Eq. 3.21})$$

f_{cc} e ε_{cc} são a resistência e a deformação última do concreto confinado dadas por:

$$f_{cc} = f_{co} \left[1 + 3,5 \left(\frac{f_l}{f_{co}} \right)^{0,85} \right] \quad (\text{Eq. 3.22})$$

$$\varepsilon_{cc} = 0,002 \left[1 + (310,57\varepsilon_{fu} + 2,6) \left(\frac{f_{cc}}{f_{co}} \right) - 1 \right] \quad (\text{Eq. 3.23})$$

$$\sigma_l = \frac{2E_f t_f \varepsilon_{ct}}{D} \quad (\text{Eq. 3.24})$$

ε_{co} é adotado pelo pesquisador igual a 2‰.

3.4.3.3 - XIAO e WU (2000)

Para os valores de tensões longitudinais de até o valor da resistência do concreto não confinado à compressão ($\sigma_c \leq f_{co}$), as equações para cálculo da tensão longitudinal e da deformação transversal são dadas pelas Equações 3.25 a 3.37.

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c + 2\nu \sigma_l \quad (\text{Eq. 3.25})$$

$$\varepsilon_{ct} = -\frac{\nu}{1 + \frac{C_f}{E_c}(1 - \nu - 2\nu^2)} \varepsilon_c \quad (\text{Eq. 3.26})$$

onde:

E_c é o módulo de elasticidade do concreto não confinado igual a:

$$E_c = 4733\sqrt{f_{co}} \quad (\text{Eq. 3.27})$$

com f_{co} em MPa;

ν o coeficiente de Poisson do concreto não confinado admitido igual a $\nu = 0,18$;

σ_l é atenção lateral de confinamento, dado por:

$$\sigma_l = -C_f \varepsilon_{ct} \quad (\text{Eq. 3.28})$$

com C_f definido como módulo de confinamento, dado como:

$$C_f = \frac{2t_f}{D} E_f \quad (\text{Eq. 3.29})$$

Para valores de tensões acima do valor da resistência do concreto não confinado à compressão ($\sigma_c > f_{co}$) são:

$$\sigma_c = 1,1f_{co} + k_l\sigma_l \quad (\text{Eq. 3.30})$$

$$\varepsilon_{ct} = \varepsilon_{cto} - \nu\varepsilon_c \quad (\text{Eq. 3.31})$$

onde:

$$\alpha = 1,10 \quad (\text{Eq. 3.32})$$

$$k_l = 4,1 - 0,75 \left(\frac{f_{co}^2}{C_f} \right) \quad (\text{Eq. 3.33})$$

$$\varepsilon_{cto} = -0,5\text{‰} \quad (\text{Eq. 3.34})$$

$$\nu = 7 \left(\frac{f_{co}}{C_f} \right)^{0,8} \quad (\text{Eq. 3.35})$$

Tensão última do concreto confinado à compressão

$$f_{cc} = f_{co} \left[1,1 + \left(4,1 - 0,75 \frac{f_c^2 D}{2t_f E_f} \right) \left(\frac{f_l}{f_{co}} \right) \right] \quad (\text{Eq. 3.36})$$

Deformação última do concreto confinado

$$\varepsilon_{cc} = \frac{\left(\frac{f_f}{E_f} \right) + 0,0005}{\left[7 \left(\frac{Df_{co}}{2t_f E_f} \right)^{0,8} \right]} \quad (\text{Eq. 3.37})$$

3.4.3.4 – CAMPIONE e MIRAGLIA (2003)

A tensão do concreto confinado é dada pela Equação 3.38.

$$\sigma_c = f_{co} \left\{ \eta \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} + \frac{\left[1 - \eta \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right]}{\left[1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^3 \right]^{\frac{1}{3}}} \right\} \quad (\text{Eq. 3.38})$$

onde:

$$\eta = \frac{f_{cc} - f_{co}}{E_{ct}(\varepsilon_{cc} - \varepsilon_{co})} \varepsilon_c \quad (\text{Eq. 3.39})$$

sendo:

E_{ct} o módulo de elasticidade tangente inicial do concreto;

f_{cc} dada na Equação 4,39;

ε_{cc} definida na Equação 4.40;

Tensão última do concreto confinado à compressão

$$f_{cc} = f_{co} \left[1 + 2 \left(\frac{f_c}{f_{co}} \right) \right]; k_l = k_e; f_l = k_l f_l \quad (\text{Eq. 3.40})$$

Deformação última do concreto confinado

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} + 2\rho_f \frac{f_f^2}{E_f} \frac{l}{2(f_{co} + f_{le})} \quad (\text{Eq. 3.41})$$

Com base no estudo sobre o reforço de pilares com compósitos de fibra de carbono, no próximo capítulo, elaborou-se um programa experimental com ensaios previstos que possuem a finalidade de contribuir com as pesquisas nesta área do conhecimento e avaliar o comportamento do sistema de reforço utilizando o compósito de resina geopolimérica e manta de fibra de carbono.

Capítulo 4 - Programa Experimental

No programa experimental elaborado para o desenvolvimento da pesquisa, descrevem-se os principais materiais utilizados e suas propriedades físicas e químicas, bem como os métodos de ensaios para a avaliação do sistema de reforço estrutural.

Para a confecção da resina geopolimérica, foram investigadas e executados diversas composições, a fim de buscar um material que apresentasse a viscosidade e a resistência mecânica adequada para a aplicação desejada. As composições testadas foram moldadas em moldes cilíndricos de 50 mm x 100 mm e ensaiadas à compressão axial aos 14 dias. Porém, relatam-se os resultados obtidos para a composição escolhida.

Após a escolha da composição da resina geopolimérica, foram confeccionados corpos de prova de 50 mm x 100 mm, sendo três para cada idade, e verificada sua resistência à compressão em 1, 3, 7, 14, 21, 28, 60, 90 dias. Também foi avaliada a resistência à tração indireta (por compressão diametral) aos 28 dias das resinas em corpos de prova com as mesmas dimensões. Todos foram desmoldados após 24 horas e a cura realizada ao ar sob temperatura ambiente até a data dos ensaios.

Ensaio para avaliação da resistência à tração uniaxial do compósito de resina e fibra de carbono da empresa Viapol e da resina geopolimérica produzida foram realizados em conformidade com a norma ASTM D3039 (2002), no Laboratório de Materiais Avançados da UENF, em uma prensa universal da marca INSTRON, com capacidade de 100 kN.

Para execução e análise do reforço dos pilares foram confeccionados 18 pilares de concreto convencional, em conformidade com a norma ABNT NBR 5738 (2007), sendo três corpos de prova para cada tipo de reforço. Um total de 6 corpos de prova foi adotados como referência e 12 com reforço, sendo 6 com compósito reforçado com fibra de carbono colado com resina geopolimérica e 6 com compósito reforçado com fibra de carbono colado com resina epóxi. Neste variou-se o número de camadas da fibra (uma e duas camadas).

A resistência à compressão foi avaliada para todos os pilares, nos quais três de referência ensaiados aos 28 dias e três ensaiados juntamente com os corpos de prova reforçados. Para os corpos de prova reforçados, a resistência à

compressão axial foi avaliada após 21 dias da execução do reforço. O ensaio foi realizado em conformidade com a norma ABNT NBR 5739 (2007).

Todos os ensaios acima descritos foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), por meio de uma máquina de ensaios mecânicos da marca EMIC, com capacidade de 2000 kN. Ao final dos ensaios, os resultados obtidos consideraram a média obtida em três corpos de prova.

Após os ensaios dos pilares, foi realizada a inspeção visual para avaliação e comparação dos tipos de ruptura obtidos, descrito no Capítulo 5.

Os métodos utilizados estão baseados nas seguintes etapas:

- caracterização das matérias primas do geopolímero;
- caracterização do compósito;
- investigação do traço da resina geopolimérica;
- ensaios para determinação do comportamento mecânico do sistema;
- análise da resistência de aderência entre o compósito e o substrato, por meio do modo de ruptura e análise visual da superfície de fratura.

Os parâmetros que foram avaliados para a caracterização do desempenho mecânico e da aderência da resina geopolimérica com o concreto constituiu no confinamento do pilar com compósito de fibra de carbono, variando o número de camadas do reforço (uma e duas camadas) e comparados com os sistemas compósitos de fibra de carbono e resina epóxi.

Nos próximos itens abordaram-se os materiais e métodos que foram utilizados neste estudo.

4.1 – Materiais

4.1.1- Concreto

A composição do concreto adotado, em massa, foi 1:1,71:2,84 (cimento:areia:agregado graúdo), com relação água/cimento de 0,63, para uma resistência de 20 MPa aos 28 dias, sendo este o substrato do reforço. A Tabela 4.1

mostra a quantidade de material que foi utilizada na fabricação dos corpos de prova, considerando perdas.

Tabela 4.1 – Consumo de material para um 1m³ de concreto.

Material	Kg
CP II E-32	386,6
Areia	661,1
Brita 0	1097,9
Água	243,5

O concreto confeccionado foi produzido com materiais apresentados a seguir e estão de acordo com as normas pertinentes.

4.1.1.1 - Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi uma areia quartzosa de rio, lavada, seca em estufa durante um período de 24 horas à temperatura de 110°C.

4.1.1.2 - Agregado graúdo

O agregado graúdo, brita 0, proveniente de jazidas localizadas no município de Campos dos Goytacazes, foi lavado durante o peneiramento e seco em estufa a 110°C por 24 horas.

4.1.1.3 - Cimento Portland

O cimento utilizado foi o Cimento Portland CII-E32, da marca Mauá. As propriedades químicas do cimento são relatadas no item 4.1.2.2.

4.1.1.4 - Água

Para mistura, tanto do concreto como da resina, foi utilizada a água proveniente da rede de abastecimento de água do município de Campos dos Goytacazes.

4.1.2 – Resina geopolimérica

A resina geopolimérica para a colagem dos compósitos com fibra de carbono nos pilares de concreto foi produzida com a utilização de matérias primas já consagradas entre pesquisadores da área (DIAS, 2001; SOARES, 2006; MAZZA, 2010).

Os principais materiais empregados no desenvolvimento da resina geopolimérica foram: metacaulim, como fonte de alumínio e silício, e cimento Portland CP II E-32, como fonte de cálcio. Para a ativação alcalina foi usado hidróxido de potássio (KOH) e silicato de sódio alcalino comercial (Na_2SiO_3), como fonte adicional de silício em solução.

A seguir apresenta-se a composição química dos materiais necessária para obtenção da resina.

4.1.2.1- Metacaulim

Foi utilizado o metacaulim HP ultra da Metacaulim do Brasil. As propriedades físicas e químicas do material podem ser observadas abaixo nas Tabelas 4.2 e 4.3, respectivamente, sendo as propriedades físicas fornecidas pelo fabricante e a composição química obtida por fluorescência de raios X no Laboratório de Engenharia Civil da UENF.

Tabela 4.2 - Propriedades físicas do metacaulim.

Análise	Resultado	Típico	Limite
Finura (<#325 - 44 μm)	8,30%	5,00%	<10 %
Área Específica (BET, m^2/hg) – AE	22.000	23.000	AE > 15.000
Massa Específica (kg/m^3) – ME	2.570	2.580	2600 > ME > 2500
Massa Unitária (kg/m^3) - UM	630	600	700 > UM > 550
Propriedades adicionais	Chapelle = 910 $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$ - Poz. Activ. Ind. Cement - 7 days = 112%		

Tabela 4.3 - Composição química do metacaulim obtida por fluorescência de raio x.

Elementos	Resultados (%)	Típico	Limite
SiO ₂	53,17	58,00%	< 65,0%
Al ₂ O ₃	37,25	34,00%	> 32,0%
K ₂ O	4,53	2,00%	-
Fe ₂ O ₃	1,77	1,00%	< 2,0%
SO ₃	1,44	0,10%	< 0,5%
TiO ₂	1,39	0,10%	< 0,50%
CaO	0,30	1,70%	< 2,20%
V ₂ O ₅	0,09	0,10%	< 0,50%
ZrO ₂	0,02	0,00%	< 0,10%
Rb ₂ O	0,01	2,50%	< 4,0%

4.1.2.2- Cimento Portland

Como fonte de cálcio foi adotado o cimento CP II E-32 da marca Mauá, ou seja, o mesmo cimento usado na concretagem dos pilares. Na Tabela 4.4 é mostrada sua composição química.

Tabela 4.4 - Composição química do cimento CP II E-32 obtida por fluorescência de raio x.

Elementos	Resultados (%)
CaO	74,32
SiO ₂	14,88
Al ₂ O ₃	4,41
SO ₃	2,64
Fe ₂ O ₃	2,15
K ₂ O	0,97
TiO ₂	0,32
MnO	0,13
SrO	0,12
ZnO	0,04

4.1.2.3 – Areia

Como carga mineral da resina foi utilizada a areia lavada do Rio Paraíba do Sul. Como o agregado miúdo pode influenciar nas propriedades da resina, como sua resistência e a sua viscosidade, por exemplo, esta passou por peneiramento (#45 µm) e posterior homogeneização.

4.1.2.4- Hidróxido de Potássio

Utilizou-se o hidróxido de potássio comercial com porcentagem de óxido de potássio (K₂O) de 87,1%, conforme informado pelo fabricante.

4.1.2.5- Silicato de sódio alcalino

O silicato de sódio alcalino comercial em escamas teve as propriedades físicas e químicas também informadas pelo fabricante, e são mostradas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Propriedades físicas e químicas do Silicato de sódio alcalino comercial.

Análises	Unidade	Especificação	Resultados
Densidade	° Be	52,00 - 54,00	52,7
Massa Específica	hg/cm ³	1560 - 1600	1570
Viscosidade	Cp	900 - 1200	1090
Na ₂ O	%	14,50 - 15,30	14,7
SiO ₂	%	32,00 - 33,00	32,2
Sólidos totais	%	46,50 - 48,30	46,9
Relação	%	2,10 - 2,25	2,19

4.1.2.6- Água

Utilizou-se água proveniente da rede de abastecimento de água do município de Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro.

4.1.3 - Sistema de reforço

A manta de fibra de carbono Carbon CPW 300, da marca Viapol, foi a mesma utilizada no reforço com o uso das resinas geopoliméricas e epóxi da Viapol. Esta contém 3 resinas epoxídicas bicomponente para a instalação da manta: o *primer*, a resina de impregnação e uma resina saturante.

A seguir são apresentadas as características técnicas da manta e de cada resina utilizada no sistema da Viapol, Carbon CPW 300.

4.1.3.1- Manta de fibra de carbono

A manta unidirecional de fibra de carbono foi a Viapol Carbon CFW 300 da empresa VIAPOL (Figura 4.1), que possui características técnicas (fornecidas pela empresa) apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Características técnicas da manta de fibra de carbono.

Características	Especificação
Gramatura	300 g/m ³
Espessura da manta	0,166 mm
Resistência máxima de tração	4900 MPa
Módulo de elasticidade	230 GPa
Deformação	21 ‰



Figura 4.1 - Manta de fibra de carbono da Viapol, Carbon CFW 300.

4.1.3.2 – Viapol Carbon *Primer* (resina epóxi bicomponente)

As propriedades do Viapol Carbon *Primer* (Figura 4.2) são mostradas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Características técnicas *primer*.

Características	Especificação
Cura final	7 dias
Secagem ao toque	De 8 a 12 horas
Resistência à aderência	>2 MPa
Temperatura de aplicação	10 a 30 ° C
<i>Pot life</i>	20 a 50 minutos



Figura 4.2 - Viapol Carbon Primer.

4.1.3.3 – Viapol Carbon Saturante (resina epóxi bicomponente)

Na Figura 4.3 e Tabela 4.8 são mostradas a resina Viapol Carbon Saturante e suas propriedades, respectivamente.

Tabela 4.8 - Características técnicas da resina saturante.

Características	Especificação
<i>Pot life</i> – 20°C	Aproximadamente 40 min
Tempo de secagem ao toque	<11 horas
Cura total	7 dias
Relação de mistura (P1:P2)	2:1 n/a
Viscosidade	5000 Cps



Figura 4.3 - Viapol Carbon saturante (resina de impregnação).

4.2 – Metodologia

4.2.1 - Concreto

Foram confeccionados 18 corpos de prova de concreto simples em moldes cilíndricos metálicos com dimensão de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, obedecendo à norma ABNT NBR 5739 (2007), mantendo a relação de h/d igual a 2 (Figura 4.4).

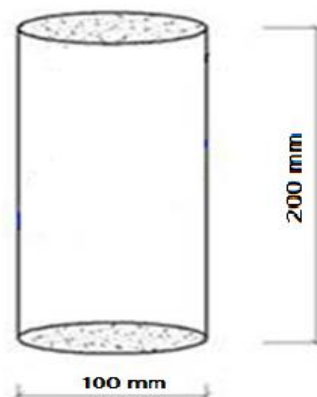


Figura 4.4 - Dimensões do pilar.

A mistura dos materiais para confecção do concreto foi realizada com o auxílio de uma betoneira. Os materiais foram colocados na betoneira de eixo inclinado na

seguinte ordem: 100% do agregado graúdo, 100% de areia (fazendo a homogeneização desses agregados), 50% de água, 100% de cimento e o restante da água, com tempo de mistura de 10 minutos.

Após a mistura foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone (*Slump Test*), de acordo com a norma ABNT NBR NM 67 (1998), atingindo o valor de 40 mm (Figura 4.5).

A moldagem dos pilares seguiu os seguintes procedimentos prescritos na norma ABNT NBR 5738 (2015):

- foi colocada uma primeira camada na fôrma, contendo uma altura de aproximadamente $\frac{1}{3}$ da altura total. Realizou-se adensamento manual de 25 golpes com uma haste metálica, que deve ser atravessada em toda a sua espessura, evitando-se golpear a base do molde;
- o procedimento foi repetido para as outras duas camadas. No adensamento de cada camada a haste penetrou aproximadamente 20 mm na camada anterior;
- a última camada foi moldada com quantidade em excesso de concreto, de forma que ao ser adensada, completou todo o volume do molde e foi possível proceder ao seu rasamento, eliminando o material em excesso.



Figura 4.5 - Ensaio do abatimento do tronco do cone.

Após 24 horas foram retirados os pilares de concreto das fôrmas. Eles permaneceram em água saturada de cal e, após 28 dias, em condições ambientes do laboratório até a data do ensaio.

4.2.2 – Resina geopolimérica

As resinas utilizadas na técnica de reforço em estruturas apresentam elevada viscosidade; por isso, esta é uma etapa de extrema importância para produção de uma resina com propriedades que atendam ou superem às propriedades das resinas convencionais presentes no mercado.

A composição que foi adotada para a resina geopolimérica é expressa pela relação:

$$S: \text{areia}: \frac{L}{S}$$

onde,

- S = relação dos sólidos, composto pela soma: metacaulim + cimento Portland + KOH + $0,49 \cdot \text{Na}_2\text{SiO}_3$ (parte sólida do silicato de sódio alcalino).
- L = relação dos líquidos, composta pela soma $\text{H}_2\text{O} + 0,51 \cdot \text{Na}_2\text{SiO}_3$ (parte líquida do silicato de sódio alcalino).
- areia: corresponde à proporção com a quantidade do parâmetro S .

Definiu-se para pesquisa a composição 1:1,2:0,36. Com a composição foi possível confeccionar uma resina com elevado teor de sólidos e que atendesse a aplicação desejada.

Após determinada a composição química das matérias primas e definida a composição do geopolímero, considerando que a totalidade dos materiais é reativo, realizaram cálculos para encontrar as razões molares necessárias para o melhor desempenho da resina geopolimérica (ver Anexo I). Na Tabela 4.9 são mostrados os resultados obtidos.

Tabela 4.9 - Razões molares das matérias primas.

Componente	Número de mols
SiO_2	3,890
Al_2O_3	0,906
K_2O	1,114
Na_2O	0,626
CaO	1,509
Razões molares	
$\frac{SiO_2}{Al_2O_3} = 4,3$	
$\frac{SiO_2}{K_2O + Na_2O + CaO} = 1,2$	
$\frac{Al_2O_3}{K_2O + Na_2O + CaO} = 0,3$	
$\frac{K_2O + Na_2O}{CaO} = 1,2$	

MAZZA (2010) descreveu a produção em seis etapas distintas para o preparo da argamassa geopolimérica, utilizando-se processo de mistura e adensamento manual. Estas etapas foram adotadas primeiramente por TORRALBA (2007). O presente trabalho mostra uma adaptação da sequência utilizada pelos pesquisadores para a confecção da resina geopolimérica. Os passos e a sequência adotada são mostrados na Tabela 4.7.

A mistura dos ativadores alcalinos foi realizada em um misturador magnético com o auxílio de uma barra magnética (com dimensões de 7 mm por 30 mm) como mostra na Figura 4.6, obedecendo à ordem descrita na Tabela 4.10.

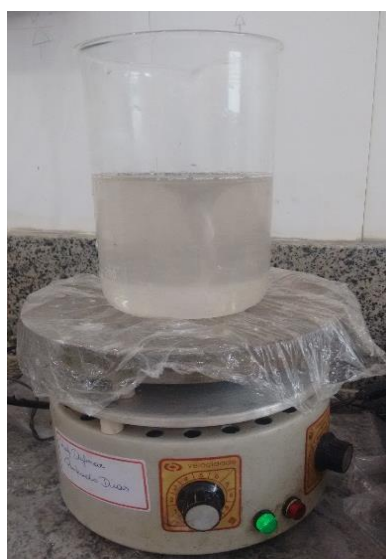


Figura 4.6 - Mistura dos ativadores alcalinos.

Tabela 4.10 - Produção da resina geopolimérica.

Metodologia para produção da resina geopolimérica	
1°	<ul style="list-style-type: none">• Pesa-se a água• Pesa-se o hidróxido de potássio junto com a água• Coloca-se no agitador
2°	<ul style="list-style-type: none">• Pesa-se o silicato de sódio alcalino• Coloca-se a mistura de água + hidróxido de potássio no silicato de sódio alcalino• Volta-se para o agitador
3°	<ul style="list-style-type: none">• Pesa-se o cimento• Pesa-se o metacaulim junto com o cimento• Pesa-se a areia junto com o cimento e o metacaulim• Homogeneiza-se a mistura
4°	<ul style="list-style-type: none">• Tira-se a mistura líquida do agitador e a espera esfriar• Umedece-se a argamassadeira e coloca-se a mistura líquida
5°	<ul style="list-style-type: none">• Coloca-se a mistura sólida lentamente na argamassadeira
6°	<ul style="list-style-type: none">• Liga-se a argamassadeira na velocidade 1 por 60 segundos• Desliga-se e mexe-se à mão por 30 segundos• Liga-se novamente na velocidade 1 e mexe-se por 30 segundos• Passa-se para a velocidade 2 e mexe-se por mais 30 segundos

Após a mistura dos ativadores alcalinos, é realizada a mistura dos mesmos com a parte sólida em argamassadeira, como mostra a Figura 4.7.



Figura 4.7 - Mistura da resina geopolimérica em argamassadeira.

Para os ensaios mecânicos da resina, descritos posteriormente, foram moldados corpos de prova em moldes metálicos cilíndricos de 50 mm de diâmetro e

100 mm de altura (Figura 4.8). A mistura era sempre preparada em um volume correspondente a 3 corpos de prova. A composição escolhida (1:1,2:0,36), assim como o consumo em gramas dos materiais para produção dos 3 corpos de prova (utilizando 10% de perda do material) são mostradas na Tabela 4.11.



Figura 4.8 - Corpos de prova da resina geopolimérica.

Tabela 4.11 - Composição e consumo dos materiais para produção da resina geopolimérica para moldagem de 3 corpos de prova.

Composição	
1:1,2:0,36	
Materiais	Quantidade (g)
Metacaulim	247,97
Areia	715,60
CP II E-32	112,84
Água	77,71
Silicato de sódio	263,76
Hidróxido de potássio	106,28

Os corpos de prova foram desmoldados após 24 horas e curados em temperatura ambiente até o dia da realização do ensaio de resistência à compressão axial nas idades de 1, 3, 7, 14, 21, 28, 60 e 90 dias, bem como para resistência à tração indireta (por compressão diametral) aos 28 dias.

Os corpos de prova ensaiados aos 28 dias foram instrumentados com o auxílio de extensômetro elétrico para avaliação das deformações longitudinais e transversais, como mostra a Figura 4.9.



Figura 4.9 - Instrumentação do corpo de prova de resina geopolimérica ensaiada aos 28 dias.

4.2.3 – Sistema de reforço

Para o reforço dos pilares foi utilizado o sistema de reforço curado *in situ*. O sistema de reforço foi aplicado de maneira a seguir uma ordem de etapas para se atingir a eficiência do reforço. Na Figura 4.10 são mostrados, por um fluxograma, a ordem e os materiais que foram utilizados nos dois sistemas deste estudo. Na Tabela 4.12 são apresentados a simbologia e os parâmetros avaliados.

Para a avaliação das propriedades mecânicas dos pilares foram ensaiados 18 corpos de prova; contudo, no pilar de referência não foi realizado o reforço com compósito a fim de comparar o aumento da capacidade resistente com os outros reforçados. Foram confeccionados 6 pilares de referência, sendo 3 para verificação da resistência do traço escolhido aos 28 dias e 3 para ensaiar na mesma data dos pilares reforçados.

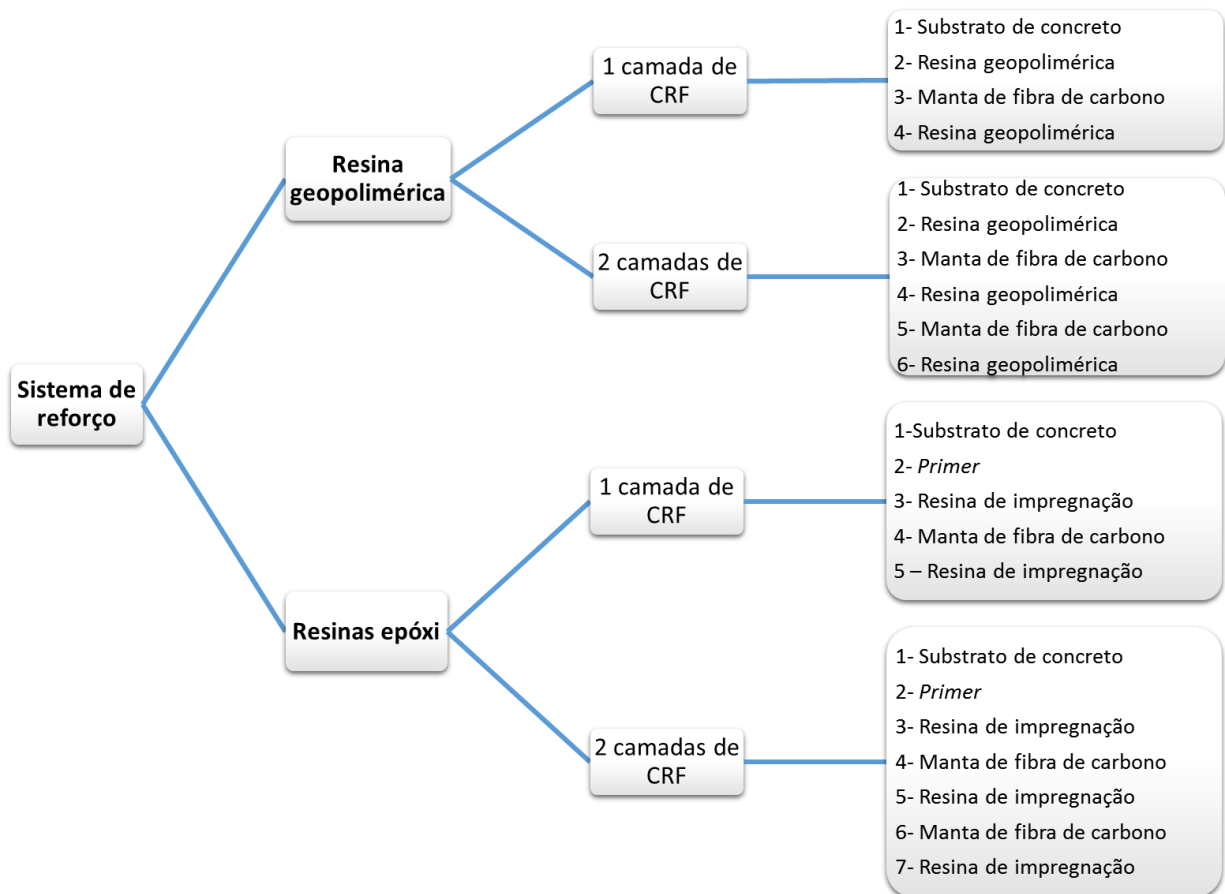


Figura 4.10 - Fluxograma da metodologia do reforço realizado.

Tabela 4.12 - Nomenclatura adotada para os pilares e parâmetros avaliados.

Parâmetros		Quantidade de corpos de prova	Nomenclatura
Referência	Ensaiado aos 28 dias	3	REF28
	Ensaiado aos 140 dias	3	REF140
Reforçado	Resina Epóxi	1 camada CRF	RRE1C
		2 camadas CRF	RRE2C
	Resina Geopolimérica	1 camada CRF	RRG1C
		2 camadas CRF	RRG2C

Nos pilares reforçados, além da resistência à compressão axial do pilar, as interfaces substrato/compósito (1 camada de reforço) e compósito/compósito (2 camadas de reforço) foram analisadas após a ruptura.

Foi aplicada uma ou duas camadas (dependendo do número de camadas de reforço) de resina com espessura entre 1,0 mm e 1,5 mm. As camadas do compósito de reforço foram superpostas em um comprimento de 100 mm (Figura 4.11).

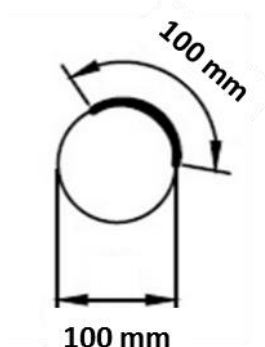


Figura 4.11 - Superposição da manta de fibras de carbono.

4.2.3.1- Sistema compósito de fibra de carbono e resina epóxi

Para a realização do sistema Viapol Carbon CFW 300 foram seguidos os passos descritos pelo fabricante. A Tabela 4.13 mostra os passos seguidos para a realização, de uma e duas camadas de reforço.

Tabela 4.13 - Ordem de execução do sistema compósito de fibra de carbono e resina epóxi.

<p>1 Camada</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Limpeza da superfície de concreto a ser aplicado o reforço. • Aplicação do <i>primer</i> e secagem do mesmo para próxima etapa. • Saturação via úmida da manta de fibra de carbono com a resina saturante e colagem no substrato de concreto. • Para promover o alinhamento das fibras e a rolagem de bolhas de ar que possam estar aprisionadas no sistema, utilizou-se um rolo em toda a extensão do corpo de prova. • Após 40 minutos aplicou-se outra camada da resina saturante, de modo a garantir que a fibra de carbono ficasse completamente encapsulada.
<p>2 Camadas</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Limpeza da superfície de concreto a ser aplicado o reforço. • Aplicação do <i>primer</i> e secagem do mesmo para próxima etapa. • Saturação via úmida da manta de fibra de carbono com resina saturante e colagem no substrato de concreto. • Para promover o alinhamento das fibras e a rolagem de bolhas de ar que possam estar aprisionadas no sistema, utilizou-se um rolo em toda a extensão do corpo de prova. • Após 40 minutos aplicou-se outra camada da resina saturante. • Para a aplicação de uma nova camada de fibra, foi aplicado uma segunda demão de resina saturante (independente da última) para impregnação da fibra), após um intervalo de 40 minutos do passo anterior. • Para finalizar o sistema, após 40 minutos aplicou-se outra camada de resina saturante de modo a garantir que a fibra de carbono esteja completamente encapsulada.

A Figura 4.12 mostra os pilares e etapas de a execução do reforço do corpo de prova cilíndrico de concreto com a camada de fibra de carbono.



Figura 4.12 - Realização do sistema com uma camada de reforço com compósito de fibra de carbono e resina epóxi.

4.2.3.2- Sistema compósito de fibra de carbono e resina geopolimérica

A metodologia adotada para a execução do sistema compósito de fibra de carbono e resina geopolimérica foi diferente do realizado no item 4.2.3.2. A aplicação da resina geopolimérica dispensou o uso de um *primer*, pois este material já possui uma elevada aderência em relação ao substrato de concreto e pelo fato de se desejar comprovar a aderência entre os mesmos.

Para iniciar o reforço, a superfície de concreto foi apenas previamente limpa, a fim de se retirar qualquer poeira, gordura ou nata de cimento. A resina geopolimérica

foi aplicada diretamente na fibra e colada na superfície de concreto limpa com o auxílio de um pincel. Após a aplicação das camadas coladas foi utilizado um rolo para o alinhamento e impregnação das fibras. Essa etapa foi realizada para os corpos de prova reforçados com uma e duas camadas e, após a aplicação da fibra, aguardou-se um período de 24 horas para total endurecimento da resina e assim continuar o reforço.

Para os corpos de prova reforçados com uma camada, após esse período, aplicou-se apenas mais uma camada da resina geopolimérica para proteção e encapsulamento das fibras de carbono.

Já para os corpos de prova reforçados com duas camadas, após o mesmo período, realizou-se nova aplicação da resina geopolimérica e fibra de carbono. Neste caso, também foi aguardado mais um período de 24 horas para a aplicação da última camada da resina para proteção das fibras.

Para cada resina geopolimérica para colagem da manta foram confeccionados 3 corpos de prova cilíndricos de 50 mm x 100 mm de dimensão para verificação da resistência à compressão dos mesmos aos 21 dias, sendo dois moldados antes da utilização da resina e um ao final da execução do reforço.

Na Figura 4.13 é possível observar a aparência dos pilares após a execução do reforço com uma camada de fibra de carbono e resina geopolimérica.



Figura 4.13 - Realização do sistema com uma camada de reforço com compósito de fibra de carbono e resina geopolimérica (continua).



Figura 4.14 - Realização do sistema com uma camada de reforço com compósito de fibra de carbono e resina geopolimérica (continuação).

4.3 - Descrição dos ensaios

A determinação da resistência mecânica da resina geopolimérica foi realizada por meio de ensaios de compressão axial e tração indireta (compressão diametral), conforme previstos nas normas ABNT NBR 5739 (2007) e ABNT NBR 7222 (2011), respectivamente (Figuras 4.14 e 4.15).



Figura 4.15 - Ensaio de resistência à compressão axial da resina geopolimérica.



Figura 4.16 - Ensaio de resistência à tração indireta da resina geopolimérica.

O ensaio de resistência à compressão axial da resina geopolimérica foi realizado em 8 idades distintas a saber: 1, 3, 7, 14, 21, 28, 60 e 90 dias (Figura 4.16), e os resultados obtidos são mostrados na Tabela 4.14.

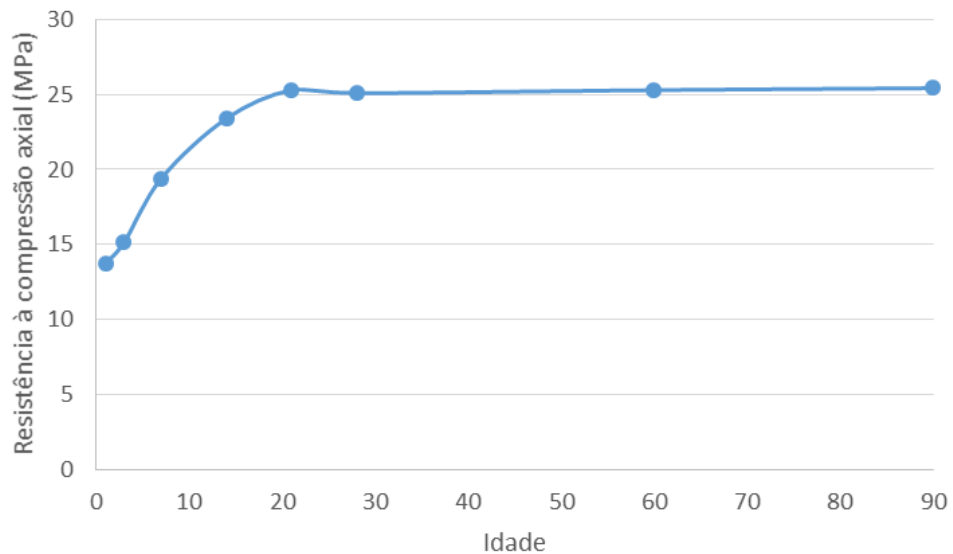


Figura 4.17 - Resistência à compressão axial em função do tempo.

Tabela 4.14 - Resultados dos ensaios de compressão axial e tração indireta da resina geopolimérica.

Resistência à compressão axial	
Idade (dias)	Tensão (MPa)
1	13,7
3	15,1
7	19,4
14	23,4
21	25,3
28	25,1
60	25,1
90	25,3
Resistência à tração direta (28 dias)	
2,46 MPa	

A fim de verificar o módulo de elasticidade da resina geopolimérica, a mesma foi instrumentada com um extensômetro biaxial, que avaliou as deformações nas direções longitudinal e transversal (Figura 4.6) para o traçado da curva tensão-deformação conforme pode ser visto na Figura 4.17.

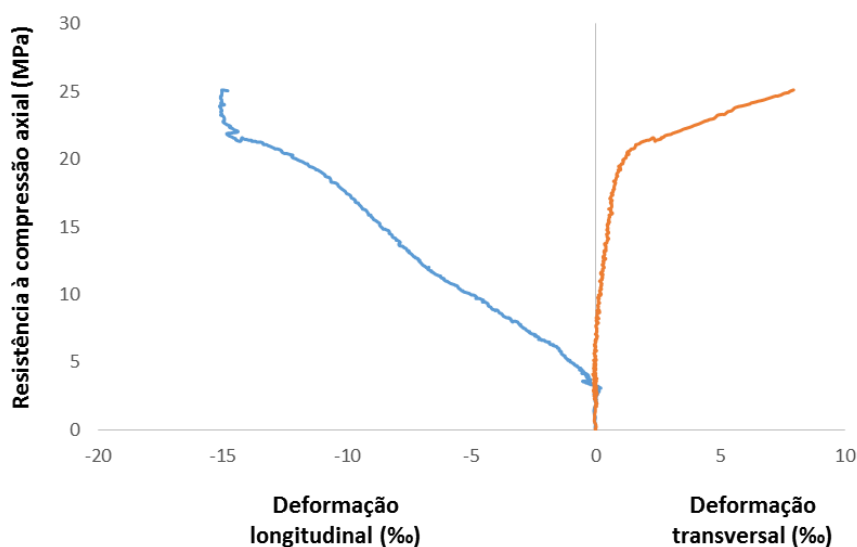


Figura 4.18 - Curva tensão-deformação da resina geopolimérica aos 28 dias.

Para caracterização mecânica da resina Viapol Carbon Saturante, foram realizados os mesmos ensaios de compressão axial e tração indireta realizado para a resina geopolimérica. Os dados obtidos encontram-se na Tabela 5.15.

Tabela 4.15 - Resultados dos ensaios de compressão axial e tração indireta da resina epóxi Viapol Carbon Saturante.

Resistência à compressão axial
77,4 (MPa)
Resistência à tração direta
21,2 MPa

Para os compósitos com manta de fibra de carbono e resina epóxi ou geopolimérico foi realizado ensaio de tração uniaxial em corpos de prova com uma e duas camadas de manta de fibra de carbono envolta em resina, epóxi ou geopolimérica, de acordo com a norma ASTM D 3039 (2002). Todos os corpos de prova para o ensaio possuíam 250 mm de comprimento por 15 mm de largura.

Um corpo de prova do compósito com uma camada de fibra de carbono e resina epóxi é mostrado na Figura 4.18, e com resina geopolimérica na Figura 4.19.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais Avançados da UENF em uma prensa da marca INSTRON (Figura 4.20), com capacidade de 10 kN e com velocidade de 2 mm/min.



Figura 4.19 - Corpo de prova do compósito de resina epóxi e uma camada de fibra de carbono para o ensaio de tração direta.



Figura 4.20 - Corpo de prova do compósito de resina geopolimérica e uma camada de fibra de carbono para o ensaio de tração direta.



Figura 4.21 - Ensaio de resistência à tração direta do compósito.

A resistência à tração do CFC é dada por:

$$f_{f,u} = \frac{P_m}{A_f} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

onde:

$f_{f,u}$ é a resistência à tração (MPa);

P_m a carga de ruptura (N);

A_f a área da seção transversal do corpo de prova.

Os resultados dos corpos de prova de compósito com resinas epóxi e geopolimérica obtidos no ensaio de tração direta são mostrados na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 - Resultados do ensaio de tração direta dos compósitos.

Parâmetro		Carga média de ruptura (N)	Espessura (mm)	Deformação última (‰)	Módulo de elasticidade (MPa)	Resistência à tração direta (MPa)
Epóxi	1 camada	7665,9	0,167	21,0	145724,74	3060,22
	2 camadas	11153,7	0,350	21,0	101166,89	2124,50
Geopolímero	1 camada	2553,2	1,40	8,0	20000,00	121,58
	2 camadas	4101,5	2,20	8,0	20000,00	124,29

Para avaliar a resistência mecânica dos pilares optou-se pela execução dos ensaios aos 21 dias da realização do reforço, pois, como é possível observar na Figura 4.16, a resistência mecânica da resina geopolimérica estabilizou-se nessa idade. Utilizou-se um extensômetro elétrico biaxial (o mesmo usado na instrumentação da resina geopolimérica) para cada parâmetro analisado na pesquisa. Alguns dos corpos de prova instrumentados são mostrados na Figura 4.21. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 4.17 e serão discutidos no capítulo 5.

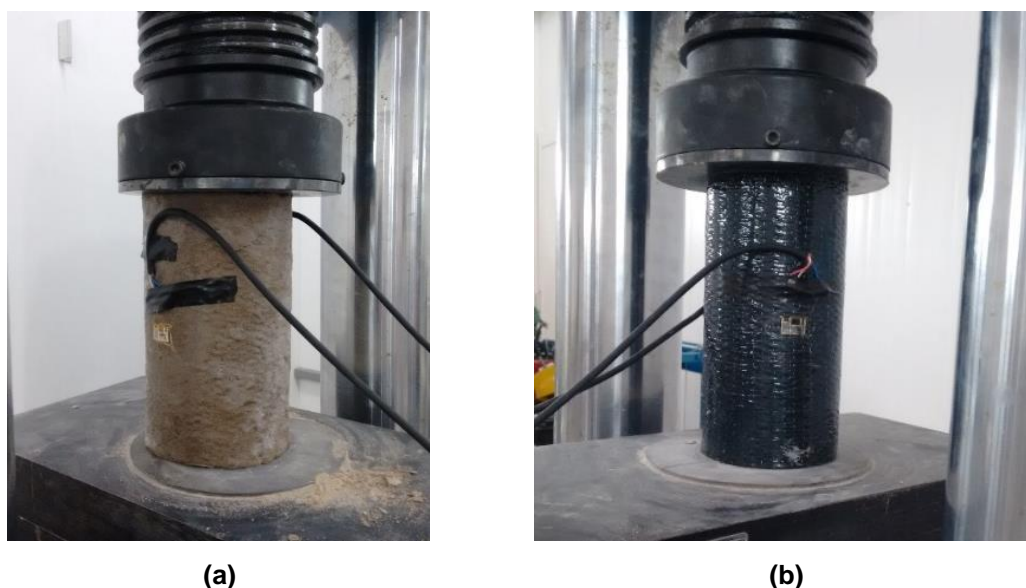


Figura 4.22 - Corpos de prova de concreto instrumentados (a) reforçado com resina geopolimérica; (b) reforçado com resina epóxi; (c) concreto de referência (continua).



(c)

Figura 4.23 - Corpos de prova de concreto instrumentados (a) reforçado com resina geopolimérica; (b) reforçado com resina epóxi; (c) concreto de referência (continuação).

Tabela 4.17 - Valores médios de resistência à compressão axial e deformação últimas dos corpos de prova ensaiados.

Parâmetros		Carga média de ruptura (N)	Resistência à compressão axial (MPa)	Deformação longitudinal (‰)	Deformação transversal (‰)	
Referência	REF28	160225,7	20,4	-	-	
	REF140	215520,0	27,0	2,03	0,18	
Reforçado	Resina epóxi	RRE1C	426763,3	54,3	23,80	2,80
		RRE2C	618490,0	78,8	34,68	5,93
	Resina geopolimérica	RRG1C	291280,0	37,1	2,19	1,67
		RRG2C	431330,0	54,9	2,77	0,49

Capítulo 5 - Resultados e discussão

Neste capítulo são comparados os resultados de resistência mecânica, de deformação última, as curvas tensão-deformação e modo de ruptura dos corpos de prova de concreto simples, reforçados com compósito de resina e fibras de carbono, entre si e com os dados obtidos na literatura.

5.1- Resistência à compressão do concreto confinado

A Tabela 5.1 apresenta os ganhos médios de resistência à compressão axial (f_{cc}) do núcleo de concreto dos corpos de prova reforçados com 1 e 2 camadas de compósito de resina epóxi e geopolimérica e fibras de carbono em relação ao concreto não reforçado.

Tabela 5.1 - Valores médios de resistência à compressão axial do núcleo de concreto dos corpos de prova ensaiados.

Sem reforço	Com reforço				
	Tipo de resina	1 camada		2 camadas	
f_{co} (MPa)		f_{cc} (MPa)	$\frac{f_{cc}}{f_{co}}$	f_{cc} (MPa)	$\frac{f_{cc}}{f_{co}}$
27,05	Epóxi	54,34	2,01	78,75	2,91
	Geopolimérica	37,09	1,37	54,92	2,03

Dessa tabela pode-se observar que os corpos de prova reforçados com duas camadas de fibras com resina epóxi tiveram os maiores ganhos médios de resistência mecânica do núcleo de concreto entre os corpos de prova reforçados. Observa-se que os corpos de prova reforçados com duas camadas, para ambas as resinas, obtiveram ganhos médios de resistência maiores.

Os ganhos médios de resistência à compressão quando usada a resina epóxi, com uma camada de compósito, foi de 101% com relação ao concreto não confinado e, com duas camadas, 191%. Quando comparados os resultados de resistência de concreto com uma e duas camadas de reforçousando resina epóxi, a diferença é de 45%. Já para a resina geopolimérica os ganhos foram de 37% e 103%, com uma e

duas camadas de compósito, respectivamente. Nesse caso, quando comparados os resultados de resistência do concreto com uma e duas camadas de reforço usando resina geopolimérica, a diferença foi de 48% entre eles. Observa-se que para ambas as resinas, a diferença entre a resistência do concreto com uma e duas camadas de reforço foi aproximadamente a mesma.

Entre as duas resinas, a resina epóxi levou aos maiores ganhos de resistência mecânica do concreto em relação à resina geopolimérica, sendo essa diferença de 46% e 44%, para uma e duas camadas de reforço, respectivamente. Novamente a diferença entre as resinas, epóxi e geopolimérica, foi praticamente igual para uma e duas camadas de reforço. Atribui-se que os menores ganhos de resistência para a resina geopolimérica se deve a sua baixa resistência e a dois fatores secundários, a viscosidade da resina e a metodologia de aplicação do reforço, que serão discutidos mais adiante.

A comparação da resistência mecânica *versus* número de camadas de reforço pode ser visualizada na Figura 5.1. Observa-se os maiores ganhos de resistência do concreto para os corpos de prova reforçado com resina epóxi, diferentemente dos resultados com resina geopolimérica, que apresentou pequeno aumento para uma camada de reforço e um aumento mais acentuado para duas camadas de reforço.

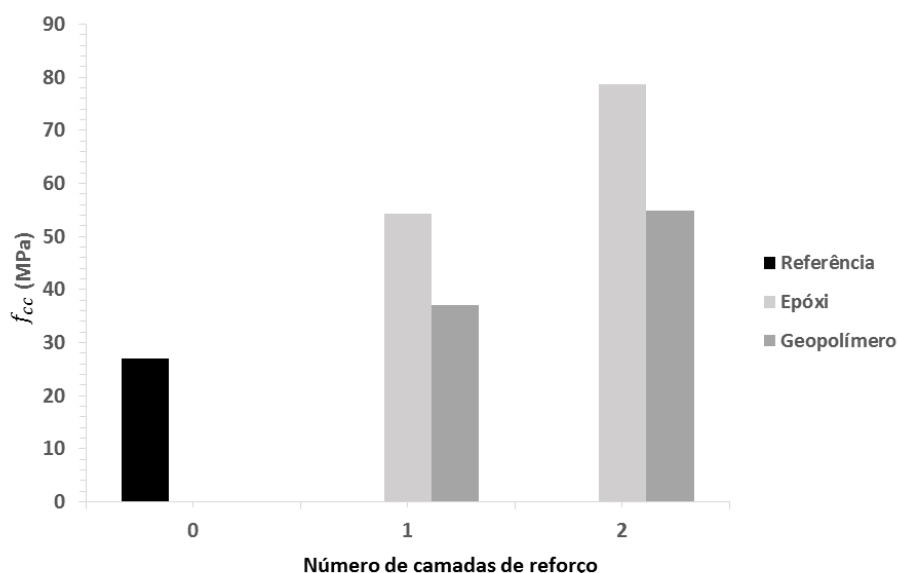


Figura 5.1 – Evolução da resistência à compressão do concreto versus número de camadas.

De acordo com CARNEIRO (2004), de forma geral, para pilares curtos de concreto confinado com compósito de resina epóxi e fibra de carbono, é possível estimar a resistência mecânica do núcleo de concreto confinado pela Equação 5.1.

$$f_{cc} = f_{co} + k_l \cdot k_e \cdot f_l \quad (\text{Eq. 5.1})$$

onde,

k_l é um coeficiente que leva em consideração as características do material confinante;

$k_e \cdot f_l$ é a tensão lateral de confinamento efetiva, sendo k_e igual a 1,0 para seções transversais circulares, e a tensão lateral de confinamento é definida pela Equação 5.2:

$$f_l = \frac{2 \cdot t_f \cdot f_f}{b} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

onde,

t_f é a espessura do compósito;

f_f é a resistência à tração do compósito (ver Tabela 4.16);

b é o diâmetro da seção transversal do núcleo de concreto confinado.

Os valores da tensão de confinamento foram calculados de acordo com os dados da Tabela 5.1 e são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Tensão total de confinamento.

Sem reforço	Com reforço								
	Tipo de resina	1 camada				2 camadas			
		f_l (MPa)	f_{cc} (MPa)	$\frac{f_l}{f_{co}}$	$\frac{f_{cc}}{f_{co}}$	f_l (MPa)	f_{cc} (MPa)	$\frac{f_l}{f_{co}}$	$\frac{f_{cc}}{f_{co}}$
27,05	Epóxi	16,37	54,34	0,61	2,01	34,30	78,75	1,27	2,91
	Geopolimérica	3,40	37,09	0,13	1,37	5,47	54,92	0,20	2,03

De posse dos valores de f_l , f_{co} e f_{cc} , foi obtida a seguinte expressão linear que relaciona estas variáveis entre si, conforme mostra a equação 5.3:

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 3,35 \frac{f_l}{f_{co}} \quad (\text{Eq. 5.3})$$

Com base nos dados apresentados na Tabela. 5.2, foi possível implementar o gráfico f_{cc}/f_{co} em função de f_l/f_{co} com ajuste linear, que melhor se ajusta aos resultados (Figura 5.2). Nela observa-se que os pontos que se aproximam mais da reta são os corpos de prova com resina geopolimérica, e os dois pontos mais afastados referem-se aos reforçados com resina epóxi.

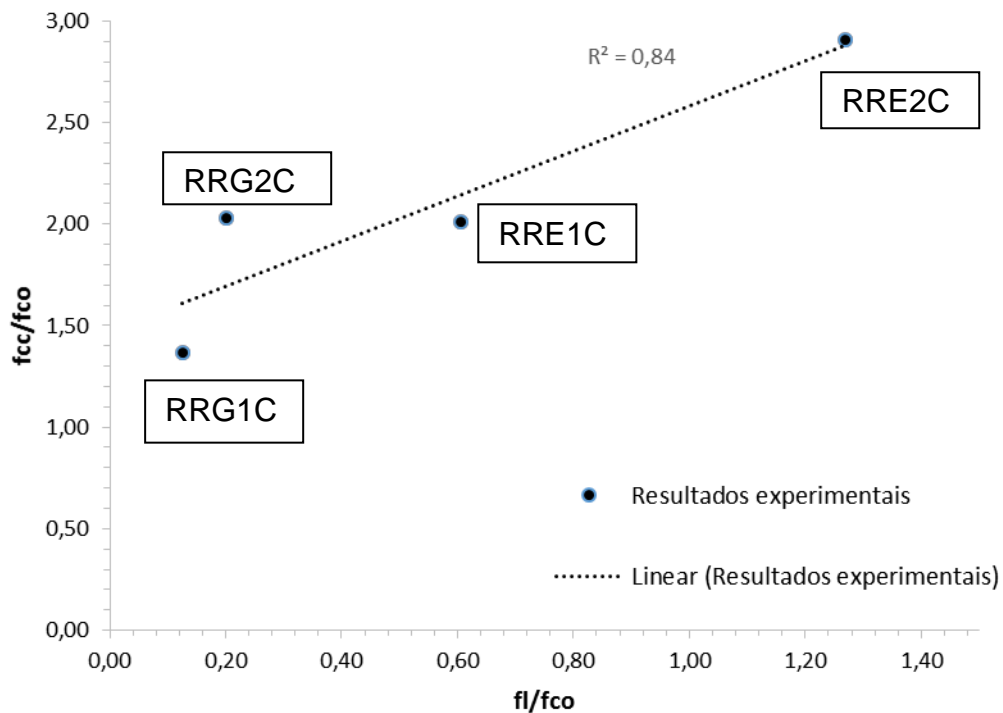


Figura 5.2 - Curva de resistência mecânica relativa do núcleo de concreto versus tensão relativa máxima lateral de confinamento.

As Figuras 5.3 e 5.4 e a Tabela 5.3 reúnem as resistências mecânicas do concreto confinado experimentais e as calculadas segundo os pesquisadores apresentados no Capítulo 3 (ver item 3.4.3), para resina epóxi e geopolimérica, respectivamente. Pode-se observar resultados bem distintos entre os pesquisadores, sendo os de CAMPIONE e MIRAGLIA (2003) os mais destoantes entre os demais. De forma geral as maiores resistências últimas entre as calculadas, para ambas as resinas, foram as de TOUTANJI (1999).

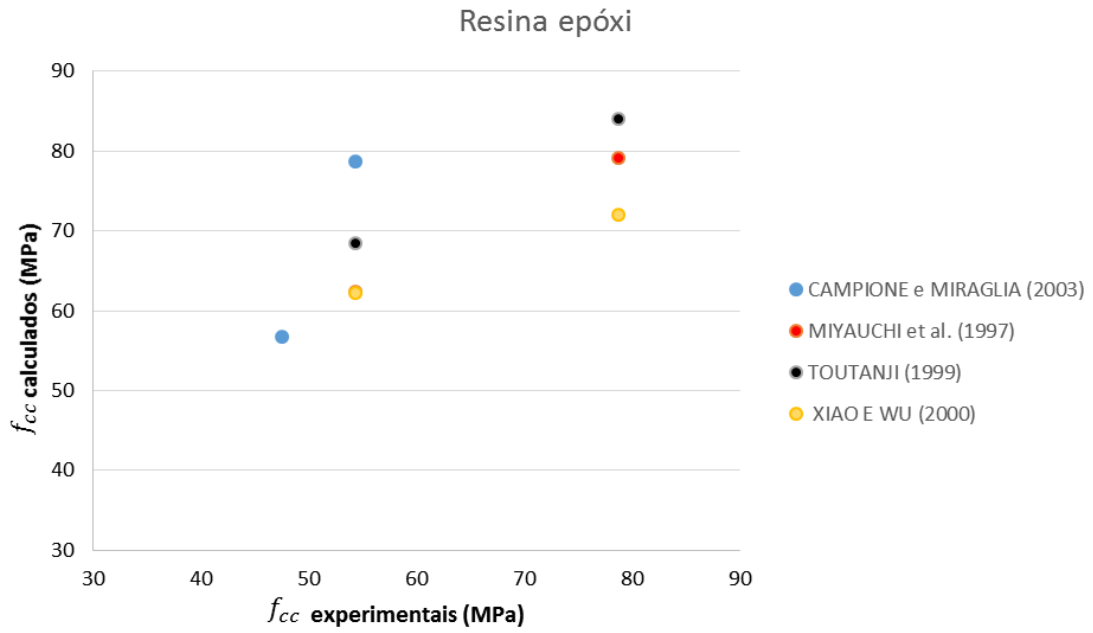


Figura 5.3 – Resistência à compressão do concreto calculadas para resina epóxi segundo pesquisadores e resultados experimentais.

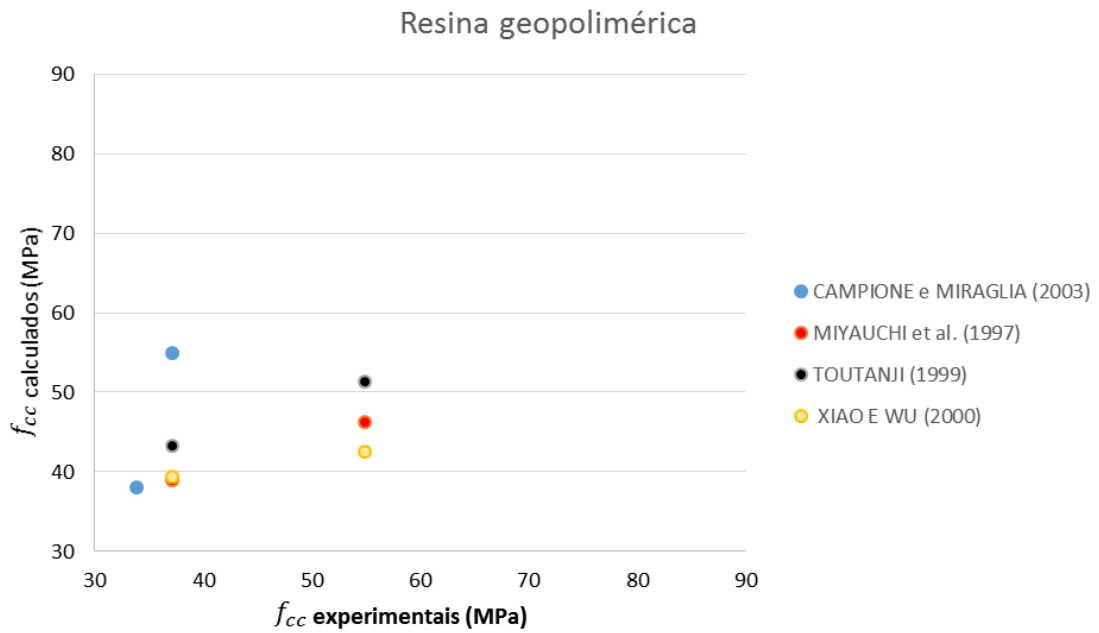


Figura 5.4 - Resistências à compressão do concreto calculadas para resina geopolimérica segundo pesquisadores e ensaios experimentais.

Tabela 5.3 – Resultados da resistência à compressão do concreto confinado experimental e calculada segundo pesquisadores.

Valores obtidos por:	f_{cc} (MPa)			
	RRE1C	RRE2C	RRG1C	RRG2C
Ensaio experimental	54,34	78,75	37,09	54,92
CAMPIONE e MIRAGLIA (2003)	47,50	56,80	33,86	37,99
MIYAUCHI <i>et al.</i> (1997)	62,40	79,10	38,96	46,19
TOUTANJI (1999)	68,45	84,00	43,31	51,38
XIAO e WU (2000)	62,20	72,05	39,45	42,47

Verifica-se que as formulações de CAMPIONE e MIRAGLIA (2003) levaram a valores de resistência à compressão do concreto confinado a favor da segurança, enquanto MIYAUCHI *et al.* (1997) e TOUTANJI (1999) forneceram valores maiores do que os experimentais obtidos neste trabalho e, portanto, contra a segurança.

A formulação de XIAO e WU (2000) conduziu a valores de resistência a favor da segurança apenas para os corpos de prova ensaiados com duas camadas. Para os corpos de prova reforçados com uma camada de compósito, tanto com epóxi como geopolímero, foram obtidas resistências maiores do que as experimentais.

Vale ressaltar que todos os pesquisadores citados forneceram equações para avaliação da resistência última do concreto de pilares de seção circular confinados com compósitos de fibras, com resina epóxi. Essas equações foram utilizadas para os cálculos com a resina geopolimérica, para fins comparativos. Nota-se que são necessárias formulações que se adequem a tal resina e que ainda não existe na literatura.

5.2- Deformação última

A Tabela 5.4 exhibe os valores médios das deformações longitudinal (ε_{co} e ε_{cc} , do concreto não confinado e do concreto confinado, respectivamente) e transversal dos corpos de prova ensaiados (ε_{cot} e ε_{cct} , do concreto não confinado e do concreto confinado, respectivamente).

Tabela 5.4 - Valores médios das deformações longitudinal e transversal dos corpos de prova ensaiados.

Sem reforço		Com reforço								
ϵ_{co} (‰)	ϵ_{cot} (‰)	Tipo de resina	1 camada				2 camadas			
			ϵ_{cc} (‰)	ϵ_{cct} (‰)	$\frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{co}}$	$\frac{\epsilon_{cct}}{\epsilon_{cot}}$	ϵ_{cc} (‰)	ϵ_{cct} (‰)	$\frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{co}}$	$\frac{\epsilon_{cct}}{\epsilon_{cot}}$
2,03	0,18	Epóxi	23,80	2,80	11,72	15,56	34,68	5,93	17,08	32,94
		Geopolimérica	2,19	1,67	1,08	9,28	2,77	0,49	1,36	2,72

Em geral, os corpos de prova de concreto reforçados com fibra de carbono e resina epóxi apresentaram maiores ganhos médios de deformação última em relação ao reforçados com fibra de carbono e resina geopolimérica. Os maiores ganhos foram para a deformação transversal última, sendo de 1.456% para uma camada e 3.194% para os de duas camadas. O mesmo ocorreu para as deformações longitudinais últimas, com ganhos médios de 1.072% para uma camada e 1.608% para duas camadas.

Nos corpos de prova concreto reforçados com fibra de carbono e a resina geopolimérica observou-se, pequena deformação nesse sistema. Isso se deve ao tipo de ruptura apresentado pelos corpos de prova (mostrado posteriormente), onde a fibra não trabalhou até a sua ruptura, ocorrendo ruptura por descolamento no traspasse. A pequena deformação se deve também pelo fato do material em questão ser um material cerâmico e ter pequena deformabilidade. Nesse sistema os maiores ganhos médios também foram para a deformação transversal última, de 828% para uma camada e 172% para duas camadas. Já para a deformação longitudinal última, os ganhos médios foram de 8% e 36%, para uma e duas camadas, respectivamente.

É importante ressaltar que foi observada compatibilidade de deformações entre o substrato de concreto e ambas as resinas, sendo importante para que houvesse uma boa ligação entre estes materiais.

Contudo, após a execução do ensaio, observou-se pequena perturbação na leitura de dados dos extensômetros dos corpos de prova reforçados com resina geopolimérica. No próximo item será abordado este assunto, após a apresentação das curvas tensão *versus* deformação desses corpos de prova.

As deformações longitudinais últimas do concreto confinado, as experimentais obtidas neste trabalho e as calculadas segundo os pesquisadores apresentados do

Capítulo 3 (ver item 3.4.3) são amostradas nas Figuras 5.5 e 5.6 e na Tabela 5.5. A Figura 5.6 apresenta os resultados para a resina geopolimérica; porém, como as deformações longitudinais experimentais são significativamente menores do que as da resina epóxi (Figura 5.5).

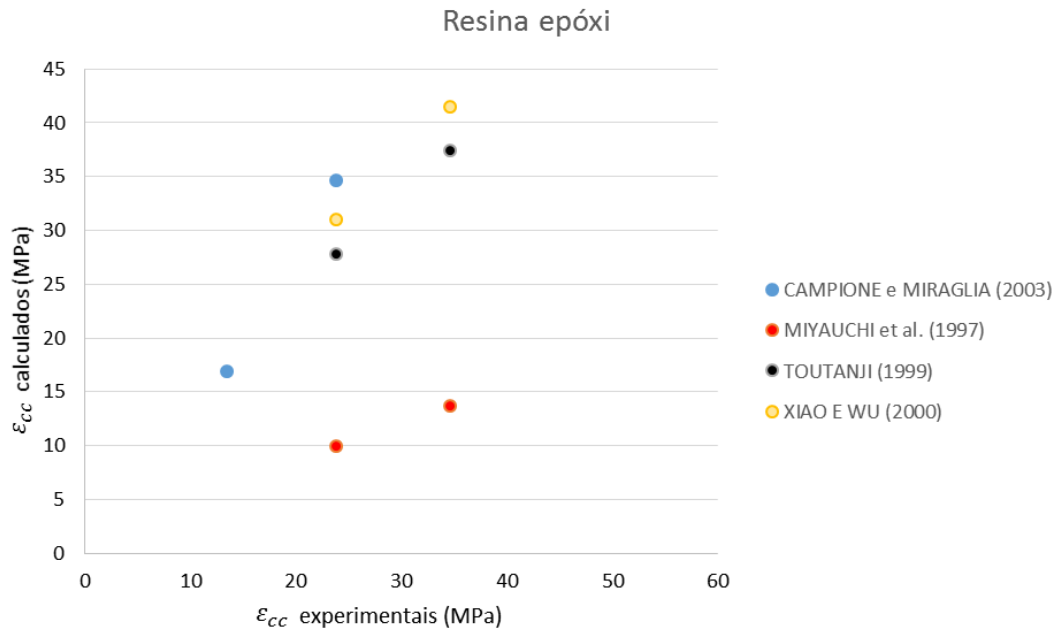


Figura 5.5 – Deformações longitudinais últimas calculadas para resina epóxi segundo a literatura.

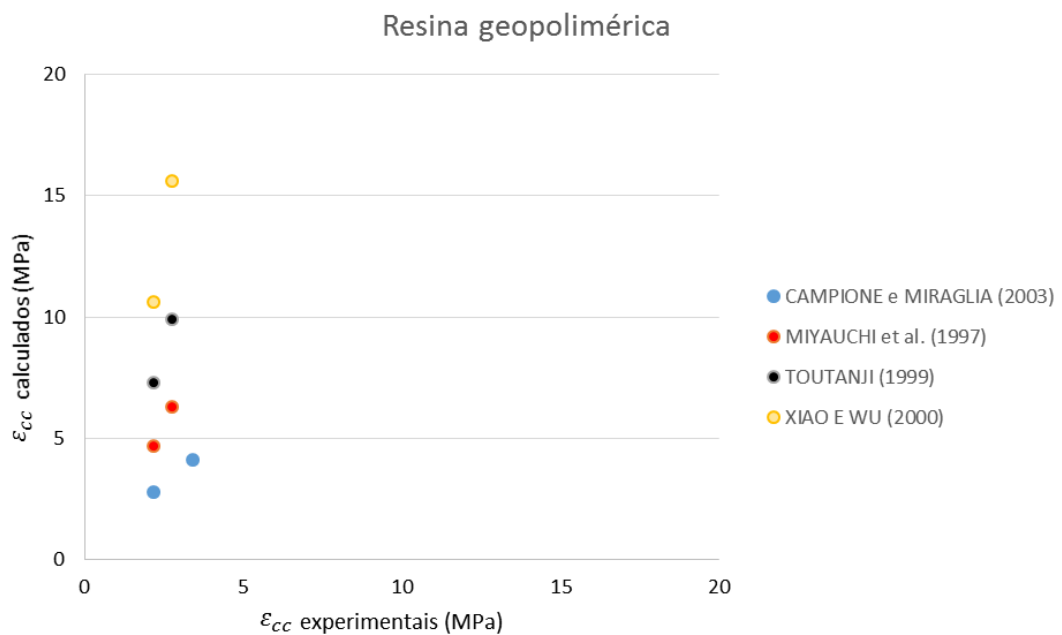


Figura 5.6 – Deformações longitudinais últimas calculadas para resina geopolimérica segundo a literatura.

Para as deformações longitudinais últimas calculadas para resina epóxi, os resultados foram bastante destoantes entre todos os pesquisadores, não ocorrendo nenhuma proporcionalidade entre eles. Já para a resina geopolimérica, apesar da diferença entre os resultados, XIAO e WU (2000) e TOUTANJI (1999) tiveram inclinações próximas, assim como CAMPIONE e MIRAGLIA (2003) e MIYAUCHI *et al.* (1997), sendo este o último o mais destoante entre os demais.

Tabela 5.5 – Resultados de deformação longitudinal última do concreto confinado experimental e calculadas segundo a literatura.

Valores obtidos por:	ϵ_{cc} (‰)			
	RRE1C	RRE2C	RRG1C	RRG2C
Ensaio experimental	23,80	34,68	2,19	2,77
CAMPIONE e MIRAGLIA (2003)	13,52	16,90	3,40	4,1
MIYAUCHI <i>et al.</i> (1997)	9,90	13,70	4,70	6,30
TOUTANJI (1999)	27,8	37,45	7,30	9,90
XIAO e WU (2000)	31,0	41,90	10,60	15,60

Percebe-se que as formulações para os corpos de prova confinados com compósitos de fibras de carbono e resina epóxi de CAMPIONE e MIRAGLIA (2003) e MIYAUCHI *et al.* (1997) conduziram a deformações longitudinais últimas do concreto confinado menores do que as encontradas experimentalmente, e as de XIAO e WU (2000) a valores maiores dos encontrados neste estudo. Já as equações de TOUTANJI (1999) levaram a valores menores para os reforçados com uma camada e maiores para os de duas camadas.

Para os corpos de prova reforçados com compósitos com fibras de carbono e resina geopolimérica, todos apresentam valores superiores aos obtidos neste trabalho, sendo os de XIAO e WU (2000) com a maior diferença. Este fato se explica pela resina geopolimérica possuir propriedades de material cerâmico e ter comportamento distinto ao epóxi, e as equações em questão foram formuladas para resinas à base de epóxi. Porém, observa-se que os resultados encontrados para a resina geopolimérica segundo CAMPIONE e MIRAGLIA (2003) não foram tão destoantes em relação aos resultados experimentais, já que, para os mesmos pesquisadores para resina epóxi, foram obtidos resultados com maior discrepância.

5.3- Curvas tensão *versus* deformação

Nas Figuras 5.7 a 5.9 são mostradas as curvas tensão *versus* deformação do concreto de referência, do reforçado com resina epóxi e do reforçado com resina geopolimérica. Nas Figura 5.8 e 5.9 são mostradas as curvas com uma camada de reforço, duas camadas de reforço e a comparação entre estas e a curva do concreto de referência.

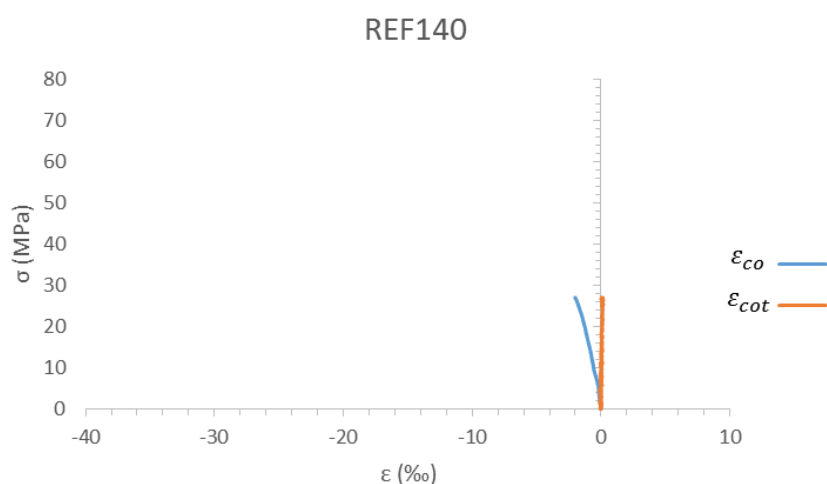


Figura 5.7 – Curva tensão versus deformação do concreto de referência.

Na Figura 5.8, tanto para uma camada quanto para duas camadas de reforço, nota-se que até a resistência do concreto não confinado (concreto de referência), as deformações são semelhantes. Como era de se esperar, com o aumento da resistência à compressão axial, a deformação longitudinal e a deformação transversal também aumentaram, logo, aumentando a região plástica da curva.

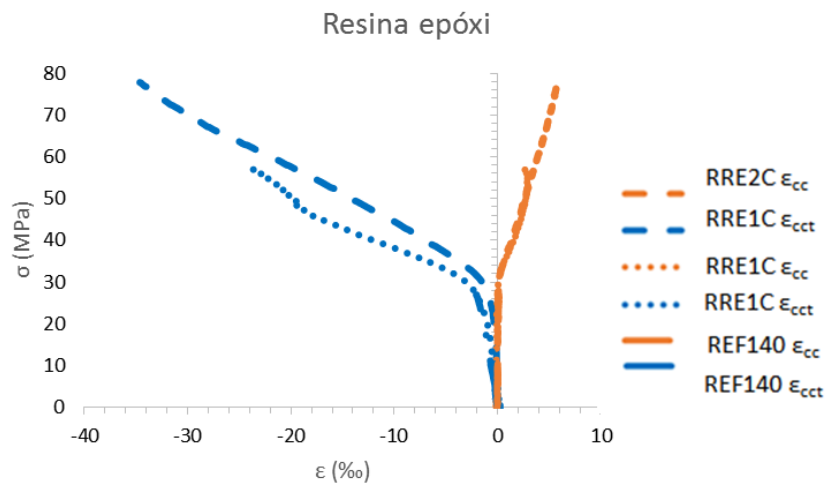
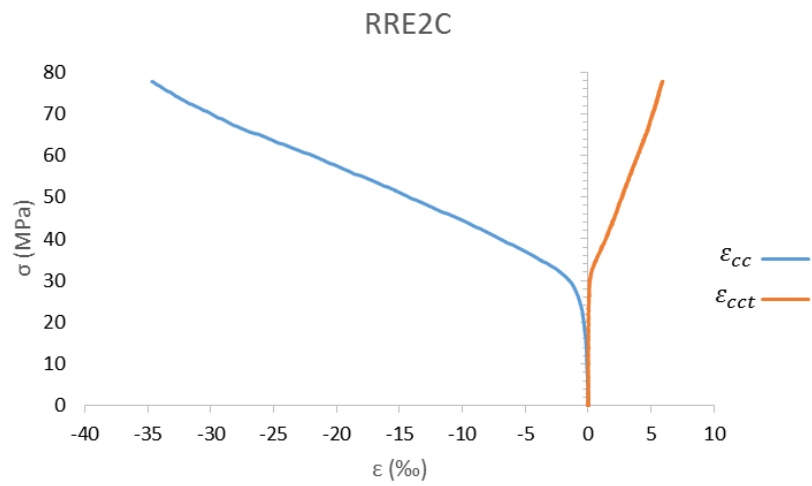
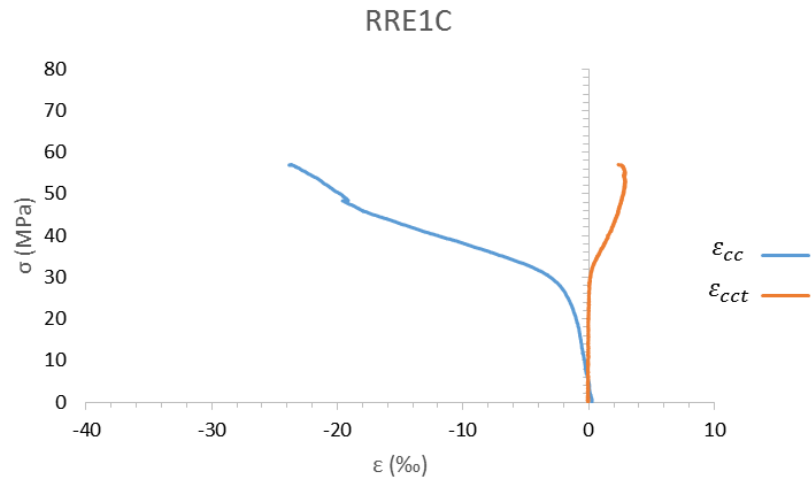


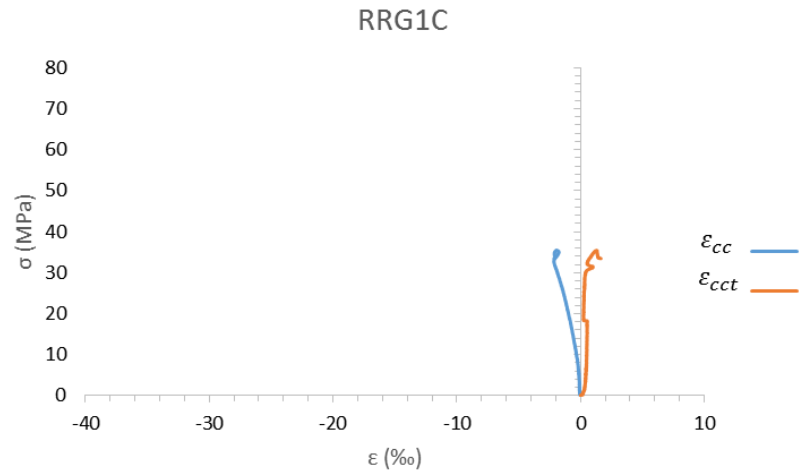
Figura 5.8 – Curvas tensão *versus* deformação dos concretos reforçados com compósito de resina epóxi e fibra de carbono: (a) uma camada; (b) duas camadas; (c) comparação com o concreto de referência.

O mesmo fato não se observou nos corpos de prova reforçados com resina geopolimérica (Figura 5.9). O reforço apenas proporcionou o aumento da resistência à compressão axial. Assim como o concreto, o geopolímero tem propriedades de um material cerâmico, possui pequena deformação e ruptura brusca. Ainda tem o fato da fibra de carbono não ter sido rompida, contribuindo para o tipo de ruptura. Apesar da compatibilidade entre os materiais e a aderência entre eles, existe um pequeno ou nenhum aumento da região plástica até a ruptura. Logo, estes fatores contribuíram para que não houvesse aumento de deformação.

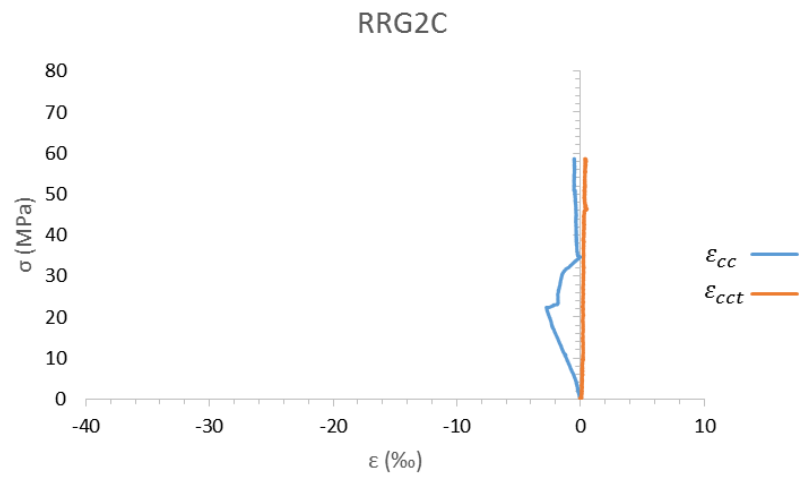
De acordo com as curvas tensão *versus* deformação da Figura 5.9, pode-se constatar uma alteração na leitura do extensômetro utilizado para instrumentação dos corpos de prova reforçado com a resina geopolimérica. É possível que isso seja decorrente do modo de ruptura apresentado, em que ocorreu descolamento do reforço, causando perturbação na leitura.

Comparando as curvas entre os dois sistemas de reforço, constata-se, como dito previamente, que a resistência do concreto confinado (f_{cc}) e as deformações últimas, longitudinal e transversal (ε_{cc} e ε_{cct}), dos corpos de prova confinados com resina epóxi foram superiores aos dos concretos reforçados com resina geopolimérica, e todas, maiores do que as do não confinado. Nos corpos de prova com maiores valores de resistência mecânica, no geral, também apresentaram maiores deformações últimas.

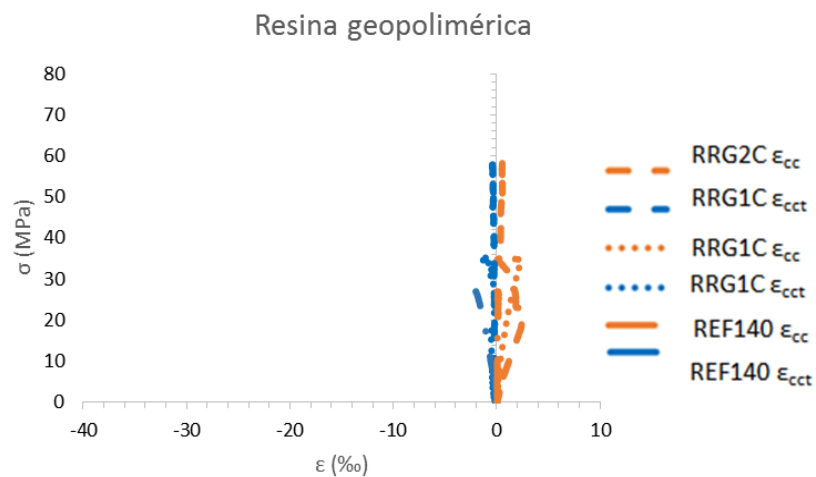
Outro aspecto observado nas curvas tensão *versus* deformação dos concretos confinados foi que todos não apresentaram ramo descendente, sendo esta uma característica do tipo de seção transversal adotado (circular). Com isso, as tensões máximas e últimas foram sempre iguais, independentemente da resina utilizada ou do número de camadas de reforço.



(a) uma camada



(b) duas camadas



(c) curvas com e sem reforço

Figura 5.9 – Curvas tensão *versus* deformação dos concretos reforçados com compósito de resina geopolimérica e fibra de carbono: (a) uma camada; (b) duas camadas; (c) comparação com o concreto de referência.

Nas Figuras 5.10 e 5.11 é possível comparar o sistema de reforço com resina geopolimérica com o concreto de referência e o sistema de reforço com resina epóxi em relação a ambos, de uma e duas camadas de reforço, respectivamente.

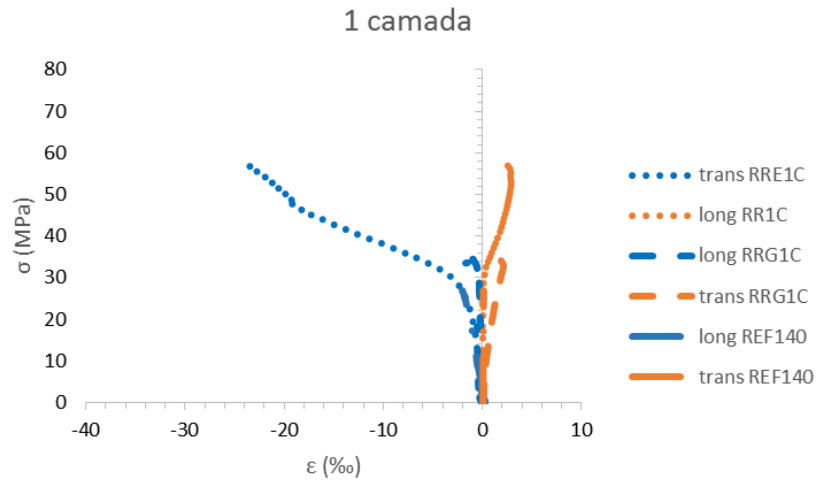


Figura 5.10 – Curvas tensão *versus* deformação do núcleo do concreto confinado com uma camada de reforço.

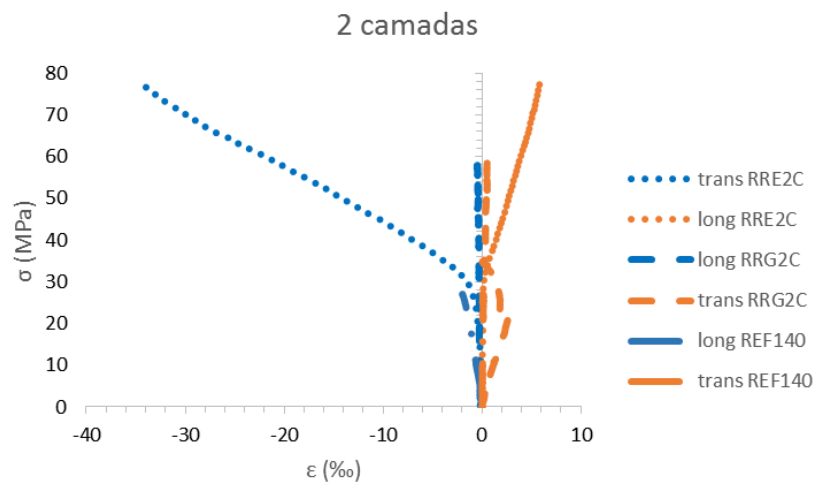
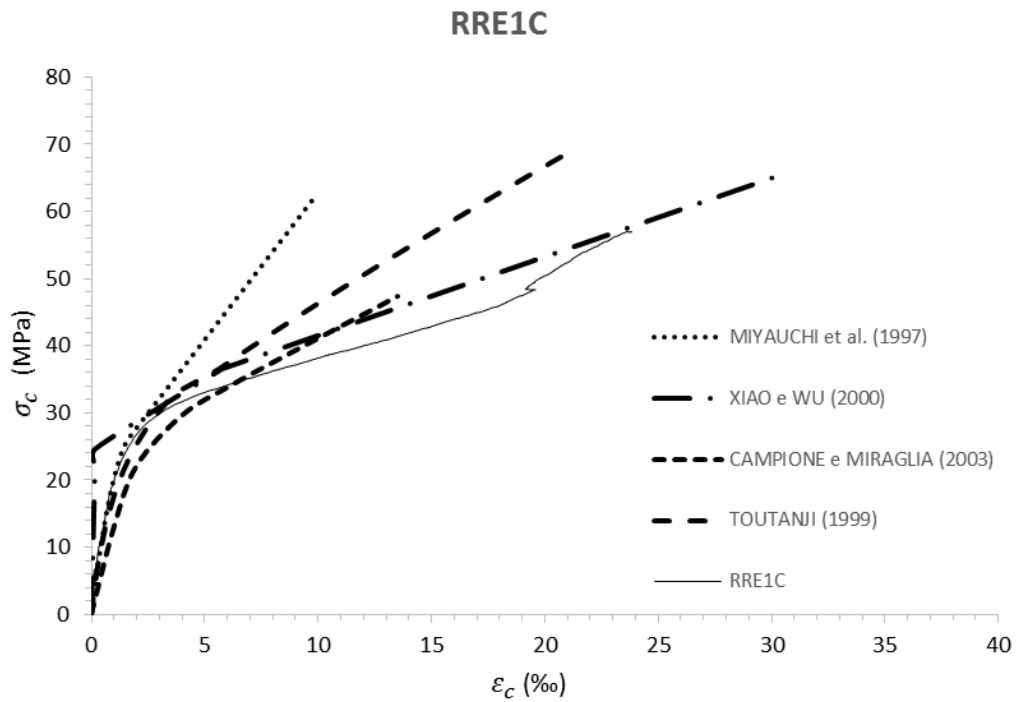
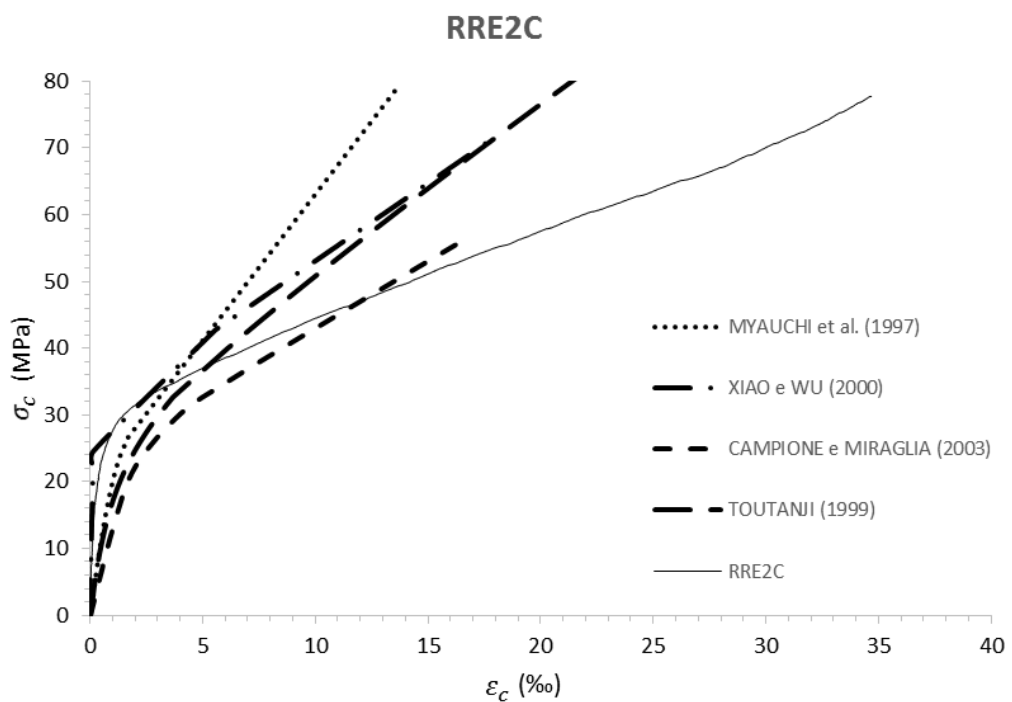


Figura 5.11 – Curvas tensão *versus* deformação do núcleo do concreto confinado com duas camadas de reforço.

As curvas tensão *versus* deformações experimentais obtidas neste trabalho e as calculadas segundo os pesquisadores apresentadas no Capítulo 3 (ver item 3.4.3) são mostradas nas Figuras 5.12 e 5.13.

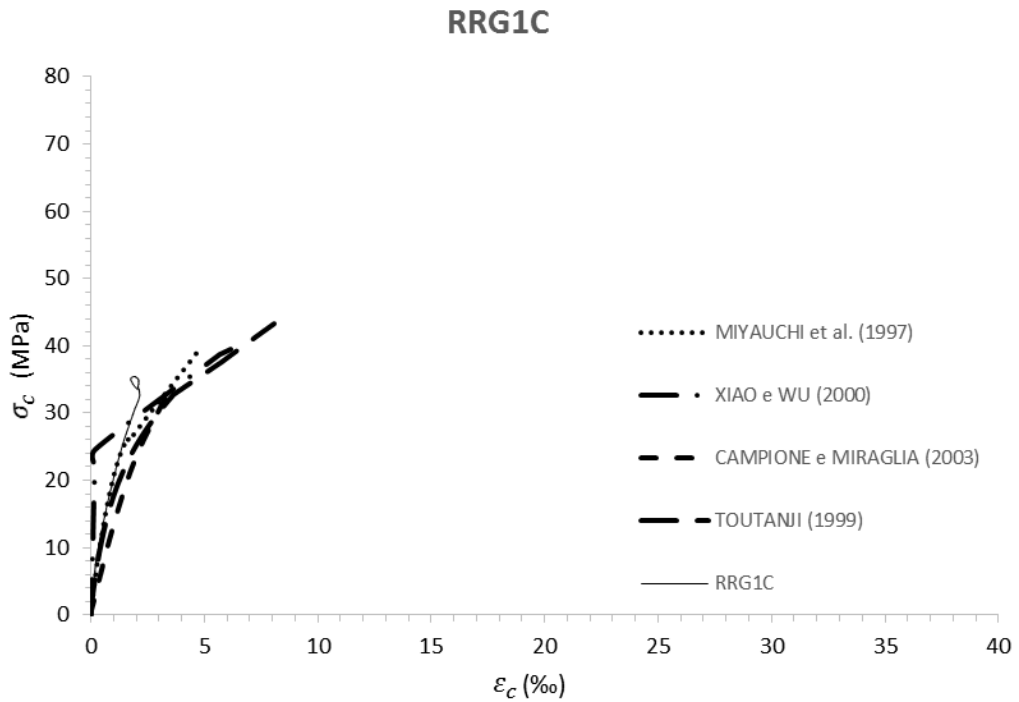


(a) uma camada de reforço

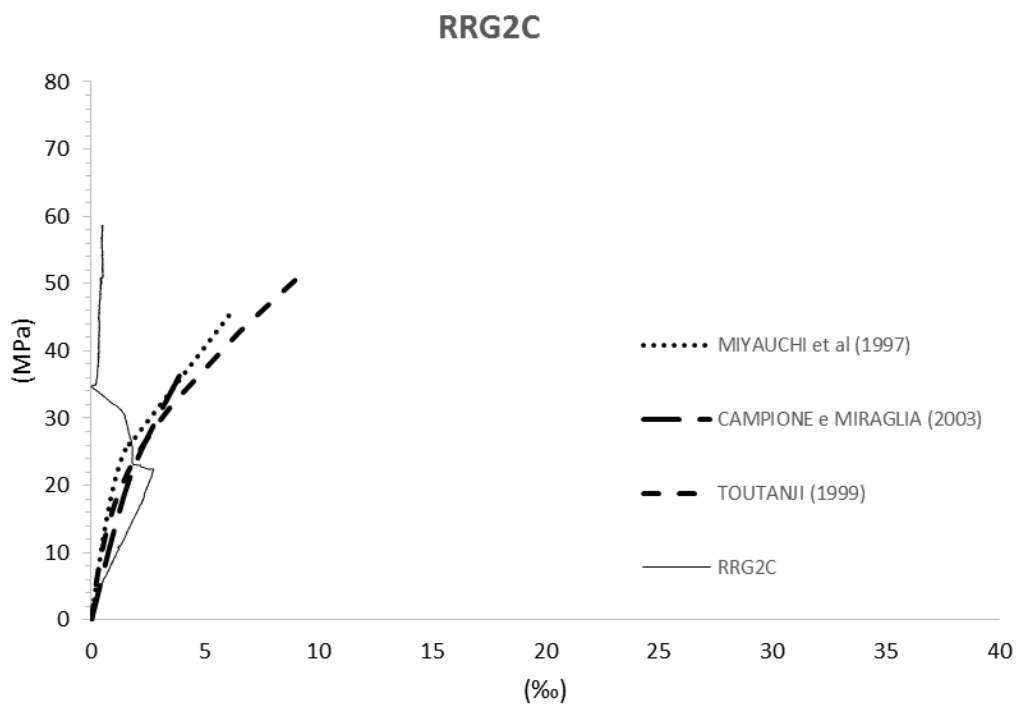


(b) duas camadas de reforço

Figura 5.12 – Curvas tensão *versus* deformação comparando os resultados calculados segundo a literatura e os experimentais para resina epóxi com: (a) uma camada; (b) duas camadas.



(a) uma camada de reforço



(b) duas camadas de reforço

Figura 5.13 – Curvas tensão *versus* deformação comparando os resultados calculados segundo a literatura e os experimentais para resina geopolimérica com: (a) uma camada; (b) duas camadas.

Para melhor análise dos resultados, a escala das curvas foi diminuída até uma tensão de 40 MPa e uma deformação de 3 ‰ (Figura 5.14), de acordo com a Figura 5.14a os pesquisadores MIYAUCHI *et al.* (1997) e TOUTANJI (1999) formularam valores para módulo de elasticidade mais próximo do encontrado experimentalmente. Estes também levaram a curvas com maior deformação plástica do que os demais e, ainda assim, não superior ao RRE1C. Ainda se observou que a proposta de XIAO e WU (2000) levam a um maior limite de proporcionalidade e uma maior inclinação do primeiro ramo da curva, obtendo-se então o maior módulo de elasticidade entre eles.

Já na Figura 5.14b, foi notada uma diminuição da região elástica e maiores módulos de elasticidade em todas as curvas, calculadas e a experimental. De forma inversa, ocorreu um aumento significativo da região plástica em todas as curvas, sendo este aumento maior para a curva de XIAO e WU (2000). Em ambas as curvas, com uma camada e duas camadas, estes pesquisadores foram os que apresentaram o maior limite de proporcionalidade entre os demais.

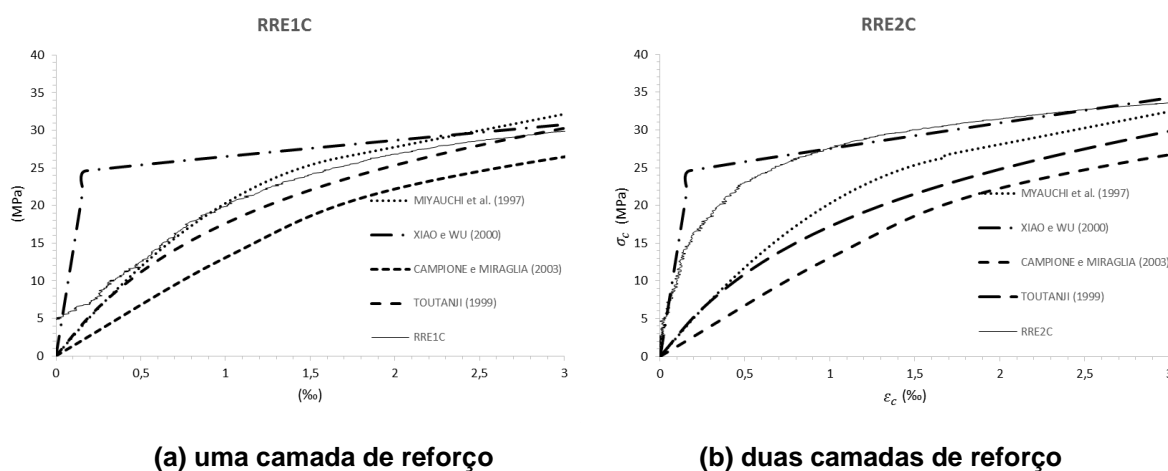


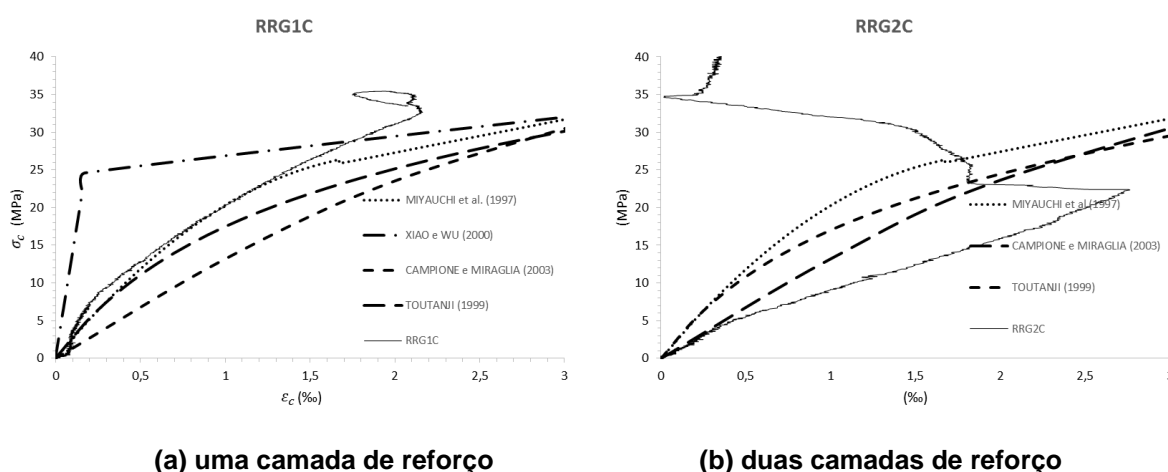
Figura 5.14 – Curvas tensão *versus* deformação ampliada, comparando os resultados calculados segundo a literatura e os experimentais para resina epóxi com: (a) uma camada; (b) duas camadas.

O mesmo foi feito para as curvas dos corpos de prova reforçados com resina geopolimérica. Para os reforçados com uma camada de fibra (Figura 5.15a), nota-se que tanto a região elástica quanto a região plástica são consideravelmente menores em comparação à dos concretos com resina epóxi; apenas a curva da resina geopolimérica com duas camadas de XIAO e WU (2000) apresentou limite de

proporcionalidade parecido com a curva da resina epóxi com duas camadas. Isso ocorre pelo fato do geopolímero ter propriedades de um material cerâmico e apresentar pequenas deformações para elevadas resistências, possuindo ruptura brusca e pequena região plástica. O modo de ruptura também teve influência na configuração da curva.

Para os corpos de prova reforçados com resina geopolimérica e com duas camadas de compósito (Figura 5.15b), as curvas calculadas segundo a literatura, para a mesma quantidade de camadas de reforço, se assemelham às curvas dos concretos reforçados com refina epóxi, porém com menores deformações e tensões. Todas elas apresentaram módulo de elasticidade e limite de proporcionalidade semelhantes. A curva de TOUTANJI (1999) foi a única que apresentou maior região plástica entre as demais. Contudo, não foi possível fazer maiores comparações, pois, como explicado, acredita-se ter ocorrido um descolamento do extensômetro no RRG1C. Até cerca de 23 MPa a curva experimental mostra maior deformação elástica entre as demais para mesma tensão.

Ainda na curva tensão *versus* deformação do RRG2C (Figura 5.15b), não é mostrada a curva segundo XIAO e WU (2000), pois no segundo ramo da curva os valores da resistência mecânica do concreto confinado diminuía à medida que a deformação do concreto confinado aumentava. Isso ocorreu, já que nas equações destes pesquisadores é levada em consideração a espessura do compósito e, para RRG2C, foi maior do que a admitida pela formulação.



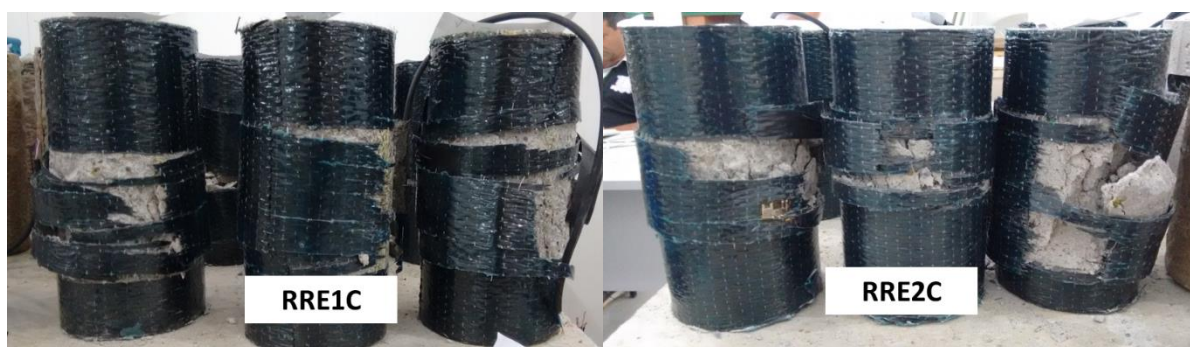
(a) uma camada de reforço **(b) duas camadas de reforço**
Figura 5.15 – Curvas tensão *versus* deformação ampliada, comparando os resultados calculados segundo a literatura e os experimentais para resina geopolimérica com: (a) uma camada; (b) duas camadas.

5.4- Modo de ruptura

As Figuras 5.16 a 5.18 mostram os corpos de prova após o ensaio de compressão axial. Nelas é possível observar o modo de ruptura do sistema de reforço aplicado.



Figura 5.16 – Aspecto pós ruptura do concreto de referência.



(a) uma camada de reforço

(b) duas camadas de reforço

Figura 5.17 – Aspecto pós ruptura do concreto confinado com resina epóxi e fibra de carbono:

(a) uma camada; (b) duas camadas.



(a) uma camada de reforço

(b) duas camadas de reforço

Figura 5.18 – Aspecto pós ruptura do concreto confinado com resina geopolimérica e fibra de carbono:

(a) uma camada; (b) duas camadas.

Como pode ser observado, o grupo reforçado com resina epóxi (RRE), de uma (RRE1C) e duas (RRE2C) camadas, apresentaram ruptura correspondente à ruptura típica de concretos confinados com o sistema usado, ou seja, ruptura de forma brusca do compósito. A Figura 5.19 apresenta o detalhe desse modo de ruptura.



(a) uma camada de reforço



(b) duas camadas de reforço

Figura 5.19 – Detalhe da ruptura do (a) RRE1C e (b) RRE2C.

Para os concretos reforçados com resina geopolimérica (RRG), com uma (RRG1C) e duas (RRG2C) camadas, observou-se modo de ruptura diferente do habitual (Figura 5.20). Todos os seis corpos de prova tiveram ruptura no local do traspasse da fibra, não havendo ruptura da fibra como ocorreu nos compósitos com resina epóxi. Este tipo de ruptura contribuiu para os baixos ganhos de resistência após aplicação do reforço, bem como para as pequenas deformações do sistema até a ruptura.



(a) uma camada de reforço



(b) duas camadas de reforço

Figura 5.20 - Detalhe da ruptura do (a) RRG1C e (b) RRG2C.

Esse tipo de ruptura foi atribuído, principalmente, a:

- viscosidade elevada da resina

A resina produzida deveria apresentar viscosidade que fosse fluida o suficiente para penetrar entre as fibras da manta, mas que não escorresse à medida que fosse aplicada. Porém, a viscosidade escolhida não foi a ideal, devido ao alto teor de carga mineral; sendo assim, a resina não conseguiu penetrar nas fibras e impregná-las de maneira eficiente e proporcionar uma boa aderência fibra/resina e resina/concreto.

- metodologia de execução

A metodologia utilizada na execução do reforço foi ineficiente, uma vez que se verificou a necessidade da aplicação de mais uma fina camada de resina na superfície da fibra a ser colado o traspasse, para melhor impregnação e boa aderência entre fibra/resina/fibra. Outro fator foi a força aplicada na execução do reforço e o material usado, sendo insuficiente para boa impregnação do sistema.

Em função dos fatores expostos, optou-se pela realização de mais um sistema de reforço com nova composição e nova metodologia de execução. Para isso foram confeccionados mais corpos de prova de concreto (8 no total), com a mesma composição do concreto realizado anteriormente, com as mesmas condições de cura e dimensões (ver item 4.1). Os corpos de prova foram divididos de maneira que:

- 2 corpos de prova de referência;
- 2 corpos de prova reforçados com mesma composição e nova metodologia;
- 2 corpos de prova reforçados com nova composição e antiga metodologia;
- 2 corpos de prova reforçados com nova composição e nova metodologia;

Logo, foi confeccionada uma nova composição para a resina geopolimérica, já testada anteriormente, mas descartado devido a sua elevada fluidez (menor viscosidade), sendo este 1:1,0:0,36. Na nova composição foi reduzida a quantidade de carga mineral, contendo mais matriz e sendo menos inerte. Foram confeccionados três corpos de prova de 50 mm por 100 mm para verificação de sua resistência à compressão aos 21 dias e três corpos de prova do compósito para realização do ensaio de resistência à tração direta. As novas razões molares dos reagentes e os resultados dos ensaios para o novo traço encontram-se nas Tabelas 5.6 e 5.7.

Tabela 5.6 – Razões molares das matérias primas da resina geopolimérica.

Componente	Número de moles
SiO_2	3,320
Al_2O_3	1,040
K_2O	1,208
Na_2O	0,679
CaO	1,640
Razões molares	
$\frac{SiO_2}{Al_2O_3} = 3,19$	
$\frac{SiO_2}{K_2O + Na_2O + CaO} = 0,94$	
$\frac{Al_2O_3}{K_2O + Na_2O + CaO} = 0,29$	
$\frac{K_2O + Na_2O}{CaO} = 1,15$	

Tabela 5.7 – Resultados dos ensaios realizados para a nova composição da resina geopolimérica.

Traço 1: 1,0: 0,36	
Resistência à compressão axial aos 21 dias da resina (MPa)	25,7
Resistência à tração direta do compósito (MPa)	145,76

Em comparação com a composição antiga da resina geopolimérica, ambas tiveram resistência à compressão axial aos 21 dias parecidos, sendo de 25,3 MPa para a composição 1: 1,2: 0,36 e, 25,7 para a nova composição. Já a resistência à tração direta do compósito da nova composição foi maior 20% que a composição antiga, sendo 121,58 para a composição antiga e 145,76 para a nova composição. O corpo de prova do compósito para o ensaio de tração direta possuía menor espessura do compósito, além de ter impregnado melhor as fibras.

A metodologia utilizada desta vez consistiu em corrigir as deficiências encontradas na metodologia anterior. Além de alterar o tempo de sobreposição da camada de proteção das fibras, foram mudados o instrumento e a força de aplicação.

Como pode-se observar na Figura 5.21, utilizou-se uma espátula para aplicação da resina nas fibras e, posteriormente, um rolo para ajudar na impregnação. Nessa etapa, a força aplicada no rolo para impregnação das fibras foi superior a anterior. Em seguida a camada de fibra foi colada ao substrato de concreto e então novamente passado o rolo, para garantir boa aderência e alinhamento das fibras.

No local do traspasse (fibra–resina–fibra), foi aplicada mais um pouco da resina na face da fibra ainda limpa, para melhorar a aderência na ligação fibra-fibra. Outro aspecto alterado foi que, imediatamente após a colagem da fibra, aplicou-se a camada protetora do sistema com a mesma resina produzida.

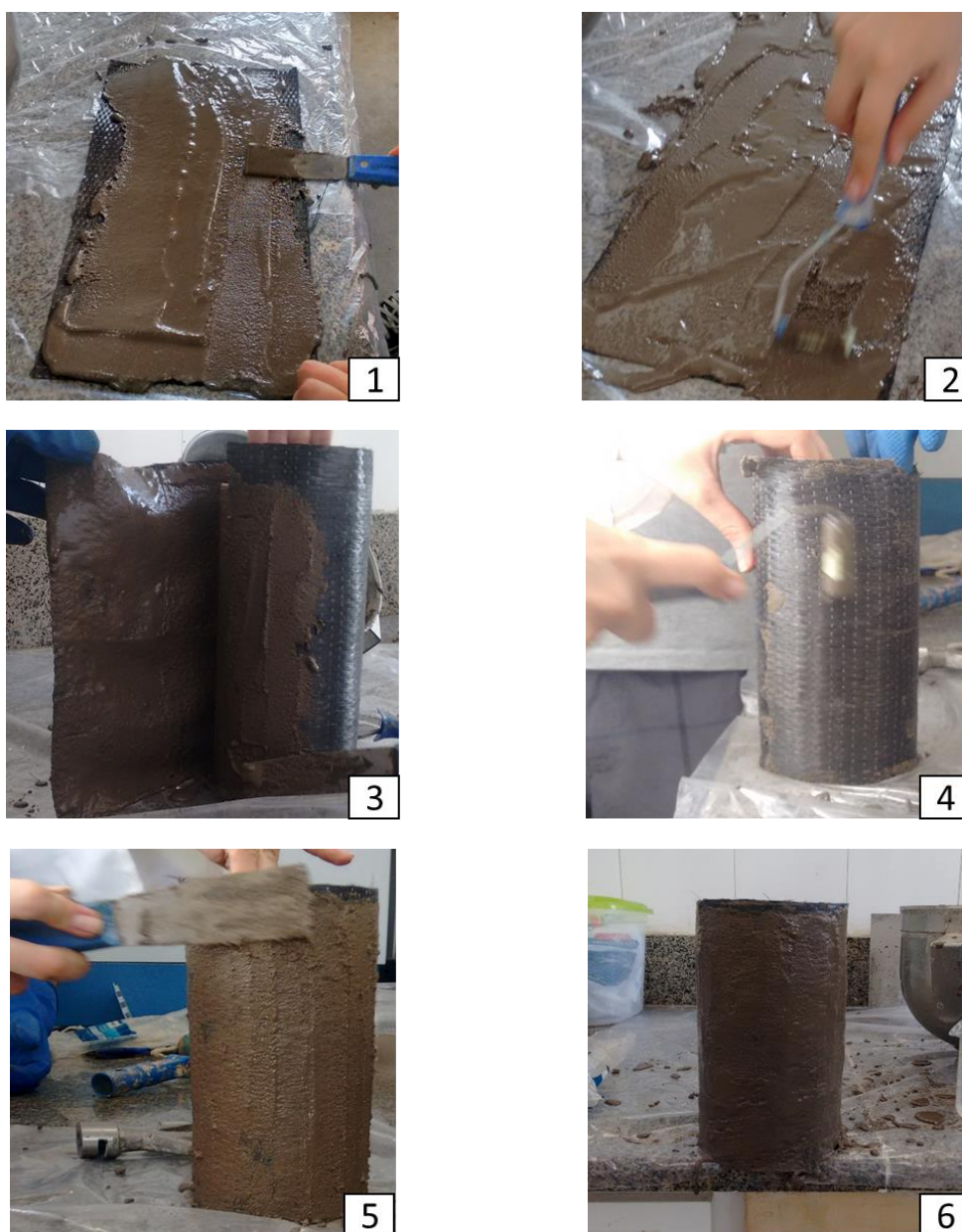


Figura 5.21 – Passos da execução da nova metodologia.

Nestes novos corpos de prova confinados foi realizado ensaio de compressão axial. A nomenclatura adotada e os resultados obtidos encontram-se na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Valores médios de resistência à compressão axial do núcleo de concreto dos novos corpos de prova ensaiados.

Sem reforço	Com reforço		
f_{co} (MPa)	Parâmetro	1 camada	
		f_{cc} (MPa)	$\frac{f_{cc}}{f_{co}}$
20,50	RRG1C-1.2N	30,71	1,50
	RRG1C-1.0A	31,43	1,53
	RRG1C-1.0N	32,33	1,58
*Onde: 1.2 e 1.0 se referem ao traço utilizado e A e N faz referência à antiga ou nova metodologia.			

Com base nos resultados obtidos, analisando a nova metodologia, verificou-se que para o RRG1C-1.2N os ganhos médios de resistência à compressão axial, em relação ao f_{co} de 20,50 MPa, foram de 50%, enquanto para o RRG1C-1.0N, 58%. Logo, a nova composição mostrou ser mais eficiente do que a antiga e, através de análise visual, notou-se que as fibras estavam melhor impregnadas.

Fazendo uma comparação entre as metodologias de aplicação com a nova composição (1:1,0:0,36), enquanto o RRG1C-1.0A obteve ganhos médios de resistência à compressão axial em relação ao concreto de referência de 53%, o RRG1C-1.0N aumentou em 58%. Portanto, a nova metodologia também mostrou ser mais eficiente do que a anterior, também impregnando melhor as fibras.

Já para a composição de resina geopolimérica de 1:1,2:0,36, houve uma diferença maior entre as metodologias aplicadas. Na antiga metodologia os ganhos médios de resistência à compressão axial para a resina geopolimérica com uma camada de reforço (RRG1C) foi de 35% (em relação ao f_{co} de 27,05 MPa) enquanto para a nova metodologia foi de 50% (em relação ao f_{co} de 20,50 MPa). Na Figura 5.22 são mostradas os aspectos pós-ruptura de ambos os corpos de prova de concreto.



Figura 5.22 – Aspecto pós ruptura do RRG1C e RRG1C-1.2A.

Na Figura 5.23 é possível visualizar o modo de ruptura dos novos corpos de provas ensaiados.

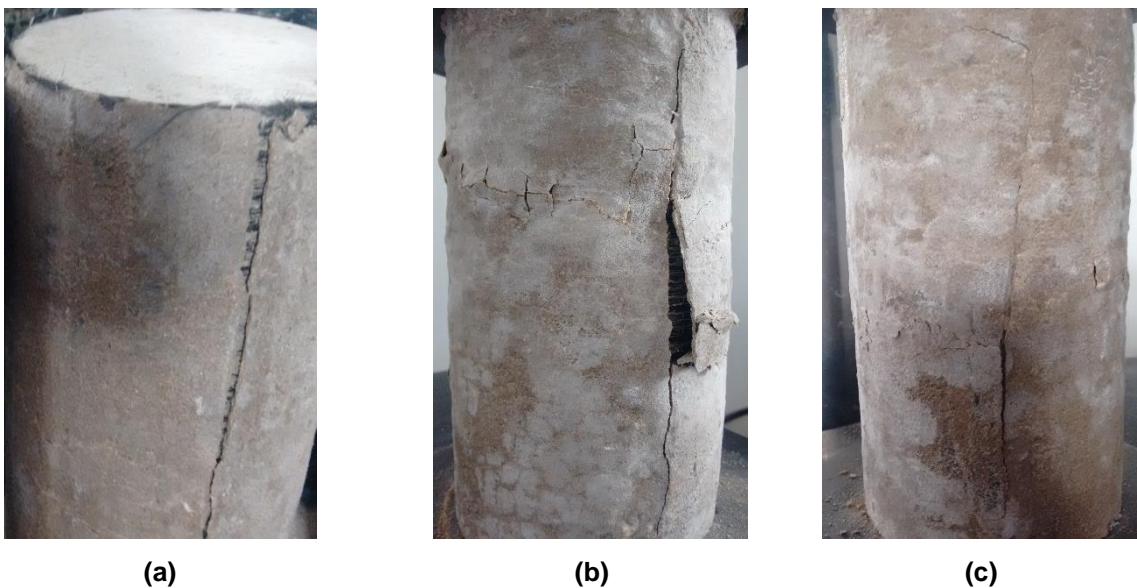


Figura 5.23 – Aspecto pós ruptura do concreto confinado com resina geopolimérica e uma camada fibra de carbono: (a) RRG1C-1.2N; (b) RRG1C-1.0A; (c) RRG1C-1.0N.

Nessa aplicação o volume de resina usado para impregnação e colagem das fibras foi menor do que o usado anteriormente (antiga metodologia), ainda assim sendo superior ao usado no reforço com a resina epóxi. Contudo, este é um fator importante para preservar as características do compósito e que pode ter influenciado resultados obtidos.

Um fator importante que também deve ser ressaltado é a resistência à compressão axial e à tração indireta de ambas as resinas utilizadas. A resina

geopolimérica possuía 25,3 MPa e 2,5 MPa, de resistência à compressão axial e resistência à tração indireta, respectivamente, enquanto a resina epóxi Viapol Carbon Saturante, 77,4 MPa e 21,2 MPa muito superior aos da resina geopolimérica. No reforço utilizado, a resina é mais solicitada à tração e, a resina geopolimérica, por ser um material cerâmico, possui menor resistência à tração que a da resina epóxi, sendo 848% inferior à resina epóxi utilizada neste trabalho.

O modo de ruptura foi por cisalhamento-tensão de aderência e, de acordo com o estudo realizado por LEUNG e YANG (2002) *apud* Pacheco (2006), os autores chegaram à conclusão que a tensão cisalhante efetiva dentro da região colada é uma função do atrito entre as interfaces, da resistência entre essas, do módulo de cisalhamento e da espessura do adesivo. Eles modelaram um processo de descolamento em função da propagação de fissuras ao longo da interface do compósito reforçado com fibras-concreto, admitindo uma tensão de cisalhamento atuando nas fissuras. Antes de ocorrer o descolamento entre as superfícies, os autores afirmam que a deformação cisalhante é resultado da deformação do adesivo e do deslocamento relativo entre as duas superfícies, ou da área descolada.

Outro aspecto que também pode ter causado interferência nos resultados foi a carga mineral utilizada na resina, a areia. A areia teve grande influência na viscosidade da resina. Sendo assim, são necessários outros estudos que possibilitem a pesquisa de composição de resinas com diferentes cargas minerais e com menor viscosidade.

Capítulo 6 - Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

O programa experimental permitiu verificar a eficiência do uso de resinas geopoliméricas na colagem de fibras de carbono em pilares de concreto simples e outros parâmetros, como a metodologia de aplicação do CRFC, a viscosidade e a resistência à compressão axial e à tração indireta das resinas utilizadas, que influenciaram os resultados do reforço.

Os resultados obtidos no programa experimental permitiram chegar as seguintes conclusões:

- os corpos de prova reforçados com resina epóxi obtiveram maiores ganhos médios de resistência à compressão axial e deformação última em relação aos corpos de prova reforçados com resina geopolimérica;
- os corpos de prova reforçados com resina geopolimérica aumentaram a resistência do sistema em 37% e 103%, enquanto os com resina epóxi, 101% e 191%, para 1 e 2 camadas de reforço, respectivamente;
- os maiores ganhos médios foram para a deformação transversal última os corpos de prova com resina epóxi apresentaram ganho médio 1.456%, para uma camada, e 3.194%, para os de duas camadas. O mesmo ocorreu para as deformações longitudinais últimas, com ganhos médios de 1.072%, para uma camada, e 1.608%, para duas camadas;
- nos corpos de prova com resina geopolimérica, os maiores ganhos médios também foram para a deformação transversal última, de 828% e 172% para uma e duas camadas, respectivamente. Já para a deformação longitudinal última, os ganhos médios foram de 8% e 36%, para uma e duas camadas, respectivamente;
- a metodologia de aplicação do reforço, quando realizada de maneira incorreta e ineficiente, exerceu influência na resistência última do concreto confinado;
- o modo de ruptura influenciou os resultados finais obtidos;
- a quantidade de carga mineral usada na confecção das resinas geopoliméricas alterou suas propriedades, especialmente sua viscosidade;
- a escolha da viscosidade das resinas interferiu na impregnação das fibras;
- a viscosidade também altera a espessura final do compósito, o que influenciou a eficiência do reforço;

- notou-se que a resina geopolimérica, por ter propriedades de um material cerâmico, apresenta pequenos acréscimos de deformação no sistema;
- a resistência mecânica das resinas possui influência direta nas propriedades dos compósitos;
- as resinas geopoliméricas foram eficientes em termos de resistência, embora suas resistências à compressão axial e à tração indireta tivessem sido inferiores às da resina epóxi, permitiram ganhos de resistência consideráveis;
- por meio do modo de ruptura do sistema, na junção fibra-fibra, a ligação mostrou ser fraca com resina geopolimérica, rompendo por cisalhamento e necessitando de mais ensaios para se chegar a conclusões mais precisas;
- o número de camadas de reforço mostrou ter influência na resistência do concreto, quanto maior o seu valor, mais resistente o concreto com ambas as resinas utilizadas;
- foi comprovada a eficácia da resina geopolimérica no reforço de pilares de concreto, em função da boa aderência da resina entre o substrato de concreto e o compósito reforçado com fibras de carbono.

Como sugestões para trabalhos futuros, com intuito de se esclarecer aspectos pendentes, sugerem-se:

- a investigação de novas composições para a resina geopolimérica;
- utilização de microfibras como carga mineral das resinas, por exemplo, wollastonita, para melhorar a viscosidade e a deformação do sistema;
- confecção de resinas geopoliméricas que se equiparem à resistência à compressão da resina epóxi;
- realização de ensaios com pilares de concreto armado;
- realização de ensaios para elaboração de uma formulação adequada e melhor entendimento do sistema;
- substituição da fibra de carbono no compósito, como exemplo, fibras de vidro, de basalto e de aramida.

Referências Bibliográficas

1. ARAÚJO, C. M. (2002) - Reforço de vigas de concreto à flexão e ao cisalhamento com tecido de fibras de carbono. Tese de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
2. ARQUEZ, A. P. (2010) – Aplicação de laminado de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) inserido em substrato de microconcreto com fibras de aço para reforço à flexão de vigas de concreto armado. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Concreto – Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone. NBR NM 67, Rio de Janeiro, 1998
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Concreto – Procedimentos para moldagem e cura de corpos-de-prova. NBR 5738, Rio de Janeiro, 2015.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado. NBR 6118, Rio de Janeiro, 2014.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS Concreto e argamassa- Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndrico. NBR 7222, Rio de Janeiro, 2011.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS Concreto- Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. NBR 5739, Rio de Janeiro, 2007.
8. ASTM D 3039 / D 3039 M, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. Annual Book of ASTM Standards American Society of Testing Materials, West Conshohocken, 2000.

9. BALAGURU, P.; FODEN, A. J.; DAVIDOVITS, J.; DAVIDOVICS, M.; LYON, R. E. (1999a) - Properties of Geopolymer Matrix-Carbon Fiber Composites. Second International Conference. France.
10. BALAGURU, P.; KURZ, S.; LYON, R.; DAVIDOVITS, J. (1999b) - Geopolymer Composites Layers for Strengthening Concrete Structures. Second International Conference. France.
11. BALANÇO MINERAL BRASILEIRO, Disponível em <<http://www.dnpm.gov.br/>>.
12. BARBOSA, P. E. (2007) – Contribuição à Inspeção, Diagnóstico e procedimento de reabilitação de poste de concreto armado centrifugado utilizado em telefonia celular. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo.
13. BARROS, S.; SOUZA, J. R.; GOMES K. C.; SAMPAIO, E. M.; BARBOSA, N. P.; TORRES, S. M. (2012) - Adhesion of geopolymer bonded joints considering surface treatments. *The Journal of Adhesion*, v. 88: p. 4-6.
14. BEBER, A. J. (2003) - Comportamento Estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
15. CALLISTER, W. D. (1997) – Materials Science and Engineering: an introduction. New York.
16. CAMPIONE, G., MIRAGLIA, N., (2003) - Strength and Strain Capacities of Concrete Compression Members Reinforced with FRP. *Cement and Concrete Composites*, v. 25, n. 1: p. 31-41.

17. CARNEIRO, L. A. V. (2004) - Reforço de vigas e pilares de concreto com materiais compósitos de resinas e fibras. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
18. CARRAZEDO, R. (2002) - Mecanismos de Confinamento e suas implicações no reforço de pilares de concreto por encamisamento com compósitos de fibras de carbono. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos.
19. CHENG, T.; UENG, T. H.; K, M. (2012) - The heavy metal adsorption characteristics on metakaolin-based geopolymer. Article in Applied Clay Science, 56: p. 90-96.
20. CUIABANO, J. L. (2002) - Influência da temperatura no cimento geopolimérico. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.
21. DAVIDOVITS, J. (1988b) – Geopolymer Chemistry and Properties. First European Conference on Soft Mineralogy. Compiègne, France.
22. DAVIDOVITS, J. (1991) – Geopolymer: Inorganic Polymer New Materials. *Journal Thermal Analysis*, Vol. 37.
23. DAVIDOVITS, J. (1994) – Properties of Geopolymer Cements. Proceedings. First International Conference on Alkali Cements and Concretes. Kiev, Ukraine.
24. DAVIDOVITS, J. (1988a) – Soft Mineralogy and Geopolymers. First European Conference on Soft Mineralogy. Compiègne, France.
25. DAVIDOVITS, J., DAVIDOVICS, M. (1988) – Composite Materials with Geopolymer Matrix. First European Conference on Soft Mineralogy. Compiègne, France.

- 26.DAVIDOVITS, J., SAWYER, J. L. (1995) – Early High-Strength Mineral Them. US Patent 4,509,985.
- 27.DIAS, D. P. (2001) - Cimentos geopoliméricos: estudo de agentes químicos agressivos, aderência e tenacidade à fratura. Tese de doutorado. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.
- 28.DIOGO, T. C. A. (2010) - Estudo Experimental do Reforço à Força Cortante de Corpos-de-prova de Concreto com Compósitos de Fibras de Carbono. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- 29.DUXSON, P.; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; DEVENTER, J. S. J. (2005) - Structural ordering in geopolymers derived from metakaolin. World Congress Geopolymer. France.
- 30.FERREIRA, D. (2007) - Confinamento de Elementos de Pilar de Betão de Secção Circular com Manta de CFRP – Investigação Experimental e Analítica. Tese de Doutorado. Universidade do Minho, Portugal.
- 31.FRANÇA, F. C. C. (2015) - Graute geopolimérico para reparo de vigas de concreto armado. Projeto de Tese de Doutorado. Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro.
- 32.GEO-POL, Cimento Geopolimérico. Disponível em <<http://www.geopolymer.com.br>>.
- 33.GEOPOLYMER INSTITUTE. Disponível em <<http://www.geopolymer.org>>.

- 34.GIBSON, R. F. (1994) – Principles of composite material mechanics. Department of Mechanical Engineering Wayne State University Detroit, Michigan.
- 35.GRAZIANO, F. P. (2005) - Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Armado. São Paulo, Editora O Nome Da Rosa.
- 36.GUADES, E. J. (2016) - Experimental investigation of the compressive and tensile strengths of geopolymers: The effect of sand/fly ash (S/FA) ratio. *Construction and Building Materials* n. 127: p. 484–493.
- 37.HARDJITO, D.; WALLAH, S. E.; SUMAJOUW, D. M. J.; RANGAN, B. V. (2004) - FACTORS INFLUENCING THE COMPRESSIVE STRENGTH OF FLY ASH-BASED GEOPOLYMER CONCRETE. *Civil Engineering Dimension*, Vol. 6, No. 2: p. 88–93.
- 38.HOLLAWAY, L.C. (2010) - A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties. University of Surrey, Guildford, Surrey, UK.
- 39.HUNG, T. D.; LOUDA, P.; KROISOVÁ, D.; BORTNOVSKY, O.; XIEM, N. T. (2011) – New Generation of Geopolymer Composite for Fire-Resistance. *Advances in Composite Materials - Analysis of Natural and Man-Made Materials*, Dr Pavla Tesinova (Ed.), ISBN: 978-953-307-449-8, InTech.
- 40.JUNAID, M. T., KAYALI, O., KHENNANE, A. (2016) - Response of alkali activated low calcium fly-ash based geopolymer concrete under compressive load at elevated temperatures. *Materials and Structures*: p. 10-10.

41. JUVANDES, L. (1999) - Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão Usando Materiais Compósitos de “CFRP”. Tese de Doutoramento. Universidade do Porto, Porto, Portugal.
42. JUVANDES, L. F. P.; MARQUES, A. T.; FIGUEIRAS, J. A. (1996) - Materiais compósitos no reforço de estruturas de betão. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
43. MACHADO, A. P. (2011) - Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono. São Paulo, Viapol.
44. MACHADO, M. G. (2004)- Estudo Experimental da Ductilidade de Vigas em Concreto Armado Reforçadas à Flexão Utilizando Compósitos com Tecido de Fibras de Carbono. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
45. MATTHYS, S. (2000) - Structural Behaviour and Design of Concrete Members Strengthened with Externally Bonded FRP Reinforcement. Tese de doutoramento. University of Ghent, Ghent, Belgium.
46. MAZZA, S. C. (2010) - Estudo das propriedades mecânicas e da aderência entre argamassa de reparo geopolimérica e substrato de concreto com cimento Portland. Dissertação de mestrado. Universidade Federal da Bahia, Bahia.
47. MEHTA, P., MONTEIRO, P. (1994) - Introdução ao Concreto. Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais. São Paulo, Brasil, Editora PINI.
48. MELO, A. A. (2015) - Projeto de pilares de concreto armado de seção transversal circular reforçados com materiais compósitos de resina e fibra de

- vidro. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- 49.MELO, L. G. A. (2011) – Síntese e caracterização de geopolímeros contendo filitos. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- 50.MIYAUCHI, K., NISHIBAYASHI, S., INOUE, S. (1997) - Estimation of Strengthening Effects with Carbon Fiber Sheet for Concrete Column, Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. *Proceedings of the Third International Symposium*, v. 1: pp. 217-224.
- 51.MURTA, F. L. (2008) – Produção de argamassas a partir da ativação alcalina de metacaulim de resíduos de tijolo moído por cales virgem e hidratada. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro.
- 52.NATH, P.; SARKER, P. K. (2017) - Fracture properties of GGBFS-blended fly ash geopolymer concrete cured in ambient temperature. *Materials and Structures*, n. 50: p. 32.
- 53.ORTIZ, J. L. R.; DIAZ, J. M. B. (1975) – Eficácia resistente de pilares de hormigón armado de baja calidad reforzados por dos procedimientos diferentes. *Informes de lá construcción*, Madrid, n. 272, p. 90-98, julho.
- 54.PACHECO, C. O. (2006) - Verificação Experimental da Aderência CFC-Concreto por meio de Ensaio Tração-Compressão. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

- 55.PÁDUA, R. C; LISERRE, A. P. A. R.; SILVA, A. F.; AGUIAR, D. A. (2012) – Pilares de concreto armado reforçados por meio de encamisamento. *Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, Vol 5 - nº 1.
- 56.PAIVA, M. D. M. (2008) - Otimização e análise mecânica de pastas geopoliméricas para uso em poços sujeitos à injeção cíclica de vapor. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte.
- 57.PALOMO, A.; ORDONEZ, L. M.; JIMÉNEZ, A. F. (2007) - Opc-fly ash cementitious systems: Study of gel binders produced during alkaline hydration. *Journal of Materials Science*, n. 42: p. 2958–2966.
- 58.PEREIRA, B. M. G. (2012) - Modelos Analíticos para a Previsão do Desempenho de Pilares Confinados com Fibras de Carbono. Dissertação de Mestrado. Escola Superior de Tecnologia e Gestão Instituto Politécnico de Bragança, Portugal.
- 59.PINTO, A.T. (2006) - Introdução ao Estudo dos Geopolímeros. Editora UTAD, Portugal.
- 60.PINTO, C. (2000) - Reforço à Flexão de Vigas de Concreto Armado com Fibras de Carbono. Tese de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- 61.RAJARAJESWARI, A.; DHINAKARAN, G. (2016) - Compressive strength of GGBFS based GPC under thermal curing. *Construction and Building Materials*, n. 126: p. 552–559.
- 62.RIBEIRO, P. T. P. (2010) - A Lenda do Reforço à Compressão de Pilares de Concreto Armado por Encamisamento com Elementos Compósitos. *Engenharia Estudo e Pesquisa*. Santa Maria, v. 10 - n. 1.

- 63.RIGAZZO, A. O. (2003) – Reforço em pilares de concreto armado por cintamento externo com mantas flexíveis de fibras de carbono. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo.
- 64.ROCHA, G. G. N. R. (2005) – Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais.
- 65.SALABERRY, R. D. (2005) – Limite de deformação das fibras de carbono usadas no reforço à flexão de vigas de concreto armado. Tese de Mestrado. Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- 66.SALEM, A. S.; TALEB, S. A.; TAHAR, K. A. (2015) - Experimental and statistical investigation of a new concrete-composite beam with encased polymer tube wrapped by FRP. *Front. Struct. Civ. Eng.*, n. 9(2): p. 154–162.
- 67.SANTOS, L. S.; DAMASCENO, I. I. R.; RIBEIRO, L. C. N.; OLIVEIRA, D. R.C. O. (2013) - Rounded corners columns strengthened with CFRP. Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará.
- 68.SARAIVA, R. M. D. C. (2010) – Reforço de pilares de concreto armado com folhas de resina e fibras de carbono para obras de infraestrutura. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- 69.SILVA, E. (2006) - Técnicas de Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto Armado. Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo.
- 70.SILVA, F. J. (2000) – Reforço e fratura em compósito de matriz álcali-ativada. Tese de Doutorado, Instituto Militar de engenharia, Rio de Janeiro.

71. SKAF, T. B. (2008) – Influência de matérias – primas na microestrutura e resistência de compósitos geopolimérico. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
72. SOARES, J. C. (2006) - Aço-concreto geopolimérico: correlação entre tensão de aderência e comprimento de ancoragem. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro.
73. SOUZA, J. D. R. B. (2009) - Adesivos Alcalinamente Ativados: Ativação com Silicato de Potássio e Silicato de Sódio. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba.
74. SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. (1998) - Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto. Primeira edição. São Paulo, Editora Pini.
75. SUDANO, A. L. (2010) – Desenvolvimento de estratégias híbridas de reforço de pilares de concreto armado por encamisamento com compósito de alto desempenho. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo.
76. TAKEUTI, A. R. (1999) - Reforço de pilares de concreto armado por meio de encamisamento com concreto de alto desempenho. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo.
77. TAKEUTI, A. R.; HANAI, J. B. (2003) – Reforço de pilares de concreto armado por meio de encamisamento com concreto de alto desempenho. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, São Carlos, n. 21.

78. TECHNICAL DATA MEYEB™ RESIN FOR COMPOSITE MATERIALS.
Disponível em <<http://www.cordi.geopolymer.org>>.
79. TOUTANJI, H. A. (1999) - Stress – Strain Characteristics of Concrete Columns Externally Confined with Advanced Fiber Composite Sheets. *ACI Materials Journal*, V. 96, n. 3.
80. WANG, Lei-Ming; WU, Yu-Fei (2007) - Effect of corner radius on the performance of CFRP-confined square concrete columns: Test. Hong Kong.
81. XIAO, Y., WU, H. (2000) - Compressive Behavior of Concrete Confined by Carbon Fiber Composite Jackets. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 12, n. 2: p. 139-146.
82. YADOLLAHI, M. M. (2013) - Stress–Strain behavior of Geopolymers in Uniaxial and Unconfined Compression. *Revista Matéria*.
83. ZHAO, Q.; NAIR, B.; RAHIMIAN, T.; BALAGURU, P. (2007) - Novel geopolymer based composites with enhanced ductility. *Journal of Materials Science*, n. 42: p. 3131–3137.

ANEXO I

<i>SiO₂</i>				<i>Al₂O₃</i>			
Si		28,0855 g/mol		Al		26,98 g/mol	
O		16 g/mol		O		16 g/mol	
Peso atômico		60,08 g/mol		Peso atômico		101,96 g/mol	
Metacaulim:				Metacaulim:			
247,97 g		100%		247,97 g		100%	
x g		53,17%		x g		37,25%	
x =	131,85 g			x =	92,37 g		
Silicato:				Cimento:			
263,76 g		100%		112,84 g		100%	
x g		32,20%		x g		4,41%	
x =	84,93 g			x =	4,98 g		
Cimento:							
112,84 g		100%		Total		97,34 g	
x g		14,89%					
x =	16,80 g						
Total							
	233,57 g			101,96 g		1 mol	
				97,34 g		x mol	
				x =	0,95 mols		
60,08 g		1 mol					
233,57 g		x mol					
x =	3,89 mols						

K_2O

K	39,10	g/mol
O	16	g/mol
Peso atômico	94,2	g/mol

Metacaulim:

247,97	g	100%
x	g	4,53%
x =	11,22	g

Hidróxido:

106,28	g	100%
x	g	87,10%
x =	92,57	g

Cimento:

112,84	g	100%
x	g	0,98%
x =	1,10	g

Total 104,89 g

94,2	g	1	mol
104,89	g	x	mol
x =	1,11	mols	

 CaO

Ca	40,08	g/mol
O	16	g/mol
Peso atômico	56,08	g/mol

Metacaulim:

247,97	g	100%
x	g	0,30%
x =	0,75	g

Cimento:

112,84	g	100%
x	g	74,32%
x =	83,86	g

Total 84,61 g

56,08	g	1	mol
84,61	g	x	mol
x =	1,51	mols	

 Na_2O

Na	22,99	g/mol
O	16	g/mol
Peso atômico	61,98	g/mol

Silicato:

263,76	g	100%
x	g	14,70%
x =	38,77	g

Total 38,77 g

61,98	g	1	mol
38,77	g	x	mol
x =	0,63	mols	